ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАСЫ

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ

TORAIGHYROV UNIVERSITY

НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/ISSN2788-8770

Импакт-фактор РИНЦ – 0,182

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:
Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Кажибаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Жунусов Аблай Каиртасович – к.т.н., асс. профессор (доцент) (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – PhD, профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия)
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).
Чайкин Владимир Андреевич– д.т.н., доцент (Сафоново, Россия);

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Байгереев С. Р., Гурьянов Г. А., Сулейменов А. Д., Ғабдысалық Р.
Материалдарды майдалап ұнтақтауға арналған жаңа диірменнің жұмыс параметрлеріне ұнтақтау энергиясының тәуелділігін зерттеу.....7
Бузауова Т. М., Бейбіт Ш. Ғ.
Балқытылған ірі модульді тісті доңғалақтардың профилін бақылау нәтижелерін статистикалық негіздеу.....18
Букаева А. З., Поветкин В. В.
Блокты тастарды өндіру және өңдеу кезінде бензин-ауа термоқұралдарын қолдану.....30
Жумагалиев Е. Р., Тайлер И. А., Касымбаев Б. М., Абдуллаев С. С., Хазимов М. Ж.
Расчетно-экспериментальное исследование грузовой устойчивости транспортно-технологической машины с крано-манипуляторной установкой.....54
Ibrayeva A. A., Kuanyshbayev Zh. M., Kapskii D.V.
Study of failure flow of heavy load vehicles of «Zhomart» mine by «Zhezkazgantsvetmet».....76
Исаметова М. Е., Ильясов Е. С., Толунбеков Н. Қ., Ткаченко Д. Е.
MIMICS және MSC PATRAN бағдарламаларын қолдана отырып, ВТ1-0 титан қорытпасынан остеосинтезге арналған жаңа пластиналарды компьютерлік модельдеу және инженерлік талдау.....88
Kassenov A. Zh., Iskakova D. A., Mussina Zh. K., Yanushkin A. S.
Simulation of wedge gate contact interaction in different operating environments.....101
Kots V. N., Satbayeva Z. A., Askerzhanov D. A., Sovetbaev R. A., Shayakhmetov E. Y.
Effect of plasma spraying energy input on APS-sprayed YSZ coatings.....119
Қадірсізова А., Елемесов Қ. К., Басқанбаева Д. Ж., Қалмағанбетов С. А.
Жақтық ұсатқыш корпусының балама материалдарын СЭӘ-мен талдау.....132
Манарбеккызы Б., Елемес Д. Е., Ходжабеков М. У.
Теоретическое исследование динамики адаптивного вибрационного грохота с нелинейными упругими элементами.....151
Молдаханов Б. А.,Дудкин М. В., Коноплин А. Ю., Оразбаев Г. А., Байгунусов А. Ж.
Разработка нового типа мельницы с кинематическим измельчающим устройством для помола отходов производства.....163
Rasol A., Sherov A. K., Rasol B., Baishugulova Sh.
Effect of ultrasonic coolant on milling quality and tool wear.....182

Sapinov R. V., Kassymova D. B.
Predicting optimal copper precipitation parameters in the cyanidation process for gold-copper ores: from experimental design to adaboost modeling.....198
Sarsembayev D. Zh., Daniyarov N. A., Kelisbekov A. K.,Sargulzhina A. A.
Improving the energy efficiency of diesel transport equipment in deep mines.....209
Тогусов А. К., Кажибаев К. С., Жантлесов Е. Ж., Алимжанов М. Д., Калиев А. Б.
Расчет конструкции защитного устройства бронетехники от БПЛА на основе компьютерного моделирования.....225
Төреханова М. Т., Комбаев К. К., Тлеужанова Г. Б., Уркунбай А. С., Қизатов А. С.
Влияние режимов резания и параметров инструмента на шероховатость поверхности при точении сплава Д16.....236
Chukenova E. S., Nugman Y. Z., Mustafa A. K., Sagyntay M. K., Khoshnaw F.
WAAM of low-carbon steel using MIG welding under equivalent conditions.....250
Шайкемелов А. А., Бекмырза Ж. А., Бедыч Т. В.
Современные решения повышения эффективности воздушно-решетных сепараторов зерна.....272
Шеров К. Т., Тулиева Н. Б., Мухамедьяров Д. З., Маякин Е. Р., Бөбеев А. Б.
Hardox болатын балқитын электродпен электрлі доғалы дәнекерлеу үрдісін зерттеу.....286

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

Баймолданова Л. С., Абылкалыкова Р. Б.
Влияние вакуумно-дугового осаждения на структуру и эксплуатационные свойства покрытий (TIALSIY)N/CRN.....298
Богомолов А. В., Кажмухамбетов Ж. Б., Каменов А. А., Спанов С. С., Жунусова А. К.
Сравнительный анализ современных технологий производства мелющих шаров.....315
Bykov P. O., Suyundikov M. M., Kuandykov A. B., Mukanov R. B., Pochinok S.
Thermodynamic modeling of additional iron recovery from Kazakhstani bauxites using alternative reducing agents.....326
Ғылымханов Б. Т., Амитова А. А., Елубай М. А., Меркибаев Е. С., Айткалиева Г. С.
Влияние термической активации на фазовый состав и свойства красного шлама.....342
Жәнібеков Е. С., Абдулина С. А.
Разработка метода спекания твердого сплава для пресс-форм производства ядерного топлива.....353

Issagulov A. Z., Kovalyova T. V., Kazhikenova S. Sh., Shaltakov S. N., Serzhan5 A. Zh.
Effect of crystallization conditions on the mechanical properties of cast 40KHN3MF steel.....371
Kabylkanov S., Makhambetov Ye., Abdulina S., Zhumagaliev Ye., Yucel O.
Investigation of the process of chromium-manganese ligature production under large-scale laboratory smelting conditions.....380
Калиакпаров А. Г., Аубакиров А. М., Капелюшин Ю. Е.
Металлургическая оценка высокозольного углеродистого восстановителя для ферросплавного производства.....392
Рахадилов Б. К., Муктанова Н., Ахметова Э. К., Магазов Н. М.
Структурный и функциональный анализ покрытий CRN и CR/CRN на сплаве E110.....406
Revutskiy A. V., Syrnev B. V., Lopatin V. Yu.
Development of a flexible technological regulation for quality control of hot-pressed Beryllium.....422
Sagintaeva Zh. I., Issabayeva M. A., Kuanyshbekov Ye .Ye., Kasenov B. K., Tozlu A.
Synthesis, X-Ray diffraction and thermodynamics of cuprate-vanadate-manganite $LaBaCuVMnO_{7,5}$.....435
Султангазиев Р. Б., Орлов А. С., Титошева Қ. М.
Хром-никельді ферроқорытпаны металлотермиялық әдіспен өндіру технологиясын термодинамикалық моделдеу.....446
Tolokonnikova V. V., Baisanov S., Kenzhaliyev O. B., Salina V. A.
Modeling crystallization in the Mg–Si system using the bjerrum–guggenheim concept.....460
Улмаганбетов Н. А., Алмагамбетов М. С., Мырзагалиев А. А., Исагулова Д. А.
Окускование мелкодисперсных хромсодержащих материалов методом жесткой экструзии.....472
Уркунбай А. С., Кожахметов Е. А., Нұрақова Г. О., Даулетханов Е. Д., Мухаметхан М. Р.
Формирование пористого TiC методом ИПС после планетарного смешивания с $(NH_4)_2CO_3$.....488

КӨЛІК
ТРАНСПОРТ
TRANSPORT

Асылбекова Р. К., Кобдикова Ш. М., Кисиков М. К., Айкумбеков М. Н.
Влияние инфраструктурных ограничений на безопасность и пропускную способность мультимодальных транспортных коридоров.....501
Әнібекқызы М., Рабат О. Ж., Досжанов О. М., Ханкелов Т. К.
Биогаз шығымын салыстырмалы талдау және газ қозғалтқышындағы жану процесін математикалық модельдеу.....516

Балабаев О. Т., Суюнбаев Ш. М., Аскаров Б. Ш., Қасымжанова А. Д., Косбармаков С. Ж.
Резеңкетросты конвейер таспаларының қызмет мерзімін ұзарту тәсілі ретінде болат тростардың орналасуын оңтайландыру.....535
Бижигитова Д. А.,Шингисов Б. Ж., Камзанов Н. С. Абекова А. Ж., Юсупова К.
Оптимизация параметров прессования мембранно-электродных сборок PEMFC.....545
Kardassinov S. M., Murzakhmetova U. A., Kanibekova M. A., Kabashev A. R.
Requirements for diagnostic equipment of vehicle technical condition instrumental inspection centers.....555
Нохатов М. А., Айкумбеков М. Н., Атабеков К. К.
Қалаға кіретін көшелердегі қозғалыс жылдамдығының кеңістіктік-уақыттық сипаттамаларын талдау.....566
Rakisheva A. A., Kokin S. B., Baltabekova A. N., Bouchner Petr, Abishev K. K.
Optimization of battery pack design for hybrid powertrain vehicles.....579
Рожков А. В., Аскаров Б. Ш., Касымжанова А. Д., Куанышбаев А. Б., Коныртаева К. Б.
Исследование механизма распределения нагрузки между автономными контурами крутонаклонного конвейера.....588
Ситакова А. Н., Кабикенов С. Ж., Ищенко А. П., Киселева Г. В.
Электромобили и современные зарядные системы: надежность, управление и адаптивные технологии.....606
Чакеева К. С., Қалқабаева А. Е., Қажмұратова А. К., Болатқызы С., Тымбаева Ж. М.
Қазақстан Республикасының көлік-логистикалық компанияларында адами капиталдың цифрлық жетілуін бағалаудың халықаралық модельдерін бейімдеу.....619

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors.....633

Авторларға арналғал ережелер
Правила для авторов
Rules for authors.....687

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics.....697

МАШИНА ЖАСАУ

FTAMP 55.33.41
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/7-17

С. Р. Байгереев[1], Г. А. Гурьянов[2], *А. Д. Сулейменов[3], Р. Ғабдысалық[4]
[1,2,4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7773-5457
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3657-3735
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9319-0285
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897
*e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz

МАТЕРИАЛДАРДЫ МАЙДАЛАП ҰНТАҚТАУҒА АРНАЛҒАН ЖАҢА ДИІРМЕННІҢ ЖҰМЫС ПАРАМЕТРЛЕРІНЕ ҰНТАҚТАУ ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ТӘУЕЛДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыста бөлшектерге горизонталды екіжақты және вертикалды біржақты күштік әсер көрсететін жаңа инновациялық конструкциялы вибрациялық диірмендегі материалдарды майдалап ұнтақтаудың жұқа үрдістері зерттелді. Қолданыстағы бар дәстүрлі әдістердегі көлемдік беріктену, энергия шығынының жоғарылығы және бөлшектердің агломерациялануы қажетті дисперстілікке қол жеткізуге мүмкіндік бермейді. Осыған байланысты бөлшектерде күрделі кернеулі-деформацияланған күй тудыратын өзара перпендикуляр екі бағытты вибрациялық әсер ұсынылып отыр. Зерттеу жұмысы барысында ұнтақтаушы ортаның горизонталды, вертикалды және қорытқы жылдамдықтарын анықтауға мүмкіндік беретін қозғалыс моделі құрылды және оған қоса үш жұмыс режимі (жекелеген горизонталды, вертикалды тербелістер және олардың бір мезеттегі әсері) бойынша есептеулер жасалды. Екі бағытты үйлесімді режимде қорытқы жылдамдық 1,40 м/с-қа, ал ұнтақтағыш денелердің өзара әрекеттесу меншікті энергиясы 0,9869 Дж/кг-га дейін артып, бұл дербес горизонталды тербеліске қарағанда 25%-га жоғары көрсеткішті қамтамасыз етіп отыр. Зерттеу нәтижелері ұсынылған жүйенің энергетикалық тиімділігін, ұнтақталу сапасын арттырып, бөлшектердің жабысуын тежейтінін дәлелдейді. Әзірленген диірменнің инновациялық конструкциясы мен теориялық моделі әртүрлі сипаттағы материалдарды жұқа және аса майда ұнтақтау технологияларында пайдалануға ұсынылып отыр.

Кілтті сөздер: майдалап ұнтақтау, комбинацияланған күштік әсер, ұнтақтау энергиясы, материалдың беріктенуі, бөлшек дисперсиясы, дірілдік үрдістер, ұнтақтаудың энергия тиімділігі, гранулометриялық таралу.

Кіріспе

Заманауи технологиялық үрдістерде майдалап ұнтақтау негізгі операциялардың бірі. Ол жіктеу, байыту, араластыру және химиялық түрленулерді қоса кейінгі өңдеу деңгейлерінің тиімділігін айқындайды [1; 2; 3]. Соңғы өнімнің сапасына талаптардың өсуі, оған қоса құрылыс, минералды және техногенді шикізаттарды өңдеудің жинақтығының (комплексность) артуына байланысты өлшемі бақыланып отыратын және өте майдалы гранулометриялық үлестірілетін бөлшектерді алу қажеттілігі одан ары артуда. Майдалап ұнтақтау сатысында энергетикалық, механикалық және химиялық үрдістердің тиімділігіне әсер ететін материалдың шектік сипаттамалары қалыптасады.

Қазіргі өнеркәсіп жоғары қаттылықтағы, құрылымы жағынан әртекті және физика-механикалық қасиеттері күрделі шикізатты өңдеу қажеттілігіне тап болып отыр, бұл анағұрлым энергиялық жағынан тиімді және өнімділігі жоғары ұнтақтау әдістерін әзірлеуді талап етеді. Белгілі болғандай, материалды өңдеуге жұмсалатын жалпы энергияның 40–60 %-ы нақ майдалап ұнтақтау кезеңіне тиесілі, ал оның тиімділігін арттыру өнімнің өзіндік құнын едәуір төмендетіп, өндірістің көміртек ізін азайта алады [4; 5; 6]. Сондықтан майдалап ұнтақтау процестерін оңтайландыруға, энергияның жұмыс денелеріне берілу тиімділігін арттыруға және ұнтақталған материал құрылымын жақсартуға бағытталған зерттеулер стратегиялық маңызға ие.

Сонымен қатар нанотехнологиялар, аддитивті өндіріс, жоғары берікті композиттер және функционалдық материалдардың дамуы субмикрондық және наноөлшемді бөлшектерді алуды қамтамасыз ететін әдістерді қажет етеді. Мұндай жағдайларда дәстүрлі ұнтақтау тәсілдерінің мүмкіндігі шектеулі болып, жаңа техникалық шешімдер іздеуді және жұмыс денелері мен ұнтақталатын материалдың өзара әрекеттесуінің теориялық модельдерін жетілдіруді ынталандырады.

Материалдарды майдалап ұнтақтау процестері қажетті дисперссия дәрежесіне қол жеткізу тиімділігін айтарлықтай шектейтін бірқатар фундаменталды және технологиялық мәселелермен қатар жүреді. Негізгі қиындықтардың бірі – дәстүрлі механикалық әдістерді қолданғанда талап етілетін ұсақтыққа қол жеткізе алмау [7]. Бөлшектердің өлшемі кішірейген сайын материалда беріктену құбылысы байқалады: құрылымдағы ақаулардың үлесі артады, меншікті бет ұлғаяды, механикалық қасиеттер өзгереді, нәтижесінде әрі қарайғы бұзылуға қарсылық өседі. Бұл «өлшемдік беріктену» деп аталатын құбылыс процеске қажетті энергияның шамадан тыс артуына әкеліп, майдалап ұнтақтау тиімділігін күрт төмендетеді [8]. Тағы бір іргелі мәселе – майдалап ұнтақтау операцияларының энергия сыйымдылығының жоғары болуы. Микрондық және субмикрондық деңгейге жақындаған сайын жұмыс денелерінен бөлшектерге энергия берудің тиімділігі айтарлықтай төмендейді [9]. Энергияның елеулі бөлігі жылуға, дірілге,

қажалуға және тиімсіз соққылық әрекеттесулерге таралады. Соның нәтижесінде бөлшектерді тікелей бұзуға жұмсалатын пайдалы энергияның үлесі өте төмен күйінде қалады. Белгілі болғандай, майдалап ұнтақтау қайта өңдеу процесінің жалпы энергиясының 40–60 %-ына дейін тұтынуы мүмкін, бұл пайдалану шығындарының жоғары болуына және аса ұсақ технологиялардың өнеркәсіптік қолданылуын шектеуге алып келеді.

Аталған мәселелерге ұнтақталған материалдың гранулометриялық құрамының тұрақсыздығы да қосылады. Шектік өлшемдерге жеткенде бөлшектер агрегация мен агломерацияға бейім болады, бұл біркелкі фракция алуды қиындатады. Бұл құбылыс бөлшектердің меншікті бетінің артуы салдарынан пайда болатын өзара тартылу күштері мен электростатикалық әрекеттесулердің күшеюімен түсіндіріледі.

Бөлшектер өлшемінің кішіреюінен туындайтын материал беріктігі, энергия берудің төмен тиімділігі және майда бөлшектердің агломерацияға бейімділігі сияқты факторлардың жиынтығы дәстүрлі ұнтақтау әдістерінің қажетті ұсақтық пен тұрақтылықты қамтамасыз ете алмайтынын көрсетеді. Сондықтан анағұрлым эффективті, бейімделгіш және энергиялық жағынан оңтайландырылған технологияларды әзірлеу, сондай-ақ жұмыс денелері мен материалдың өзара әрекеттесу модельдерін жетілдіру майдалап ұнтақтау саласындағы қазіргі ғылыми зерттеулердің басым бағыттары болып табылады.

Көрсетілген дәстүрлі майдалап ұнтақтау әдістерінің шектеулерін жеңу үшін бөлшекке екі өзара перпендикуляр бағытта бір мезгілде әсер ететін біріктірілген ұнтақтау принципі ұсынылады. Идеяның мәні – материалға горизонталь жазықтықта қарсы (екіжақты) күштік әсер ету және вертикаль бағытта біржақты қысым түсіру. Мұндай схема бөлшекте күрделі кернеулі-деформацияланған күйдің пайда болуын қамтамасыз етеді және оны бұзу ықтималдығын энергиялық жағынан төмен шығынмен айтарлықтай арттырады.

Горизонталь екіжақты әсер ету созылу және ығысу деформацияларының пайда болуына жағдай жасайды, бұл әсіресе алдыңғы майдалау сатыларында беріктену көрсеткен бөлшектердің орнықтылығын айтарлықтай төмендетеді. Жұмыс элементтерінің қарсы қозғалысы материалдың жергілікті аймақтарында кернеулердің шоғырлануын туындатады және жарықшақтардың ең әлсіз кристаллографиялық немесе құрылымдық беттер бойымен басталуына ықпал етеді.

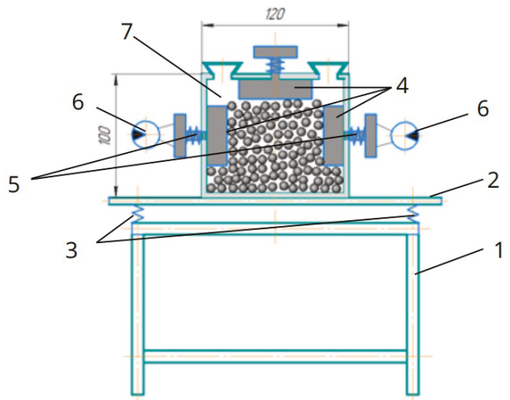
Вертикаль біржақты әсер горизонталь жүктемелердің әрекетін күшейтетін қосымша бұзушы рөлін атқарады. Вертикаль бағытта қысым түскенде бөлшекте кернеулердің біріктірілген кешені пайда болады: горизонталь күштер тудыратын созылу және ығысу компоненттері вертикаль сығу жүктемесімен өзара әрекеттеседі. Мұндай үйлесім материал құрылымының тұрақсыздандырылуына, бұзылу шегінің төмендеуіне және жаңа беттер түзуге энергияның тиімді берілуіне алып келеді.

Біріктірілген күштік әсер берілген майдалау ұсақтығына қол жеткізу үшін қажетті энергия көлемін едәуір азайтуға мүмкіндік береді. Бөлшекте қалыптасатын көпкомпонентті кернеулер оның сыртқы күштердің төмен амплитудасында

бұзылуына жағдай жасайды, бұл әсіресе қатты, морт және беріктенуге бейім материалдарды ұнтақтау кезінде маңызды. Сонымен қатар, ұсынылған принцип бұзылудың неғұрлым біркелкі сипатын қамтамасыз етеді, майда бөлшектердің агломерациялану ықтималдығын төмендетеді және гранулометриялық таралудың тар болуына ықпал етеді.

Осылайша, біріктірілген ұнтақтау схемасы – горизонталь екіжақты және вертикаль біржақты жүктеуді бір мезгілде қолдану – майдалап ұнтақтаудың тиімділігін арттыру үшін қолайлы жағдай туғызады және энергиялық жағынан тиімді ұнтақтау технологияларын әзірлеудің негізі бола алады.

Осы принципті жүзеге асырудың нұсқаларының бірі 1-суретте көрсетілген.



1-сурет –Диірмен сұлбасы

Диірменнің конструкциясы материал бөлшектеріне горизонталь бағыттағы қарсы әсерді және вертикаль бағыттағы біржақты жүктеуді бір мезгілде қамтамасыз етеді. Қондырғы келесі негізгі элементтерден тұрады: қозғалмайтын рама 1, дірілді үстел 2, вертикаль серіппелер 3, поршеньдер 4, горизонталь серіппелер 5, дебаланс дірілдеткіштері 6, сондай-ақ ұнтақтау ортасымен толтырылған ұнтақтау камерасы 7.

Ұнтақтау камерасы 7 дірілді тораптың ішінде орналасқан және ұнтақтау ортасын – шарлар, цилиндрлер немесе біріктірілген ұнтақтағыш денелерді қамтиды. Сол камераның ішінде материалға горизонталь жазықтықта күштік әсерді беретін поршеньдер 4 орналастырылған. Горизонталь серіппелер 5 поршеньдерді камера корпусымен байланыстырады, бұл діріл тудырылғанда поршеньдердің бір-біріне қарай қарсы қозғалысын қамтамасыз етеді.

Дірілді үстел 2 вертикаль серіппелер 3 жүйесіне тірелген, бұл бүкіл ұнтақтау камерасының вертикаль тербеліс жасауына мүмкіндік береді. Үстелде бекітілген дебаланс дірілдеткіштері 6 берілген жиілік пен амплитудада тербелістер тудырады. Олардың айналуы мәжбүрлі дірілді қалыптастырады, бұл тербелістер камераға 7 беріледі және оның вертикаль бағытта орын ауыстыруына әкеледі. Сонымен

қатар дірілдеткіштер горизонталь тербеліс компоненттерін де қалыптастырып, поршеньдерге екіжақты әсерді қамтамасыз етеді.

Дірілді жетектер қосылғанда дебаланс дірілдеткіштері вертикаль және горизонталь құрамдас бөліктерден тұратын кеңістіктік тербеліс жүйесін қалыптастырады. Вертикаль құрамдас бөлік серіппелер 3 арқылы беріледі және камераның 7 жоғары-төмен периодтық тербелістер жасауына әкеледі, бұл ұнтақтау ортасы мен бөлшектер қабатына біржақты соққы-сығу әсерін жасайды.

Горизонталь құрамдас бөлік поршеньдердің 4 периодтық ығысуын туындатады; серіппелердің 5 серпімді қасиеттерінің арқасында поршеньдер бір-біріне қарсы қозғалады. Бұл ұнтақтау ортасының бөлшектерге қарсы соққыларын тудырады және бөлшектерде екіжақты созылу мен ығысу деформацияларын қалыптастырады – бұл беріктенген бөлшектердің бұзылу ықтималдығын арттыратын негізгі механизмдер.

Вертикаль импульстар мен горизонталь қарсы әсерлердің үйлесімі бөлшектерде сығылу, созылу және ығысу компоненттерін қамтитын күрделі кернеулі күйдің пайда болуына әкеледі. Мұндай көпкомпонентті жүктеу жарықшақтардың басталуы мен таралу ықтималдығын арттырады, бұзылу шегін төмендетеді және энергия сыйымдылығы азайтылған жағдайда неғұрлым біркелкі ұнтақтауды қамтамасыз етеді.

Бұдан басқа, поршеньдер мен ұнтақтау ортасының динамикалық өзара әрекеттесуі ұнтақтау камерасының ішінде бөлшектердің қарқынды циркуляциясын қалыптастырады. Бұл майда бөлшектердің агломерациясын азайтуға, өлшем бойынша жақсырақ таралуға және діріл жетегінің энергиясын тиімдірек пайдалануға ықпал етеді.

Осылайша, сипатталған диірмен конструкциясы горизонталь екіжақты және вертикаль біржақты жүктемені бір мезгілде қолданатын біріктірілген әсер ету принципін жүзеге асырады, бұл майдалап ұнтақтау процесінің тиімділігін арттыруға, материал дисперстілігін жақсартуға және процестің жалпы энергия сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістері

Горизонталь жылдамдықтың v_h туындау көзі дебаланс дірілдеткіштерінің әсері болғандықтан, поршеньдер горизонталь бағытта дірілдік қозғалыс жасайды. Тиісінше, ұнтақтау ортасының горизонталь жазықтықтағы қозғалысы келесі тербеліс теңдеуімен сипатталуы мүмкін [10; 11; 12]:

$$x = A_x \omega_x \cos \omega_x t_x \quad (1)$$

мұндағы A_h – горизонталь тербелістердің амплитудасы (мм), ω_h – горизонталь бағыттағы тербелістердің айналымдық жиілігі (рад/с), ал t_h – тербеліс уақыты (с).

Ұнтақтау ортасының бөлшекпен әрекеттесуге дейінгі қозғалу жылдамдығы (1)-өрнектің бірінші туындысы ретінде анықталады [13; 14; 15]:

$$v_x = \frac{\partial x}{\partial t} = A_x \omega_x \quad (2)$$

Осыған ұқсас түрде, ұнтақтау ортасының вертикаль қозғалысы дірілдейтін үстел арқылы туындайтындықтан, вертикаль бағыттағы қозғалыс келесі тербеліс теңдеуімен сипатталуы мүмкін:

$$y = A_y \omega_y \cos \omega_y t_y \quad (3)$$

Ұнтақтау ортасының жылдамдығы (3) теңдеудің бірінші туындысы ретінде төмендегі түрде анықталуы мүмкін:

$$\upsilon_y = \frac{\partial y}{\partial t} = A_y \omega_y \quad (4)$$

мұндағы A_v – вертикаль тербелістер амплитудасы (мм), ω_v – вертикаль бағыттағы айналымдық жиілік (рад/с), ал t_v – вертикаль бағыттағы тербеліс уақыты (с).

Ұнтақтау процесі екі бағытта (горизонталь және вертикаль) горизонталь жылдамдық v_h пен вертикаль жылдамдық v_v әсерінен жүзеге асатынын ескере отырып, бөлшек өлшемінің кішіреюі әсер етуші қорытқы жылдамдық v_r әсерінен модельденеді.

v_h және v_v жылдамдықтары өзара перпендикуляр бағыттарда әсер ететіндіктен, әрі қарайғы есептеулерде олар қорытқы жылдамдық v_r түрінде келесі түрде ұсынылады:

$$\upsilon_{xy} = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2} = \sqrt{A_x^2 \omega_x^2 + A_y^2 \omega_y^2} \quad (5)$$

Есептеу параметрлері кезең-кезеңімен, тербелістің әрбір бағытының әсерін дәйекті талдау арқылы жүргізіледі.

1. Бірінші есептік жағдай – тек горизонталь тербелістер. Осы кезеңде вертикаль жетекті шартты түрде өшіреміз, соның нәтижесінде вертикаль амплитуда мен жиілік нөлге тең деп қабылданады:

$$A_y = 0 \text{ мм}, \omega_y = 0 \text{ Гц}.$$

Горизонталь компонент толық көлемде әсер етеді:

$$A_x = 4 \text{ мм}, \omega_x = 50 \text{ Гц}.$$

Бұл көлденең дірілдік әсердің үлесін анықтауға және v_x жылдамдығын, сондай-ақ (5) формула бойынша қорытқы жылдамдықты есептеуге мүмкіндік береді.

2. Екінші есептік жағдай – тек вертикаль тербелістер. Енді горизонталь жетекті өшіріп, төмендегі мәндерді қабылдаймыз:

$$A_x = 0 \text{ мм}, \omega_x = 0 \text{ Гц},$$

ал вертикаль параметрлері төмендегі мәндерде қалады:

$$A_y = 2 \text{ мм}, \omega_y = 50 \text{ Гц}.$$

Бұл кезеңде бөлшектердің бұзылу процесіне вертикаль компоненттің үлесі бағаланады.

3. Үшінші есептік жағдай – екі бағыттағы бірлескен тербелістер. Диірменнің нақты жұмыс режимінде екі жетек те бір уақытта жұмыс істейді:

$$A_x = 4 \text{ мм}, \omega_x = 50 \text{ Гц}, A_y = 2 \text{ мм}, \omega_y = 50 \text{ Гц}.$$

(5)-формула бойынша материалға түсетін толық дірілдік әсерді сипаттайтын қорытқы жылдамдық анықталады.

Үш есептік жағдайдың нәтижелерін салыстыру горизонталь және вертикаль құрамдас бөліктердің үлесін жеке бағалауға мүмкіндік береді және олардың бірлескен әрекеті ұнтақтағыш денелер мен материал бөлшектері арасындағы өзара әрекет энергиясын жоғарырақ деңгейде қамтамасыз ететінін көрсетеді.

1-кесте – Есептеу нәтижелері

Жағдай	Жылдамдық υ, м/с	Энергия, Дж
1 –Тек горизонталь	1.25	0.7895
2 – Тек вертикаль	0.62	0.1973
3 – Біріктірілген	1.40	0.9869

Нәтижелер және талқылау

Деректерді талдау көрсеткендей, тек горизонталь тербелістер әрекет ететін режимде дірілдік әсер жылдамдығы $v = 1{,}256637$ м/с болып, оған сәйкес меншікті энергия $E = 0{,}789568$ мәніне тең. Бұл режим жұмыс камерасының көлденең жылжуы есебінен қалыптасатын энергияның базалық деңгейін қамтамасыз етеді.

Тек вертикаль жетек жұмыс істеген жағдайда жылдамдық екі есе төмендеп, $v = 0{,}628319$ м/с болады, ал энергия $E = 0{,}197392$ Дж/кг деңгейіне дейін азаяды. Бұл вертикаль құрамдас бөлік жеке алғанда бөлшектердің интенсивті бұзылу процесіне әлдеқайда аз үлес қосатынын көрсетеді. Вертикаль тербелістер динамикалық босату-жүктеу әсерін қалыптастырғанымен, ұнтақтағыш денелердің жоғары жылдамдықпен орын ауыстыруын қамтамасыз етпейді.

Ең назар аударарлық жайт екі бағыттағы – горизонталь және вертикаль – тербелістердің бірлескен әрекеті тудыратын режимінде. Бұл жағдайда қорытқы жылдамдық $v = 1{,}404963$ м/с мәніне дейін өседі, ал меншікті кинетикалық энергия $E = 0{,}986960$ Дж/кг деңгейіне жетеді, бұл тек горизонталь тербелістерді қолданған кездегіден 25 % жоғары. Энергияның артуы жылдамдықтардың векторлық

қосылуы және ұнтақтағыш денелердің жұмыс көлеміндегі неғұрлым интенсивті траекториясының қалыптасуы арқылы түсіндіріледі.

Алынған нәтижелер көрсетіп отырғандай, біріктірілген тербелістерді қолдану ұнтақтағыш денелер мен материал бөлшектері арасындағы өзара әрекет энергиясын айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде ұнтақтау тиімділігінің жоғарылауына алып келуі тиіс. Осылайша, ұсынылған дірілді диірменнің конструктивтік сұлбасы процестің энергиялық жағынан қамтамасыз етілуін жоғарылатып, ұнтақтау майдалығы мен біртектілігін жақсарту үшін елеулі әлеуетке ие.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылай қолдауы арқылы орындалды (Грант №AP22685023).

Қорытынды

Ұсынылған жұмыста материал бөлшектеріне горизонталь екіжақты және вертикаль біржақты жүктеуді жүзеге асыратын жаңа конструкциялы диірменде дірілдік әсер параметрлерінің ұнтақтау энергиясына тәуелділігі зерттелді. Кинематикалық сипаттамалардың есептеулерімен расталған теориялық талдау екі өзара перпендикуляр бағыттағы тербелістерді біріктіріп қолдану ұнтақтағыш денелердің қорытқы жылдамдығын едәуір арттыратынын және соның салдарынан өзара әрекеттесу энергиясының жоғарылауына алып келетінін көрсетті.

Горизонталь дірілдік құрамдас бөлік ұнтақтау энергиясының қалыптасуына негізгі үлес қосатыны анықталды, ал вертикаль әсер жеке қарастырылғанда интенсивтілігі төмен болып, негізінен босату-жүктеу функциясын атқарады. Дегенмен, олардың біріктірілген әрекеті ұнтақтағыш денелердің кеңістіктік траекториясын қалыптастырады және жылдамдықты 1,40 м/с деңгейіне дейін, ал энергияны 0,9869 Дж/кг мәніне дейін арттырады, бұл тек горизонталь тербелістер режимімен салыстырғанда 25 % жоғары. Бұл ұсынылған конструктивтік сұлбаның тиімділігін растайды және әртүрлі бағыттағы тербелістер бөлшектерде күрделі кернеулі-деформацияланған күйді тудырып, олардың төмен энергиялық шығынмен бұзылу ықтималдығын арттырады.

Зерттеу нәтижелері әртүрлі табиғаттағы материалдарды майдалап және аса майдалап ұнтақтау үшін біріктірілген дірілдік процестерді қолданудың жоғары перспективасы бар екенін көрсетеді. Бұл технологияны іске асыру төмендегілерге қол жеткізуге мүмкіндік береді:

– процестің энергиялық жағынан тиімділігін арттыруға, яғни пайдалы энергия үлесін көбейту арқылы;

– созылу, ығысу және соққы-сығу жүктемелерінің үйлесуі нәтижесінде ұнтақтау ұсақтығы мен біртектілігін жақсартуға;

– ұнтақтау ортасының интенсивті циркуляциясы есебінен майда бөлшектердің агломерациялану дәрежесін төмендетуге;

– қатты, морт және беріктенуге бейім материалдарды өңдеу мүмкіндіктерін кеңейтуге.

Осылайша, ұсынылған дірілді диірмен конструкциясы және ұнтақтағыш денелер мен материал бөлшектерінің өзара әрекет энергиясын бағалау моделі

тиімділігін дәлелдеп, кейінгі эксперименттік зерттеулер жүргізуге, жабдықтың жұмыс режимдерін оңтайландыруға және энергиялық жағынан үнемді майдалап ұнтақтау технологияларын әрі қарай дамытуға негіз бола алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Pamparana, G., Klein, B., Bergerman, M. G.** Impact of the feed particle size distribution and its packing characteristics on compression comminution // Minerals Engineering. – 2024. – Vol. 218. – P. 108967. – https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108934

2 **Sun, J., Frattini, P., Crosta, G. B.** Deposit comminution in a weak variably-cemented breccia rock avalanche // Engineering Geology. – 2023. – Vol. 327. – P. 107353. – https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107331

3 **Runge, K. C., Frausto, J. J., Lisso, M. M., Jokovic, V., Yahyaei, M.** Importance of considering classification and liberation when optimising comminution and flotation // Minerals Engineering. – 2024. – Vol. 209. – P. 108638. – https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108612

4 **Asbjörnsson, G., Tavares, L. M., Mainza, A., Yahyaei, M.** Different perspectives of dynamics in comminution processes // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 176. – P. 107332. – https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107326

5 **Gomes, P. C. C., Ulsen, C., Pereira, F. A., Quattrone, M., Angulo, S. C.** Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates // Waste Management. – 2015. – Vol. 45. – P. 171–179. – https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.008

6 **Williams, O., Lester, E., Kingman, S., Giddings, D., Lormor, S., Eastwick, C.** Benefits of dry comminution of biomass pellets in a knife mill // Biosystems Engineering. – 2017. – Vol. 160. – P. 42–54. – https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.011

7 **Guo, W., Gui, X., Xing, Y., Zhang, H., Ma R., Meng, W., Luo, M.** Study on the unequal-probability comminution of spodumene and feldspar during the grinding process of lithium ore // Powder Technology. – 2023. – Vol. 418. – P. 118776.

8 **Chaudhari, A., Soh, Z. Y., Wang, H., Senthil Kumar, A.** Rehbinder effect in ultraprecision machining of ductile materials // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2018. – Vol. 133. – P. 47–60.

9 **Purhamadani, E., Bagherpour, R.** The role of different explosives in reducing energy and emissions in mining comminution for sustainable improvement // Energy. – 2024. – Vol. 310. – P. 133233. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133233

10 **Chen, K., Xu, P., Liao, Z., Zhou, X., Li, B.** Analyses of robotic milling vibration based on the tool–workpiece engagement process // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. – Vol. 154. – P. 659–678. – https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.10.002

11 **Zhu, Z., Feng, P., Yuan, M., Zhou, K., Blumberg, J., Jiang, E., Uhlmann, E., Feng, F.** Functionalization and prediction of end milling surface topography based on a perspective decoupling chatter and forced vibration // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. – Vol. 154. – P. 563–576. – https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.10.007

12 **Ozsoy M., Sims N. D., Ozturk E.** Actuator saturation during active vibration control of milling // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2025. – Vol. 224. – P. 111942. – https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111942

13 **Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.** Fundamentals of Physics. – 10th ed. – Hoboken : Wiley, 2014. – 1450 p.

14 **Jiang, S., Liu, H., Zuo, Y., Sun, D., Yang, Y., Zhao, D., Liu, K., Wang, Y.** Cutting vibration characteristics and mechanisms in the end milling of superalloy honeycomb core with ice fixation clamping // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2024. – Vol. 215. – P. 111422.

15 **Ji, M., Liu, G., Yin, K., Yang, W., Guo, F., Xu, J., Chen, M.** Effect of surface textures fabricated by two-dimensional ultrasonic vibration-assisted milling on the key surface properties of dental ceramics // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50. – Iss. 24. – Part B. – P. 53592–53609.

28.07.26 ж. баспаға түсті.
28.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

С. Р. Байгереев[1], Г. А. Гурьянов[2], *А. Д. Сулейменов[3], Р. Габдысалық[4]
[1,2,4]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 28.07.26.
Поступило с исправлениями 28.07.26.
Принято в печать 31.08.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В НОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ТОНКОГО ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ

В работе представлено исследование процессов тонкого измельчения материалов в вибрационной мельнице новой конструкции, реализующей комбинированный принцип нагружения частиц: горизонтальное двустороннее и вертикальное одностороннее воздействие. Показано, что традиционные методы измельчения сталкиваются с проблемами размерного упрочнения, низкой энергоэффективности и агломерации частиц, что ограничивает достижение требуемой дисперсности. Для повышения эффективности предложено сочетание вибраций в двух взаимно перпендикулярных направлениях, формирующее сложное напряжённо-деформированное состояние в частицах. Разработана модель движения измельчающей среды, основанная на определении горизонтальной, вертикальной и результирующей скоростей. Проведены расчёты трёх режимов работы мельницы: с отдельным действием горизонтальных и вертикальных колебаний, а также при их совместном использовании. Установлено, что комбинированный режим обеспечивает увеличение результирующей скорости до 1,40 м/с и рост удельной энергии взаимодействия мелющих тел до 0,9869 Дж/кг, что на 25 % выше по сравнению с использованием только горизонтальных колебаний. Полученные результаты подтверждают, что совместное воздействие в двух направлениях повышает энергоэффективность процесса, улучшает дисперсность помола и снижает склонность частиц к агломерации. Предложенная конструкция вибрационной мельницы и теоретическая модель могут быть использованы при разработке энергоэффективных технологий тонкого и сверхтонкого измельчения материалов различной природы.

Ключевые слова: тонкое измельчение, комбинированное нагружение, энергия измельчения, упрочнение материала, дисперсность частиц, вибрационные процессы; энергоэффективность помола; гранулометрическое распределение.

S. R. Baigereyev[1], G. A. Guryanov[2], *A. D. Suleimenov[3], R. Gabdyssalyk[4]
[1,2,4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[3]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 28.07.26.
Received in revised form 28.07.26.
Accepted for publication 31.08.26.

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF GRINDING ENERGY ON OPERATING PARAMETERS IN A NEW MILL FOR FINE MATERIAL COMMINUTION

This work presents a study of fine grinding processes in a novel vibration mill design that implements a combined particle loading principle: horizontal bilateral and vertical unilateral impact. It is shown that traditional grinding methods face limitations caused by size hardening, low energy efficiency, and particle agglomeration, which hinder achieving the required fineness. To improve grinding performance, a combination of vibrations in two mutually perpendicular directions is proposed, forming a complex stress–strain state within the particles. A model describing the motion of the grinding media was developed based on determining the horizontal, vertical, and resultant velocities. Calculations were performed for three operating modes of the mill: separate action of horizontal and vertical vibrations, as well as their combined application. It was established that the combined mode increases the resultant velocity to 1.40 m/s and the specific interaction energy of the grinding media to 0.9869 J/kg, which is 25% higher compared to using only horizontal vibrations. The results confirm that simultaneous action in two directions enhances energy efficiency, improves grinding fineness, and reduces the tendency of particles to agglomerate. The proposed vibration mill design and theoretical model may be applied in the development of energy-efficient technologies for fine and ultra-fine grinding of materials of various origins.

Keywords: fine grinding, combined loading, grinding energy, material hardening, particle dispersion, vibration processes, grinding energy efficiency, particle size distribution.

ҒТАМР 55.01.81

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/18-29

Т. М. Бузауова[1], *Ш. Ғ .Бейбіт[2]

[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7219-6274
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7020-9190
*e-mail: beibutovva@mail.ru

БАЛҚЫТЫЛҒАН ІРІ МОДУЛЬДІ ТІСТІ ДОҢҒАЛАҚТАРДЫҢ ПРОФИЛІН БАҚЫЛАУ НӘТИЖЕЛЕРІН СТАТИСТИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕУ

Бұл мақалада балқытылған ірі модульді тісті доңғалақтардың профилін бақылау барысында алынған өлшеу нәтижелерін статистикалық өңдеу және негіздеу мәселелері қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты – тіс профилінің геометриялық параметрлерін бағалау кезінде алынған эксперименттік деректердің сенімділігін анықтау және өлшеу нәтижелерінің дәлдігін статистикалық әдістер арқылы растау. Бақылау барысында тіс профилінің координаталары жоғары дәлдікті координаталық өлшеу әдісімен анықталып, алынған мәліметтер математикалық модель негізінде есептелген болжамдық мәндермен салыстырылды. Зерттеу кезінде профиль траекториясы бойындағы X, Y және R координаталарының өзгеру заңдылықтары талданып, олардың өзара байланысы анықталды. Эксперименттік және есептік мәндер арасындағы айырмашылықтарды бағалау үшін қалдық ауытқулар есептеліп, олардың таралу сипаты зерттелді. Өлшеу нәтижелерінің тұрақтылығы мен сенімділігін бағалау мақсатында орташа арифметикалық мән, стандарттық ауытқу, вариация коэффициенті және сенімділік интервалы сияқты статистикалық көрсеткіштер анықталды. Сонымен қатар өлшеу нәтижелерінің қайталанғыштығы мен жаңғыртылғыштығына әсер ететін факторлар қарастырылды. Жүргізілген талдау нәтижелері профиль бойындағы координаталық параметрлердің өзгеруі белгілі бір заңдылыққа бағынатынын көрсетті. Эксперименттік және болжамдық мәндер арасындағы айырмашылықтардың аз болуы қолданылған математикалық модельдің және өлшеу әдістемесінің жеткілікті дәлдігін дәлелдейді.

Кілтті сөздер: тісті доңғалақ, ірі модуль, профиль, координаталық бақылау, статистикалық талдау, қалдық ауытқу, сенімділік интервалы.

Кіріспе

Балқытылған ірі модульді тісті доңғалақтар ауыр жүктеме түсетін механизмдерде кең қолданылады. Мұндай бөлшектердің жұмысы қарапайым айналыспен шектелмейді: тіс беті қысым, үйкеліс, соққы, температуралық әсер және циклдік жүктеме жағдайында қызмет етеді. Профильдегі аз ғана ауытқу тістесу аймағындағы күштің дұрыс таралмауына әкеледі. Нәтижесінде

шу көбейеді, тозу жылдамдайды, редуктордың дірілі артады, ал ұзақ мерзімді жұмыста тіс түбінде жарықшақ пайда болуы мүмкін. Ірі модульді доңғалақта ақаудың бағасы да жоғары: материал шығыны көп, қайта өңдеу қымбат, ал дайын механизмді тоқтату өндіріс ырғағына тікелей әсер етеді.

Балқытылған тістерді бақылау күрделі. Себебі балқыту процесінен кейін беттің геометриясы біркелкі бола бермейді, профиль сызығы идеал эвольвентадан ауытқуы мүмкін, қаттылық пен өлшемдік тұрақтылық әр аймақта әртүрлі шығады. Әдеттегі штангенқұралмен немесе шаблонмен тексеру мұндай жағдайда жеткіліксіз. Профильдің нақты координаталарын алу, оларды есептік модельмен салыстыру, әр нүктедегі қалдықты анықтау және өлшеу сенімділігін статистикалық дәлелдеу қажет.

Материалдар мен әдістері

Қазіргі өндірістік тәжірибеде ірі модульді балқытылған тістердің профилін бақылау көбінесе геометриялық сәйкестікті тексерумен шектеледі, ал өлшеу нәтижелерінің сенімділігі мен статистикалық негізділігі жеткілікті деңгейде дәлелденбейді. Координаталық өлшеу арқылы алынған X, Y, R көрсеткіштері нақты модельмен жүйелі түрде салыстырылып, қалдық ауытқулардың заңдылығы мен шашырау дәрежесі жан-жақты бағаланбайды. Нәтижесінде өлшеу нүктелерінің жеткіліктілігі, профильдің нақты траекториясының тұрақтылығы және анықталған ауытқулардың кездейсоқ немесе жүйелі сипаты жөнінде ғылыми негізделген қорытынды жасау қиындайды.

Осыған байланысты зерттеудің негізгі проблемасы – балқытылған ірі модульді тісті доңғалақтардың профилін координаталық әдіспен бақылау нәтижелерін статистикалық тұрғыда негіздеу, өлшеу деректерінің сенімділігін бағалау және профиль бойындағы ауытқулардың сипатын анықтау әдістемесін әзірлеу болып табылады.

Зерттеу мақсаты – балқытылған ірі модульді тісті доңғалақтардың профилін бақылауға арналған өлшеу нәтижелерін статистикалық өңдеу арқылы профильді бағалау әдісін әзірлеу және негіздеу.

Тісті доңғалақтарды координаталық әдіспен бақылауда өлшеу нүктелерінің саны шешуші рөл атқарады. Бүйір бет бойынша нүктелер торын дұрыс таңдаудың маңызы ашылып, аз көлемдегі бақылау торы өлшеу нәтижесінің қайталанғыштығын толық қамтамасыз етпейтіні көрсетіледі: «бүйір бетті шағын өлшеу торымен бақылау жеткіліксіз, өйткені қайталанғыштық көрсеткіштері қанағаттанарлық деңгейге жетпейді» [1]. Мұндай тұжырым ірі модульді тістер үшін өте маңызды, себебі ірі тіс бетінде жергілікті ауытқу бір-екі нүктемен көрінбей қалуы мүмкін. Демек, профильді бақылау өлшеу нүктелерінің жеткілікті жиілігіне сүйенуі керек.

Тісті доңғалақтарды сынау мен ақауды табу тек геометриямен шектелмейді. Тіс пен шестерняны механикалық қасиеттері, қаттылығы, бет сапасы, микроқұрылымы және макроқұрылымы бойынша тексеру қажеттігі көрсетілген. Авторлар бақылау жүйесінде магнитұнтақты және капиллярлық әдістер жарықшақты анықтауға қолданылатынын жазады: «магнитұнтақты және капиллярлық бақылау

технологиялары тісті доңғалақтар мен шестернялардағы жарықшақтарды табуға бағытталады» [2]. Балқытылған ірі модульді тістерде профильдің өлшемдік дәлдігі мен бет ақауын бірге қарастыру қажет. Профиль дұрыс көрінгенімен, бетте микрожарық болса, бөлшектің сенімділігі төмендейді.

Тісті доңғалақ өндірісіндегі пішін қалыптастыру мәселелері қарастырылып, эвольвента бойынша жанама енгізу стратегиясы өңдеу өтімдерінің санын қысқартатыны көрсетіледі: «екінші стратегия өңдеу өтімдерінің санын екі есеге дейін азайтуға мүмкіндік береді» [3]. Профильді бақылау тұрғысынан бұл нәтиже маңызды, өйткені өңдеу стратегиясы тікелей профиль сапасына ықпал етеді. Өңдеу траекториясы неғұрлым тұрақты болса, кейінгі өлшеуде қалдық ауытқулар да соғұрлым төмен болуы ықтимал.

Тісті доңғалақтардың күрделі қисық сызықты беттерге жататыны және геометриялық параметрлерді бақылау арнайы өлшеу құралдарын қажет ететіні дәлелденеді. Нормативтік құжаттарда кинематикалық дәлдік, жұмыс бірқалыптылығы, тістер контактісі және бүйір саңылау секілді параметрлер белгіленетіні сипатталады: «тісті доңғалақтардың негізгі геометриялық параметрлерін бақылау олардың күрделі қисық сызықты пішініне байланысты қиындайды» [4]. Бұл ой балқытылған ірі модульді профильге толық сәйкес келеді, өйткені мұнда пішін күрделілігіне балқыту қабатының тұрақсыздығы қосылады.

Өлшеу деректерін өңдеу мәселесі кеңінен қарастырылған. Онда координаталық өлшеу машинасынан алынған ақпарат нүктелер координаталары түрінде берілетіні, ал кейін арнайы алгоритмдер арқылы бақылау параметрлеріне айналатыны көрсетіледі: «өлшеу ақпараты нүктелер координаталарының жиыны ретінде беріледі, ал бағалау үшін арнайы өңдеу қажет» [5]. Профиль бақылауындағы статистикалық әдістің негізі де осында жатыр: координаталар өздігінен қорытынды бермейді, оларды модельмен, рұқсат шектерімен және қалдықтармен салыстыру қажет.

Ірі модульді тістерді бейнеөлшеу және сандық түрлендіру арқылы бақылау әдісі қарастырылады. Онда алынған кескін компьютерлік бағдарлама бойынша есептелген кескінмен салыстырылатыны көрсетіледі: «алынған кескін компьютерлік бағдарлама бойынша есептелген кескінмен салыстырылады» [6]. Бұл тәсіл профильді бақылауда баламалы бағыт ұсынады. Координаталық өлшеу жоғары дәлдік берсе, бейнеөлшеу өндірістік жағдайда жедел бақылауға қолайлы. Екі әдісті біріктіру ірі модульді доңғалақтарды кешенді тексеруге тиімді мүмкіндік береді.

Тісті доңғалақтардың сапасын бағалауда өлшеу нәтижелерінің дәлдігіне өлшеу жүйесінің қателіктері де айтарлықтай әсер етеді. Зерттеулерде координаталық өлшеу машиналарының дәлдігі қоршаған орта температурасына, датчик түріне және өлшеу стратегиясына тәуелді екені көрсетіледі. Өлшеу процесінде пайда болатын жүйелік және кездейсоқ қателіктерді ескермеу профиль параметрлерін бағалау кезінде қосымша ауытқуларға әкелуі мүмкін [7]. Сондықтан ірі модульді тісті доңғалақтарды бақылау барысында өлшеу жүйесінің метрологиялық сипаттамаларын алдын ала бағалау маңызды болып табылады.

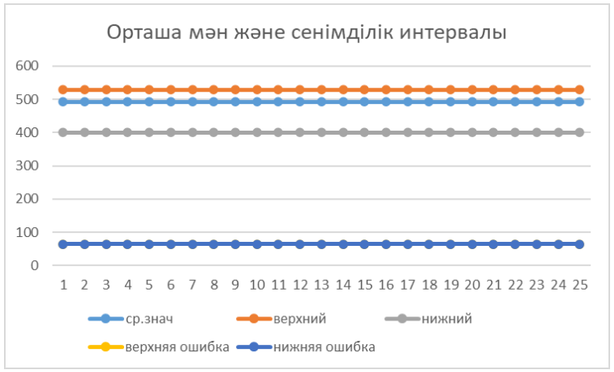
Тісті доңғалақтардың жұмыс қабілеттілігі көп жағдайда олардың жанасу аймағындағы жүктеменің таралуына байланысты. Бірқатар зерттеулерде профиль ауытқуларының жанасу кернеулерінің біркелкі таралмауына себеп болатыны және нәтижесінде бөлшектің тозу қарқындылығы артатыны көрсетілген [8]. Осыған байланысты профильдің нақты геометриясын жоғары дәлдікпен анықтау тек өлшемдік бақылау ғана емес, сонымен қатар доңғалақтың пайдалану сенімділігін бағалаудың да маңызды элементі болып табылады.

Соңғы жылдары тісті доңғалақтарды бақылауда сандық модельдеу мен компьютерлік талдау әдістері кеңінен қолданылуда. Сандық модельдер нақты өлшеу нәтижелерімен салыстырылып, профильдің теориялық және нақты пішіндері арасындағы айырмашылықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл өлшеу нәтижелерін визуализациялауды жеңілдетіп қана қоймай, ақаулардың пайда болу себептерін талдауға да жағдай жасайды [9]. Әсіресе балқытылған ірі модульді тістер үшін бұл әдіс технологиялық процестің тұрақтылығын бағалауда тиімді болып саналады.

Статистикалық әдістерді пайдалану бақылау нәтижелерінің сенімділігін арттырудың маңызды құралы болып табылады. Орташа мән, дисперсия, стандарттық ауытқу және сенімділік интервалы сияқты көрсеткіштер өлшеу нәтижелерінің шашырауын бағалауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар регрессиялық талдау мен корреляциялық бағалау әдістері профиль параметрлерінің өзгеру заңдылықтарын анықтауға көмектеседі [10]. Сондықтан тісті доңғалақтардың профилін бақылау нәтижелерін статистикалық өңдеу өндірістік шешімдерді ғылыми негізде қабылдаудың маңызды кезеңі болып табылады.

Зерттеуде профиль нүктелерін координаталық сипаттау әдісі қолданылды. Бастапқы деректер ретінде ток күші I, кернеу U, қосымша технологиялық Q параметрі, X және Y координаталары, R радиустық көрсеткіші алынды. I шамасы 350-ден 400-ге дейін, U шамасы 76-дан 66,4-ке дейін өзгерді. Q мәндері 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5 аралығында берілді. X координатасы 272,52-ден 702,32-ге дейін өсті, Y мәні 0-ден 219,54-ке дейін көтеріліп, кейін 176,92-ге дейін төмендеді. R көрсеткіші 272,52-ден 724,26-ға дейін артты.

Өлшеу нәтижелері үш бағытта өңделді. Бірінші бағытта профиль бойынша орташа мән, стандартты ауытқу, вариация коэффициенті және сенімділік интервалы есептелді. 1-суретте көрсетілгендей орташа мән 492,67, стандартты ауытқу 156,71, вариация коэффициенті 33,75 пайыз деңгейінде шықты. Сенімділік интервалының төменгі шегі 399,7, жоғарғы шегі 529,08 деп алынды. Мұндай көрсеткіштер өлшеу жиынының шашырауын бағалауға және профиль бойындағы өзгерістің кездейсоқ па, әлде жүйелі ме екенін тексеруге жағдай жасайды.



1-сурет – Тісті доңғалақ профилін бақылау нәтижелерінің орташа мәні, сенімділік шектері және қателік интервалдары

Екінші бағытта эксперименттік Y2 exp және болжамдық Y2 pred мәндері салыстырылды (2-сурет). Болжамдық модель профильдің күтілетін траекториясын сипаттайды. Эксперименттік нәтиже нақты өлшеуден алынды. Екеуінің айырмасы қалдық ретінде есептелді. Қалдық формуласы қарапайым: e = Y2 exp – Y2 pred. Қалдық шамасы нөлге жақын болған сайын модель мен нақты профильдің сәйкестігі жоғары.



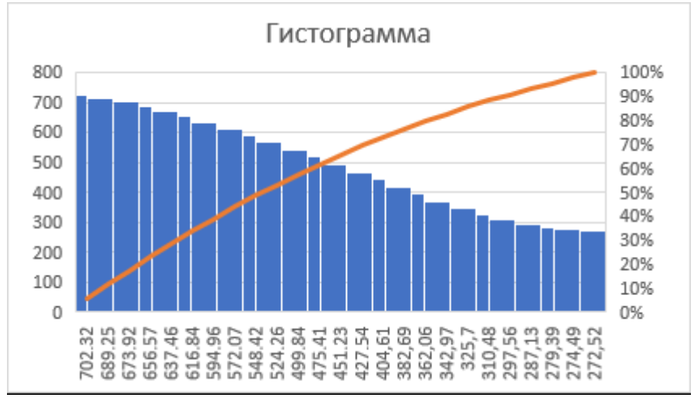
2-сурет – Тісті доңғалақ профилін бақылау нәтижелері бойынша қалдықтардың шашырау диаграммасы

Үшінші бағытта қалдықтардың таралуы бағаланды. Қалдықтар -1,39 бен 2,41 аралығында орналасқан. Ең үлкен оң қалдық 2,41, ең үлкен теріс қалдық -1,39 болды. Көп нүктеде айырма 1,6-дан аспайды. Мұндай нәтиже профиль өлшеуінде болжамдық модель нақты мәндерге жақын келетінін көрсетеді. Бақылау әдісі үшін ең маңызды белгі – қалдықтардың бір жаққа ғана ауып кетпеуі. Егер барлық қалдық оң немесе барлық қалдық теріс болса, модельде немесе өлшеу базасында жүйелі қате бар деген күдік күшейер еді. Берілген деректерде

қалдықтар таңбасын ауыстырып отырады, демек өлшеу траекториясы жалпы түрде теңгерімді.

Нәтижелер мен талқылау

3-суреттегі өлшеу кестесінде профиль бойындағы X координатасы 272,52-ден 702,32-ге дейін тұрақты өседі. Y координатасы бастапқыда 0 мәнінен көтеріліп, 219,54 деңгейінде максимумға жетеді, кейін 176,92-ге дейін төмендейді. Мұндай траектория тіс профилінің қисық сызықты сипатын көрсетеді. R мәнінің 272,52-ден 724,26-ға дейін артуы профиль радиусының біртіндеп ұлғаюын сипаттайды. Егер профильде күрт секіру немесе қисынсыз үзіліс болғанда, балқыту қабатының бір жерінде геометриялық ақау бар деп бағалауға негіз туар еді. Берілген деректерде мұндай күрт үзіліс байқалмайды.



3-сурет – Тісті доңғалақ профилін бақылау нәтижелерінің таралу гистограммасы және жинақталған жиілік қисығы

Орташа мән 492,67 профиль нүктелерінің жалпы орналасу ортасын береді. Стандартты ауытқу 156,71 болғандықтан өлшемдер кең аралыққа таралған. Бірақ ірі модульді тісті доңғалақ үшін мұндай шашырау профиль бойындағы геометриялық қозғалыстың табиғи салдары ретінде қабылданады. Вариация коэффициенті 33,75 пайыз. Егер бақылау бір ғана тұрақты өлшемді қайталап өлшеуге арналған болса, мұндай көрсеткіш тым жоғары көрінер еді. Ал профиль траекториясы әр нүктеде өзгеретін қисық сызық болғандықтан, коэффициентті ақау деп бірден бағалауға болмайды. Ол профиль бойындағы геометриялық өзгеріс ауқымын көрсетеді.

Сенімділік интервалының төменгі шегі 399,7, жоғарғы шегі 529,08. Нақты X мәндерінің бір бөлігі аталған аралықтан тыс орналасады, бірақ профильдің толық траекториясы ұзын диапазонды қамтитынын ескеру керек. Сенімділік интервалы мұнда бір нүктелік өлшеу дәлдігін емес, жалпы деректер жиынының орталық аймағын сипаттайды. Практикалық бақылауда аталған интервал

профильді бастапқы сұрыптауға пайдалы: аралық маңындағы нүктелер қалыпты аймаққа жақын, ал шеткі аймақтар қосымша тексеруді қажет етеді.

Эксперименттік және болжамдық мәндерді салыстыру нақты әдістің негізгі нәтижесін берді. Алғашқы нүктеде Y2 exp = 0, ал Y2 pred = 0,1, қалдық -0,1 болды. Екінші нүктеде қалдық -0,6, үшінші нүктеде 0,93. Орта бөлікте қалдықтар 1,04; 2,41; 0,26; 0,54 секілді шағын мәндермен сипатталды. Соңғы нүктеде Y2 exp = 176,92, Y2 pred = 177,02, қалдық -0,1. Бастапқы және соңғы аймақтарда қалдықтың нөлге өте жақын болуы профиль моделінің шеткі нүктелерде де тұрақты екенін аңғартады.

Ең үлкен оң ауытқу 2,41 шамасында, ең үлкен теріс ауытқу -1,39 шамасында шықты. Абсолюттік шама бойынша айырма 2,5-тен аспайды. Ірі модульді тістерді өндірістік бақылауда мұндай қалдықтар өлшеу әдісінің болжамдық қабілетін жақсы сипаттайды. Нақты допуск мәндері бөлшек сызбасындағы модульге, дәлдік дәрежесіне, тіс санына және жұмыс режиміне тәуелді белгіленуі керек. Бірақ салыстырмалы талдау үшін қалдықтардың кіші диапазонда қалуы әдістің жарамдылығын дәлелдейді.

Алынған нәтижелер профильді бақылау бір ғана өлшемге сүйенбеуі керектігін көрсетеді. Балқытылған ірі модульді тісте үш түрлі ақпарат қатар қаралуы тиіс: геометриялық координата, болжамдық модель және статистикалық қалдық. Координата профильдің нақты пішінін береді, модель күтілетін траекторияны сипаттайды, ал қалдық сол екеуінің айырмасын көрсетеді. Үшеуінің бірі жоқ болса, бақылау толық болмайды.

Практикалық жағдайда бақылау алгоритмін бірнеше қадаммен ұйымдастыруға болады. Алдымен тіс профилі бойынан бірдей немесе технологиялық маңызы бар аралықтарда нүктелер алынады. Әр нүктеде X және Y координаталары тіркеледі. Кейін есептік профиль бойынша болжамдық Y2 мәні шығарылады. Эксперименттік және болжамдық мәндер салыстырылып, қалдықтар кестесі жасалады. Қалдықтар белгілі бір шектен асса, тіс қайта өңдеуге немесе қосымша дефектоскопияға жіберіледі. Егер қалдықтар аз болса, бөлшек профиль бойынша жарамды деп бағаланады.

Мысал ретінде тіс профилінің орта бөлігін алуға болады. Орта аймақта жүктеме контактісі жиі шоғырланады. Егер X = 499,84 маңында эксперименттік мән 213,64, болжамдық мән 211,23 болса, қалдық 2,41 шығады. Бұл ең жоғары ауытқу. Мұндай нүкте бірден ақау деп жарияланбайды, бірақ өндірістік бақылауда белгіленіп, көрші нүктелермен бірге қаралады. Егер көрші екі-үш нүктеде де қалдық бір бағытта өссе, балқыту қабатының артық жиналуы немесе өңдеу траекториясының ығысуы туралы қорытынды жасауға болады. Ал көрші нүктелер қалыпты болса, айырма жергілікті өлшеу қатесі немесе бет кедір-бұдырынан туған ауытқу болуы ықтимал.

Профильдің соңғы аймағында қалдық -0,1 болып аяқталуы маңызды. Тістің кіріс және шығыс бөліктерінде геометриялық тұрақсыздық жиі кездеседі, өйткені құралдың кіруі мен шығуы, балқыту ваннасының таралуы, салқындау жылдамдығы бірдей болмайды. Соған қарамастан соңғы нүктедегі модель мен

эксперименттің сәйкестігі жақсы. Демек бақылау траекториясы шеткі аймақтарды да қамти алады.

Өндірістік қолдану үшін әдістің тағы бір артықшылығы – есептеудің күрделі болмауы. Орташа мән, стандартты ауытқу, вариация коэффициенті, сенімділік интервалы және қалдық ауытқу Excel секілді қарапайым бағдарламаларда есептеледі. Күрделі бағдарламалық кешен болмаған жағдайда да инженер профильді бастапқы бағалай алады. Ал координаталық өлшеу машинасы немесе оптикалық өлшеу жүйесі бар кәсіпорында аталған алгоритмді автоматтандыру оңай.

Ірі модульді тістерге арналған бақылау картасында әр өлшеу нүктесінің нөмірі, X және Y координаталары, есептік Y2 мәні, қалдық, рұқсат етілген шек және қорытынды белгі болуы қажет. Қорытынды белгі «қалыпты», «қайта тексеру», «түзету қажет» деп берілуі мүмкін. Мұндай карта операторға да, технологқа да түсінікті. Ең бастысы – шешім субъективті көзбен қарауға емес, сандық дәлелге сүйенеді.

Талқыланған тәсіл балқытылған тістердің сапасын бағалауда ақауды ерте байқауға көмектеседі. Балқыту кезінде артық металл жиналған аймақ профильдің сыртқа ығысуын береді. Жеткіліксіз балқыған жер керісінше ішке тартылған профиль ретінде көрінеді. Термоөңдеу немесе салқындау әсерінен пайда болған деформация қалдықтар графигінде бір бағыттағы жүйелі ауытқу түрінде байқалады. Ал кездейсоқ өлшеу қатесі қалдықтарда тұрақты заңдылық бермейді.

Қорытынды

Балқытылған ірі модульді тісті доңғалақтардың профилін бақылау үшін координаталық өлшеу мен статистикалық талдауды біріктірген әдіс тиімді нәтиже береді. Зерттеу деректері X, Y және R көрсеткіштерінің профиль бойымен жүйелі өзгеретінін көрсетті. Орташа мән 492,67, стандартты ауытқу 156,71, вариация коэффициенті 33,75 пайыз, сенімділік интервалы 399,7-529,08 аралығында белгіленді. Эксперименттік және болжамдық мәндерді салыстыру кезінде қалдықтар -1,39 бен 2,41 аралығында сақталды. Бұл профиль моделінің нақты өлшеумен жақсы сәйкесетінін дәлелдейді. Ұсынылған бақылау логикасы өндірісте бірнеше міндетті шешуге мүмкіндік береді: профиль ауытқуын сандық бағалау, балқыту немесе өңдеу қатесін ерте анықтау, өлшеу нәтижесін құжаттау, бөлшекті қабылдау немесе қайта өңдеу туралы негізді шешім шығару. Әдістің практикалық құндылығы оның қарапайым есептеулерге сүйенуінде және ірі модульді доңғалақтар үшін нақты өлшеу кестесімен жұмыс істеуге бейімделуінде. Болашақта аталған тәсілді координаталық өлшеу машинасы, оптикалық бейнеөлшеу және қалдықтар графигін автоматты талдау жүйесімен байланыстыру профильдік бақылаудың дәлдігін арттыра алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Васин, С. А., Маликов, А. А., Никольский, С. М.** Определение необходимого объема измерений при контроле параметров качества зубчатых

колес на координатно-измерительной машине [Текст] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 42–48. – https://doi.org/10.37313/1990-5378-2025-27-1-42-48

2 **Комаровский, Н. В., Отока, А. Г.** Особенности проведения испытаний зубчатых колес тяговых передач локомотивов и моторвагонного подвижного состава: обзор [Текст] // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 9. – С. 27–37.

3 **Кузьменко, А. А., Макашин, Д. С.** Формообразование зубчатых колес внешнего зацепления с применением универсального абразивного инструмента [Текст] // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 19–26.

4 **Никольский, С. М.** Контроль зубчатых колес с применением современных средств измерений [Текст] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 395–399.

5 **Никольский, С. М.** Методика обработки измерительной информации при контроле геометрических параметров зубчатых колес на КИМ [Текст] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 167–168.

6 **Шеров, К. Т., Таттимбек, Г., Шарипов, Д. Д., Карсакова, Н. Ж.** Рассмотрение вопросов по методам измерения параметров крупномодульных зубьев [Текст] // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – 2023. – Т. 42. – № 3. – С. 73–76.

7 **Сикульский, В., Майорова, К., Заклинский, С., Суслов, А.** Исследование метода контроля зубчатых колес с использованием координатно-измерительной машины [Текст] // Aerospace Engineering and Technology. – 2025. – № 1. – С. 50–58. – https://doi.org/10.32620/aktt.2025.1.05

8 **Гох, Г.** Метрология зубчатых передач [Текст] // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2003. – Т. 52. – № 2. – С. 659–695.

9 **Брехер, К., Лёпенхаус, К., Фей, М.** Улучшенная метрология зубчатых колес на основе калибровки и компенсации погрешностей поворотного стола [Текст] // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2019. – Т. 68. – № 1. – С. 511–514.

10 **Мукки, Э., Дальпиац, Дж., Ривола, А.** Алгоритм измерения зубчатых колес, реализованный с использованием универсального программного обеспечения [Текст] // Measurement. – 2016. – Т. 85. – С. 1–12.

REFERENCES

1 **Vasin, S. A., Malikov, A. A., Nikolskii, S. M.** Opredelenie neobxodimogo ob``ema izmerenij pri kontrole parametrov kachestva zubchaty`x koles na koordinatno-izmeritel`noj mashine [Determination of the Required Measurement Volume in Quality Control of Gear Parameters on a Coordinate Measuring Machine] [Text] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2025. – Vol. 27. – № 1. – P. 42–48. – https://doi.org/10.37313/1990-5378-2025-27-1-42-48

2 **Komarovskii, N. V., Otoka, A. G.** Osobennosti provedeniya ispy`tanij zubchaty`x koles tyagovy`x peredach lokomotivov i motorvagonnogo podvizhnogo sostava: obzor

[Features of Testing Gear Wheels of Traction Drives of Locomotives and Multiple-Unit Rolling Stock: A Review] [Text] // Transportnoe mashinostroenie. – 2024. – № 9. – P. 27–37.

3 **Kuzmenko, A. A., Makashin, D. S.** Formoobrazovanie zubchaty`x koles vneshnego zacepleniya s primeneniem universal`nogo abrazivnogo instrumenta [Forming of External Spur Gears Using a Universal Abrasive Tool] [Text] // Transportnoe mashinostroenie. – 2025. – № 7. – P. 19–26.

4 **Nikolskii, S. M.** Kontrol` zubchaty`x koles s primeneniem sovremenny`x sredstv izmerenij [Control of Gear Wheels Using Modern Measuring Instruments] [Text] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 4. – P. 395–399.

5 **Nikolskii, S. M.** Metodika obrabotki izmeritel`noj informacii pri kontrole geometricheskix parametrov zubchaty`x koles na KIM [Methodology for Processing Measurement Information in the Control of Geometric Parameters of Gears on a Coordinate Measuring Machine] [Text] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 8. – P. 167–168. – https://doi.org/10.32620/aktt.2025.1.05

6 **Sherov, K. T., Tattimbek, G., Sharipov, D. D., Karsakova, N. Zh.** Rassmotrenie voprosov po metodam izmereniya parametrov krupnomodul`ny`x zub`ev [Consideration of Methods for Measuring the Parameters of Large-Module Gear Teeth] [Text]. Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta– 2023. – T. 42. – № 3. – P. 73–76.

7 **Sikulskii, V., Maiorova, K., Zaklinskii, S., Suslov, A.** Issledovanie metoda kontrolya zubchaty`x koles s ispol`zovaniem koordinatno-izmeritel`noj mashiny` [Study of the Gear Inspection Method Using a Coordinate Measuring Machine] [Text]. Aerospace Engineering and Technology. – 2025. – № 1. – P. 50–58.

8 **Gokh, G.** Metrologiya zubchaty`x peredach [Gear Metrology] [Text] // CIRP Annals – Manufacturing Technology– 2003. – Vol. 52. – № 2. – P. 659–695.

9 **Brekher, K., Lepenkhaus, K., Fei, M.** Uluchshennaya metrologiya zubchaty`x koles na osnove kalibrovki i kompensacii pogreshnostej povorotnogo stola [Improved Gear Metrology Based on Calibration and Compensation of Rotary Table Errors] [Text] // CIRP Annals – Manufacturing Technology.– 2019. – Vol. 68. – № 1. – P. 511–514.

10 **Mukki, E., Dalpiats, Dzh., Rivola, A.** Algoritm izmereniya zubchaty`x koles, realizovanny`j s ispol`zovaniem universal`nogo programmnogo obespecheniya [Algorithm for Gear Measurement Implemented Using General-Purpose Software] [Text] // Measurement. – 2016. – Vol. 85. – P. 1–12.

30.06.26 ж. баспаға түсті.
26.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
28.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Т. М. Бузауова[1], *Ш. Ғ. Бейбіт[2]
[1,2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 30.06.26.
Поступило с исправлениями 26.07.26.
Принято в печать 28.08.26.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ НАПЛАВЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В данной статье рассматриваются вопросы статистической обработки и обоснования результатов измерений, полученных при контроле профиля наплавленных крупномодульных зубчатых колес. Основной целью исследования является определение достоверности экспериментальных данных, полученных при оценке геометрических параметров профиля зуба, а также подтверждение точности измерительных результатов с использованием статистических методов. В процессе контроля координаты профиля зуба определялись с помощью высокоточного координатно-измерительного метода, а полученные данные сравнивались с расчетными значениями, полученными на основе математической модели.

В ходе исследования анализировались закономерности изменения координат X, Y и R вдоль траектории профиля, а также устанавливались их взаимосвязи. Для оценки различий между экспериментальными и расчетными значениями были вычислены остаточные отклонения и исследован характер их распределения. С целью оценки стабильности и достоверности результатов измерений были определены такие статистические показатели, как среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициент вариации и доверительный интервал. Также рассмотрены факторы, влияющие на повторяемость и воспроизводимость результатов измерений.

Проведенный анализ показал, что изменения координатных параметров вдоль профиля подчиняются определенным закономерностям. Небольшие различия между экспериментальными и расчетными значениями подтверждают достаточную точность используемой математической модели и методики измерений.

Ключевые слова: зубчатое колесо, большой модуль, профиль, координатный контроль, статистический анализ, остаточное отклонение, доверительный интервал.

T. M. Buzauova[1], *Sh. G. Beibit[2]
[1,2]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 30.06.26.
Received in revised form 26.07.26.
Accepted for publication 28.08.26.

STATISTICAL VALIDATION OF PROFILE INSPECTION RESULTS FOR WELD-CLADDED LARGE-MODULE GEARS

This article addresses the issues of statistical processing and justification of measurement results obtained during the profile inspection of weld-cladded large-module gears. The main objective of the study is to determine the reliability of experimental data obtained in the evaluation of gear tooth profile geometric parameters and to validate the accuracy of measurement results using statistical methods. During the inspection process, the tooth profile coordinates were determined using a high-precision coordinate measuring method, and the obtained data were compared with calculated values derived from a mathematical model.

The study analyzed the variation patterns of X, Y, and R coordinates along the profile trajectory and identified their interrelationships. To assess the differences between experimental and calculated values, residual deviations were computed and their distribution characteristics were investigated. To evaluate the stability and reliability of the measurement results, statistical indicators such as the arithmetic mean, standard deviation, coefficient of variation, and confidence interval were determined. Factors affecting the repeatability and reproducibility of the measurement results were also considered.

The conducted analysis showed that the variation of coordinate parameters along the profile follows certain regular patterns. The small differences between experimental and calculated values confirm the sufficient accuracy of the applied mathematical model and measurement methodology.

Keywords: gear wheel, large module, profile, coordinate inspection, statistical analysis, residual deviation, confidence interval.

ҒТАМР 55.33.35

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/30-53

***А. З. Букаева[1], В. В. Поветкин[2]**

[1]Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті, Қазақстан Республикасы, Ақтау қ.;

[2]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3872-3488

*e-mail: amina_bukaeva@mail.ru

БЛОКТЫ ТАСТАРДЫ ӨНДІРУ ЖӘНЕ ӨҢДЕУ КЕЗІНДЕ БЕНЗИН-АУА ТЕРМОҚҰРАЛДАРЫН ҚОЛДАНУ

Бұл мақалада тау жыныстарын термиялық бұзудың қазіргі заманғы технологиялары, атап айтқанда – гранит блоктарын өндіру кезінде қолданылатын от ағынды әдістері қаралды. Құрылыс секторының белсенді дамуы және сапалы табиғи тасқа сұраныстың артуы жағдайында, массивті бұзатын және көп мөлшерде қалдық тудыратын дәстүрлі жарылыс-бұрғылау әдістеріне балама іздеу өзекті мәселе болып отыр. Перспективалы тәсіл ретінде, жынысты дәлдікпен және минималды құрылымдық зақыммен бұзуға мүмкіндік беретін, бензин-ауалы және керосин-оттекті жанарғы негізіндегі термоқұралдарды қолдану қарастырылады.

Мақалада әртүрлі термоқұралдардың техникалық сипаттамалары, олардың жұмыс істеу механизмдері, жанғыш қоспаларды дайындау және беру принциптері, сондай-ақ жынысты термиялық бұзу процесінің ерекшеліктері жан-жақты сипатталған. Ерекше назар жанудың қарқындылығын арттыруға және термодинамикалық тиімділікті жоғарылатуға бағытталған жанарғылардың құрылымдық жетілдірілуіне бөлінеді. Эжекциялық саптамаларды қолдану, жанармайды алдын ала қыздыру, сондай-ақ газ ағынының қуатын арттыру үшін детонациялық жану режимін енгізу секілді инновациялық тәсілдер сипатталады.

Жүргізілген салыстырмалы сынақтар жетілдірілген жанарғылардың кесу өнімділігін 0,80-ден 1,20 м²/сағ-қа дейін (1,5 есе) арттыратынын, ал отынның үлестік шығынын 15,0-ден 12,0 л/м²-ге дейін (20 %) азайтатынын көрсетті; саңылау бетінің кедір-бұдырлығы Rz 12–15 мм-ден 6–8 мм-ге дейін төмендеп, кондициялық блоктардың шығымы 88–92 %-ға жетеді. Сонымен қатар әдістің шектеулері – жыныстың ылғалдылығының, минералдық құрамының және жұмыс қауіпсіздігі талаптарының әсері талқыланады. Бұл жұмыс тау-кен өндіру саласының мамандары үшін практикалық маңызға ие және Қазақстандағы тас өңдеу кәсіпорындарында технологияларды жаңғырту кезінде қолдануға болады.

Кілтті сөздер: термоқұрал, тау жынысы, отын компоненттері, детонациялық жану, гранит.

Кіріспе

Гранит – құрылыс, сәулет және өнеркәсіп салаларында кеңінен қолданылатын ең берік, ұзаққа төзімді және эстетикалық тартымды табиғи материалдардың бірі болып табылады. Оның қысуға жоғары беріктігі, тозуға, атмосфералық және химиялық әсерлерге төзімділігі сияқты бірегей физика-механикалық қасиеттері мен сәндік құндылығы ғимараттар мен құрылыстарды қаптауда, сондай-ақ машина жасауда таптырмас материал етеді. Машина жасауда гранит іргетас плиталары, станиналар және басқа да жоғары дәлдікті тірек элементтерін жасау үшін негізгі материал ретінде қолданылады [1; 2].

Құрылыс секторы мен инфрақұрылымдық жобалардың қарқынды дамуы жағдайында сапалы блок тастарына деген сұраныс үздіксіз артып келеді. Қазақстан Республикасы, әсіресе Шығыс, Орталық және Оңтүстік өңірлерінде орналасқан мол гранит кен орындары арқылы бұл стратегиялық маңызды ресурсты өндіру мен экспорт көлемін ұлғайтуға толық мүмкіндікке ие [3, 81-б].

Бұл жұмыстың өзектілігі Қазақстанда табиғи тасты өндіру тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздігін арттыру қажеттілігімен, сондай-ақ термиялық бұзу жабдықтарын техникалық жетілдірумен байланысты. Ерекше назар жабдықтың өнімділігін, іске қосу сенімділігін және кесудің термодинамикалық тиімділігін арттыруға бағытталған инновациялық әзірлемелерге аударылады [4; 5].

Осылайша, бұл зерттеудің мақсаты – блоктық гранит өндіру жағдайында термиялық кесу технологиясын қолданудың негіздемесін келтіру және талдау, оның артықшылықтары мен шектеулерін анықтау, сондай-ақ технологиялық оңтайландыру жолдарын көрсету. Мұның бәрі Қазақстанның заманауи тас өндіру саласының дамуына ықпал етеді.

Материалдар мен әдістері

Кен орындарын тиімді игеру көбінесе қолданылатын өндіру әдістерінің технологиялық деңгейіне байланысты. Ондаған жылдар бойы гранитті өндірудің негізгі әдісі жарылыс-бұрғылау тәсілі болып келді. Бұл әдісте аммонит сияқты күшті жарылғыш заттарды қолданып, кесу және тілу траншеялары жасалады. Энергиямен қамтамасыз етілуі жоғары болғанымен, бұл әдістің бірқатар елеулі кемшіліктері бар. Ең бастысы – жарылыс нәтижесінде жыныс массивінде көптеген жарықтардың пайда болуы. Бұл оның беріктік сипаттамаларының төмендеуіне, блоктылықтың жоғалуына және соның салдарынан үлкен көлемде қалдықтардың түзілуіне әкеледі. Кей жағдайларда, өндірілген тастың 30–50 %-ы одан әрі өңдеуге жарамсыз болып қалады. Бұл кен орындарын игерудің тиімділігін төмендетіп, экологиялық жүктемені арттырады [6, 750-б].

Қазіргі тау-кен өнеркәсібі талаптарына және шикізат шығындарын азайту қажеттілігіне жауап ретінде Қазақстандағы жетекші тас өндіруші кәсіпорындарда тасты өндірудің баламалы, жыныстың азырақ бұлдіретін әдістерін енгізуге бағытталған технологияларды жаңғырту жұмыстары басталды. Осындай келешегі зор әдістердің бірі – жыныстың бұзу үшін жоғары температуралы газ ағындарын пайдаланатын отты-ағынды термоқұралдарға негізделген термиялық кесу. Бұл

технологиялар жынысқа дәлірек әрі бағытталған әсер етуге мүмкіндік береді, массив құрылымының зақымдануын азайтып, блоктардың тұтастығын сақтайды.

Термиялық әдістер, атап айтқанда бензовоздушты және оттекті-керосинді жанарғыларды пайдалану, қатты тау жыныстарын жоғары дәлдікпен және құрылымға барынша аз әсер етіп өңдеуде жаңа мүмкіндіктер ашады. Дәстүрлі әдістермен салыстырғанда, термоқұралдар кондициялық шикізаттың шығуын едәуір арттыруға және өндірістік шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, термиялық бұзу технологиялары тығыздығы жоғары және құрылымы біркелкі емес, игерілуі қиын массивтер жағдайында ерекше өзектілікке ие.

Тау-кен жыныстарын өндірудің өрт сөндіру тәсілі дәстүрлі бұрғылау-жару технологияларына перспективалы балама ретінде қарастырылады. Оны блокты гранит өндіру кезінде қолдану массивтің зақымдануын азайту және кесу дәлдігін арттыру арқылы процестің тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Атап айтқанда, өрт сөндіру жанарғыларын пайдалану термиялық өңдеудің жоғары жылдамдығын қамтамасыз етеді. Осылайша, оттегі-керосин терморезактарын қолдану кезінде өнімділік 1,30 м²/сағ жетеді, ал бензинді ауа құрылғылары 0,80 м²/сағ дейін қамтамасыз етеді [19, 25-б.].

Өндіру процесі гранит қабатының толық жату тереңдігіне (кемер табанына дейін) екі тік саңылаумен кесу және кесу орларын кесуді қамтиды. Терморезактар тереңдігі 5 метрге дейін және ені 0,15–0,20 метрге дейінгі саңылауларды қалыптастыруға қабілетті. Саңылаулар арасында пайда болатын блоктар оқ-дәрі зарядтарының бағытталған жарылысының көмегімен алынады, содан кейін бөлшектеуге және одан әрі өңдеуге түседі.

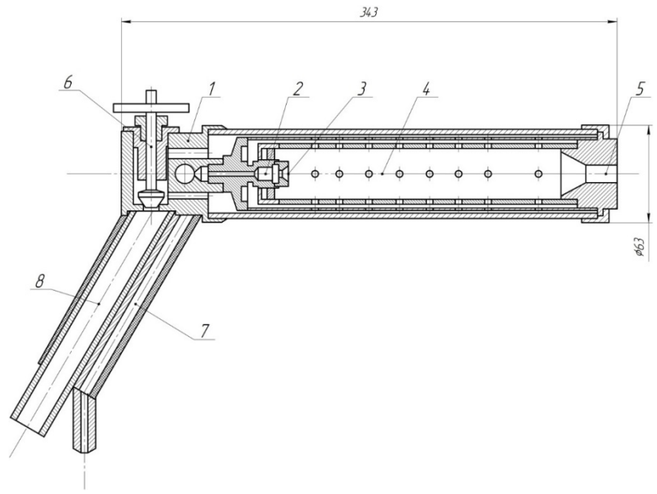
Қазақстанның жетекші тас өңдеу кәсіпорындарында термиялық кесу технологиясын енгізу тәжірибесі оның жоғары тиімділігін растады: кен орындарының көпшілігі ауа-газ ағыстарының әсерінен жақсы бұзылады. Мұндай жағдайларда кесудің орташа өнімділігі шамамен 0,65 м²/сағ.

Өнеркәсіптік практикада көмірсутегі отынын оттегі немесе ауа ортасында жағуды пайдаланатын термоқұралдардың екі негізгі түрі – оттегі-керосин және бензин-ауа термоқұралдары кеңінен таралған. Оттегі-керосин термоқұралы мынадай жұмыс сипаттамаларын көрсетеді: кесу өнімділігі 1,00–2,00 м²/сағ (қалыңдығы 0,05–0,06 м қабатты алу кезінде); шпурларды термиялық бұрғылаудың сызықтық жылдамдығы жыныстың қаттылығы мен теспенің диаметріне (0,028–0,040 м) байланысты 12–30 м/сағ; оттегінің көлемдік шығыны 15–18 м³/сағ; керосиннің көлемдік шығыны 8–9 л/сағ; салқындатқыш судың шығыны 160–200 л/сағ; жұмыс қысымы: оттегі мен керосин бойынша 0,12–0,15 МПа, су бойынша 0,3–0,5 МПа.

Бензин-ауалы термоқұралдары құрылымы мен қызмет көрсетуінің қарапайымдылығымен ерекшеленеді. Оттегі-керосин жүйелерінен айырмашылығы, олардың жұмысы үшін тотықтырғыш пен салқындатқыш суды берудің күрделі жүйелері талап етілмейді. Олардың құрамына тек ауа компрессоры, отын сыйымдылығы және термоқұрал кіреді. Мұндай жабдықтың мысалдарының бірі

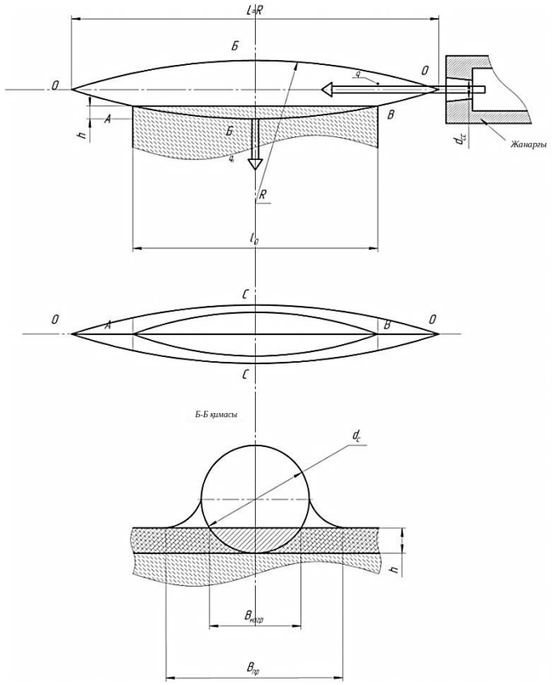
гранит дайындамаларды үстірт өңдеу үшін кеңінен қолданылатын ТРВ-12М қол термоқұралы (1-сурет) болып табылады.

Мақалада келтірілген барлық сандық көрсеткіштер бірыңғай жүйеге келтірілген: кесу өнімділігі Q – бір сағатта қалыптасатын саңылаудың ауданы, м²/сағ; термиялық бұрғылаудың сызықтық жылдамдығы v – м/сағ (бұл өнімділіктен ажыратылатын дербес шама); газ тәрізді компоненттердің (ауа, оттегі) көлемдік шығыны – қалыпты жағдайға (0,1013 МПа, 293 К) келтірілген м³/сағ; сұйық компоненттердің (бензин, керосин, соляр майы, су) көлемдік шығыны – л/сағ; отынның үлестік шығыны b = B/Q – л/м²; жылу ағынының тығыздығы – Вт/м²; температура – °С.



1-сурет – Термоқұрал ТРВ-12М
1 – тарату басы, 2 – бүріккіш, 3 – бүріккіш, 4 – жану камерасы,
5 – шүмек, 6 – ауа вентилі, 7 – жанармай магистралі, 8 – ауа магистралі

2-суретте саңылаулы қазбаларды үстірт өңдеу және кесу кезінде тау жынысымен термоқұралдың жоғары температуралы және жоғары жылдамдықты ағыстарының өзара іс-қимылының негізгі схемалары берілген. Бір қатар авторлар [8; 9; 10] жылу мәселесін шешті, онда газ ағынының негізгі параметрлері мен бұзылатын жыныстың өнімділігі табылды.



2-сурет – Параллель газ ағынының тау жынысымен өзара қатынасы

2-суретте көрсетілген схемаға сәйкес тау жынысының бұзылуы өңделетін массивтің бетіне қатысты жоғары температуралы газ ағынының параллель ағуы есебінен жүзеге асырылады. Газ ағысы жыныс бойымен ішінара тереңдеумен бағытталады, бұл ретте әсер берілген контур бойынша материалдың біркелкі жылынуы мен бұзылуын қамтамасыз ете отырып, ағыстың барлық еніне таралуы мүмкін.

Термиялық бұзылу процесін бақылауды қауіпсіздіктің барлық талаптарын сақтай отырып жұмыс істейтін және қорғаныш құралдарын пайдаланатын оператор көзбен шолып жүзеге асырады. Мұндай тәсіл кесу тереңдігі мен бағытын икемді басқаруға мүмкіндік береді, бұл құрылымы мен тығыздығы әртүрлі жыныстарды өңдеу кезінде ерекше маңызды [7, 920-б.].

Бұл ретте керосин-оттегі термоқұралдары анағұрлым жоғары жылу ағындарын көрсетеді – $10 \cdot 10^6$ Вт/м² дейін, бұл жылу әсерінің қарқындылығы 1,5–4,0 $\cdot 10^6$ Вт/м² құрайтын бензинді ауа аналогтарының көрсеткіштерінен 2–3 есе артық. Тиісінше, тау жыныстарды бұзу бойынша керосин-оттегі жүйелерінің өнімділігі де жоғары.

Блокты тасты өндірудің қаралып отырған технологиясы шеңберінде термиялық әсер етудің іске асырылатын схемасының негізгі нұсқасы ретінде қыздырғыш жалыны массивтің үстіңгі беті бойымен бағытталатын, ағынның

жыныспен байланысының барлық ұзындығы бойынша материалдың біркелкі және тиімді бұзылуын қамтамасыз ететін жылу көзін пайдалану ұсынылады.

Эксперимент әдістемесі және сынақ жағдайлары.

Тәжірибелік зерттеулер ЖШС «Титушин» өндірістік мекемесінде орындалды. Сынақ материалы – орта түйірлі биотитті гранит; оның негізгі физика-механикалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген. Үлгілердің қасиеттері анықталды: тығыздығы – гидростатикалық өлшеу әдісімен, бір осьті қысуға беріктік шегі – цилиндрлік үлгілерде (d = 42 мм, h/d = 2), кеуектілігі мен ылғалдылығы – 105 °С-та кептіру әдісімен, минералдық құрамы мен түйір өлшемі – жұқа шлифтерді петрографиялық талдау арқылы.

1-кесте – Сынақта пайдаланылған гранит массивінің сипаттамалары

Көрсеткіш	Мәні
Тығыздығы, кг/м³	2620–2680
Бір осьті қысуға беріктік шегі, МПа	155–180
Созылуға беріктік шегі, МПа	9–12
Ашық кеуектілігі, %	0,6–1,2
Табиғи ылғалдылығы, %	0,15–0,35
Кварц мөлшері, %	28–34
Дала шпаттары, %	48–56
Биотит және басқа түсті минералдар, %	10–18
Орташа түйір өлшемі, мм	1,5–3,0
Жылу өткізгіштігі, Вт/(м·К)	2,6–3,1
Сызықтық ұлғаю коэффициенті, 10^{-6} $К^{-1}$	7,5–9,0

Салыстырмалы сынаққа төрт конструкция қатысты: 1) сериялық бензин-ауа термоқұралы ТРВ-12М (базалық нұсқа, 1-сурет); 2) газодинамикалық эжекциялық саптамасы бар БВР-80 (3-сурет); 3) тотықтырғышты екі ағынға бөлетін және отынды сопло бетінде алдын ала қыздыратын жанарғы (4- және 5-суреттер); 4) цилиндрлік перфорацияланған саптамасы бар термодетонациялық құрылғы (7-сурет). Барлық нұсқалар бірдей ауа компрессорынан (өнімділігі 4,0 м³/мин, қысымы 0,6 МПа) және бірдей отын беру жүйесінен қоректендірілді, бұл салыстыру шарттарының теңдігін қамтамасыз етті.

Сынақтар ауа температурасы +12…+26 °С, салыстырмалы ылғалдылығы 35–60 % және жел жылдамдығы 3 м/с-тан аспайтын жағдайда жүргізілді. Әрбір тәжірибеде кесілетін саңылаудың ұзындығы 2,0 м, жобалық тереңдігі 1,0 м, ені 0,15–0,20 м құрады. Жанарғы шұмегінен өңделетін бетке дейінгі қашықтық 40–60 мм, шұмек осінің бетке көлбеулік бұрышы 15–20°, ал жанарғының жылжу жылдамдығы беріліс механизмімен тұрақтандырылды. Әрбір конструкция үшін тәжірибе бес рет қайталанды (n = 5); нәтижелер орташа мән ± стандартты ауытқу түрінде берілген, айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығы Стьюдент критерийі бойынша $p < 0,05$ деңгейінде бағаланды.

Өлшенген шамалар және оларды анықтау әдістері:

– кесу өнімділігі Q, м²/сағ – таза машиналық уақытқа қалыптасқан саңылау ауданының қатынасы ретінде (уақыт секундомермен, саңылау өлшемдері лазерлік қашықтық өлшегішпен және шаблонмен анықталды);

– отынның сағаттық шығыны B, л/сағ – бак деңгейінің өзгеруі бойынша (дәлдігі ±0,1 л) және бақылау ретінде электрондық таразымен (±10 г);

– отынның үлестік шығыны b = B/Q, л/м²;

– ауаның көлемдік шығыны, м³/сағ – магистральдағы ротаметр бойынша, қалыпты жағдайға келтіріліп;

– газ ағынының температурасы, °С – вольфрам-рений термопарасымен (ВР 5/20) және пирометрмен (өлшеу диапазоны 300–2000 °С, қателігі ±1,5 %);

– саңылау бетінің кедір-бұдырлығы Rz, мм – базалық ұзындығы 100 мм учаскеде профиль шаблоны және контурограмма бойынша;

– саңылау қабырғасының жазықтықтан ауытқуы, мм – 2 м-лік рейка мен сына тәрізді щуп арқылы;

– термиялық зақымданған (микрожарықшақты) қабаттың тереңдігі, мм – қабырғадан кесіп алынған үлгілердің жұқа шлифтерін оптикалық микроскопиялау және бойлық толқын жылдамдығын (Vp) ультрадыбыстық өлшеу арқылы;

– кондициялық блоктардың шығымы, % – талаптарға сай блоктар көлемінің өндірілген жыныстың жалпы көлеміне қатынасы ретінде.

Осындай өлшеу схемасы конструкциялық жетілдірулердің әсерін жыныстың қасиеттері мен режимдік факторлардың ықпалынан бөліп бағалауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау

Тау жыныстарының от ағысымен бұзылу өнімділігі жыныстармен жанасу аймағына түсетін ағынның жылу қуатына тура пропорционалды екені анықталды. Өз кезегінде, жылу қуаты газ ағынының негізгі параметрлерімен - оның температурасымен, жылдамдығымен және әсер ету дағының геометриялық өлшемдерімен анықталады. Бұл сипаттамалар жану камерасына түсетін және уақыт бірлігінде әрекет ететін отын мен тотықтырғыш мөлшеріне тікелей байланысты болады. Осылайша, отын қоспасын беру және жану параметрлері термоқұрал жұмысының тиімділігін айқындайтын негізгі режимдік факторлар болып табылады.

Осы факторлардың термиялық бұзылу өнімділігіне әсерін зерттеу, әсіресе тығыздығы мен беріктігі бойынша әртүрлі жыныстармен жұмыс істеу жағдайларында, нысаналы мақсаттағы оттықтарды жобалау және оңтайландыру кезінде қажет.

Жанарғы жұмысының тиімділігін анықтайтын маңызды факторлардың бірі жану камерасында қоспа түзу процесі болып табылады. Отын компоненттерін араластыру сапасы жанудың толықтығы мен тұрақтылығына шешуші әсер етеді. Бұл процесс отын беруді қамтамасыз ететін форсункалардың конструкциясы мен параметрлеріне, сондай-ақ оларды тозаңдату сипаттамаларына байланысты болады. Шашыратуды сипаттайтын негізгі көрсеткіштер дисперстік дәрежесі

(тамшылардың жұқа болуы), олардың біркелкілігі (қоспалардың біртектілігі) және шашырату бұрышы болып табылады. Бұл параметрлер көбінесе форсунканың конструкциялық ерекшеліктерімен және оның шығуындағы қысым айырымының шамасымен анықталады. Ерітіндінің біртектілігі мен жұқа болуы неғұрлым жоғары болса, жану соғұрлым тиімді болады және тиісінше термоқұралдың жалпы өнімділігі соғұрлым жоғары болады.

Жанарғылардың барлық конструкцияларында ол арқылы берілетін жанармайды жасанды бұрауы бар бүріккіштердің орталықтан тепкіш түрі пайдаланылады. Орталықтан тепкіш тозаңдату кезінде алыстығы үлкен емес, камерадағы тозаңдату аймағының өлшемдерін, демек жану камерасының өлшемдерін де анықтайды.

Жану камерасы термоқұралдың негізгі органы болып табылады. Жану камерасын есептеу үшін оның көлемі мен геометриялық өлшемдерін анықтау қажет. $V_К$ жану камерасының көлемі ретінде камераның көлемі шекті қимаға дейін саналады. Қажетті көлемді анықтау үшін $V_К$ келесі параметрлердің бірін пайдаланады:

1 Жану өнімдерінің камерада болуының шартты уақыты $\tau_ш$:

$$\tau_{усл.} = \frac{V_k}{G \cdot v_k}, \text{ с}, \qquad (1)$$

мұндағы $V_к$ – жану камерасының көлемі, м³;

G – отын шығыны, г/с;

$v_к$ – отын мен жану өнімдерінің орташа меншікті көлемі, м³/кг.

2 Жану камерасының келтірілген ұзындығы

$$l_{пр} = \frac{v_k}{f_{кр}}, м, \qquad (2)$$

мұндағы $f_{кр}$ – камераның шекті қимасындағы сопло ауданы

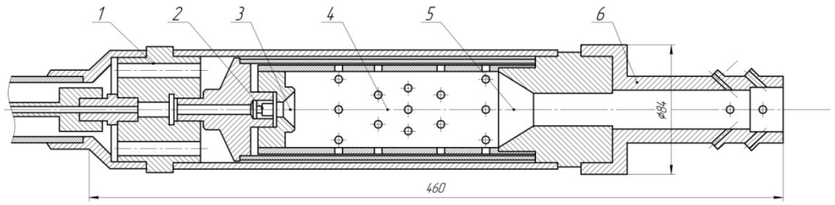
$$f_{кр} = \frac{G \cdot \beta}{P_z}, м^2, \qquad (3)$$

мұндағы β – камерадағы қысымның үлестік импульсі, м/с;

P – жану камерасының ішіндегі газдардың қысымы, Па.

Жану камераларын жобалау кезінде $f_к/f_{кр}$ = 6... 20 арақатынасын пайдаланады.

Саңылаулы қазбаларды кесу үшін қолданылатын ТРВ-60 термиялық кескішінің жетілдірілген нұсқасы 3-суретте ұсынылған термоқұрал БВР-80 конструкциясы болып табылады. Бұл құралдың ерекше ерекшелігі атмосфералық ауаны соққы толқындарына эжектілеуге арналған 2 арнайы термодинамикалық саптаманың болуы - тығыздаудың «секіруі» және оларда жанбаған жанармайды шүмектің шекті қимасынан тыс жанарғы алауының байытылған ағысында жағу болып табылады.



3-сурет – Термоқұрал БВР80
1 – тарату басы, 2 – бүріккіш, 3 – бүріккіш, 4 – жану камерасы,
5 – сопло, 6 – газды динамикалық саптама

Тығыздаудың «секірулері» саңылаулардың сақиналы бұрғылауынан пайда болған саптаманың ішкі бетінің бедерінен пайда болады, олар арқылы эжектелетін ауа жанарғының негізгі ағысына сорылады. Бұл конструкцияда жану камерасы мен шүмегі бар негізгі терморезак перфорация саласында эжекциялық саптамада соққы импульсін жасау үшін негізгі құрал болып табылады.

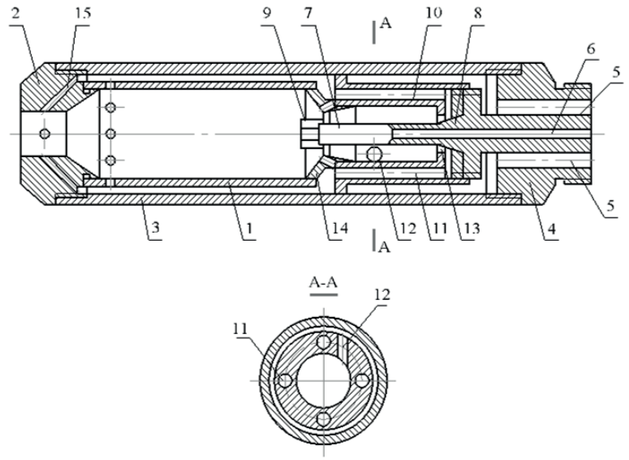
Отынның ауыр түрлерінде (соляр майы) жұмыс істейтін механикаландырылған өңдеуге арналған терморезактарға қойылатын негізгі талап - бұл термодинамикалық параметрлерді – габариттік өлшемдерді сақтай отырып, газ ағынының температурасы мен жылдамдығын едәуір арттыру.

Механикаландырылған термоагрегаттардың жұмыс органдары ретінде жанарғыларды пайдалану салыстырмалы төмен қуатпен, оның ұлғаюы кезінде олардың габариттік өлшемдері тез өсетін, сондай-ақ жанарғының барлық ұзындығы бойынша – «жолақты көз» – жанарғыны алаумен өңдеу схемасын пайдалану кезінде жанарғының шағын өлшемдерімен (0,1...0,15 м) тежеледі. Өңдеудің осы схемасы бойынша жанарғының газ ағысы өңделетін бетке параллель бағытталған және жанарғы шүмегінің 0,3...0,5 диаметріне жыныстың ішіне тереңдетілген.

Алайда, жұмыстың қарапайымдылығына және жанармай-ауа оттықтарының отын компоненттерімен қоректендіруді ұйымдастыруға байланысты оларды механикаландырылған қондырғылардың жұмыс органдары ретінде пайдалану өзекті болып табылады. Жанар-жағармай жанарғыларының қуатын олардың габариттік өлшемдерін айтарлықтай дамытпай және жанар-жағармай алауының өлшемдерін ұлғайтпай, жану процестерін қарқындату есебінен арттыруға болады [18].

Сопло кесіндісінен тыс бос ағыстардың жануын қарқындату құралдарының бірі отынмен байытылған қоспаның толық емес жану өнімдерін атмосфералық ауаны эжектілеу болып табылады. Жанарғыларда ауыр отын қоспаларын пайдалану кезінде жанарғыларды жағу тәсілін жетілдіру қажет.

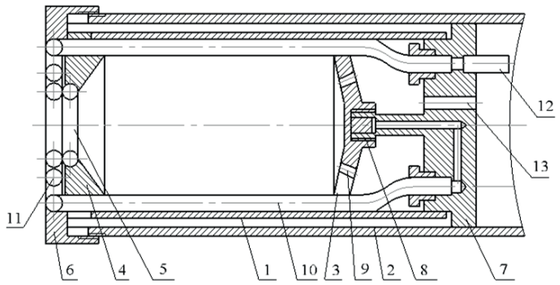
Келесі кезең, еркін ағындардың жану қарқындылығын зерттеу өнертабыс авторларының қатысуымен әзірленген жанарғының көмегімен жүргізілді (4-сурет).



4-сурет – Тау жыныстарын бұзуға арналған құрылғы
1 – жану камерасы; 2 – сопло; 3 - қаптама; 4 – тарату басы;
5, 6 – тотықтырғыш және жанармай арналары; 7 – қуыс шток;
8 – конус; 9 – бүріккіш; 10 – орындаушы;
11 – стақан; 12, 13 – тангенциалды және орталық тесік;
14 – ауыстырғыш; 15 – арналар

Құрылғы тау жыныстарын бұзуға арналған. Онда екі әсер іске асырылады: тотықтырғышты - ауаны екі ағынға бөлу - ыстық ауа жану камерасына өтеді және жану процесіне қатысады; басқа ағын суық - жану камерасын салқындатуға кетеді және перфорация арқылы жануға қатыса отырып, камераға, сондай-ақ шүмектегі каналдар арқылы шүмектің шекті бөлігіне түседі. Соплоның шекті бөлігіне тотықтырғыштың берілуінің бұл ерекшелігі газ ағынында шашыраңқы - соққы толқындарын тудырып, сол арқылы отын қоспасын жағу процесін қарқындатады.

Жанармайды газ тәріздес күйге дейін қыздыру және оны жану камерасына беру есебінен ағынның термодинамикалық параметрлерін арттыратын от ағынды жанарғының басқа конструкциясы өнертабыс бойынша орындалған жанарғының конструкциясы (5-сурет) болып табылады.

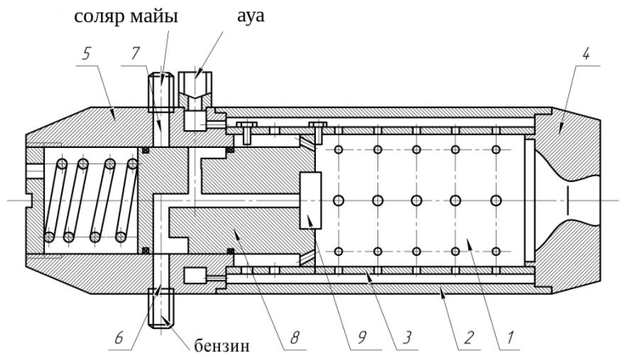


5-сурет – Тау жыныстарын бұзуға арналған құрылғы
1 – жану камерасы; 2 – корпус; 3 – тарату басы; 4 – сопло; 5 – сопло беті;
6 – гайка шеті; 7 – көлденең аралық; 8 – бүріккіш;
9 – тотықтырғыш арналары; 10 – жанармай магистралі;
11 – спиральді түтік; 12, 13 – отын беру құбырлары

Жанарғының бұл құрылымы булану температурасына дейін алдын ала қыздырылған газ тәріздес жанармайдың жануын ұйымдастыру есебінен жанарғы ағынының жылу және механикалық параметрлерін арттыруға мүмкіндік берді. Жанарғыны сынау осындай жану процесін ұйымдастыру мүмкіндігін көрсетті. Жанарғыны газ тәрізді отын қоспаларында (пропан + оттегі (ауа)) алдын ала сынау оларды өндірудің қажетті көздері болған кезде пайдаланудың орындылығын көрсетеді. Ауыр отын компоненттерінде жұмыс істейтін термоқұралдарды жасаудың маңызды элементі оларды іске қосу болып табылады. Оларды тұрақты іске қосу жану камерасына отын компоненттерін берудің құрамдастырылған жүйесі болған жағдайда ғана мүмкін болады. Алдымен тез тұтанатын қоспа беріледі және оны өртеу жүргізіледі, содан кейін тез тұтанатын жанармай (бензин) арналары жабылады және ауыр жанармай арналары ашылады.

Өнертабыстың мақсаты жанармайды алдын ала жылытуға жұмсалатын энергетикалық шығындар аз болған кезде жанарғыны іске қосудың сенімділігін арттыру болып табылады. Бұған жанармай магистралінің спираль бойынша ширатылған бөлігі сопло қақпағының сыртқы жағына және сопло бетіне жанасуы нәтижесінде қол жеткізіледі.

Жанармайды бастапқы түрден негізгі түрге автоматты ауыстырып қосу құрылғысы 6-суретте бейнеленген құрылғы болып табылады.



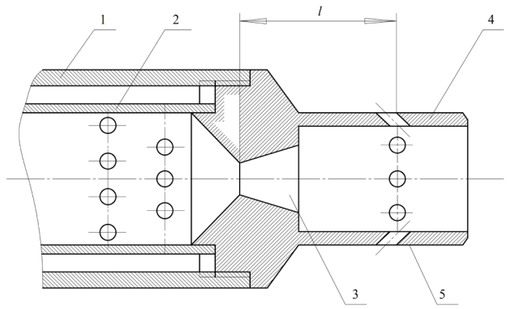
6-сурет – Тау жыныстарын өрт ағысымен бұзуға арналған құрылғы
1 – жану камерасы; 2 – сыртқы қаптама; 3 – сақиналы қуыс;
4 – сопло; 5 – тарату басы; 6, 7 – бензин мен соляр майын беру арналары;
8 – жылжымалы поршень; 9 – бүріккіш

Термоқұралдардың әзірленген конструкциялары бірқатар технологиялық міндеттерді шешті - тау жыныстарының бұзылу өнімділігін арттырды, жанарғыларды іске қосуды автоматтандырды, бұл механикалық термоагрегаттардың жұмыс органдарын әзірлеу үшін айтарлықтай маңызды.

Жануды қарқындату бойынша жүргізілетін зерттеулер тау жыныстарын термиялық қирату үшін детонациялық жану құбылысын қолданудың перспективалылығын көрсетеді.

Детонациялық жануды сапалық бағалау сопло кесігінен белгілі бір қашықтықта саптаманың перфорациясы арқылы ауаны енгізе отырып, жану ағысының бір бөлігіне цилиндрлік саптама түрінде жану қарқындатқышы бар жанармайда жүргізілді.

Құрылғыда (7-сурет) детонациялық әсерге жанғыш компоненттермен байытылған дыбыстан жоғары негізгі учаскенің басында жанарғының газ ағысының тығыздаудың (соққы толқынының) тұрақты секірісін қоздыру есебінен қол жеткізіледі. Бұған жұмыс денесінің саптаманың ішкі бетінің бедеріне үйкелуі және суық эжектіленетін ауамен жанасу және оған саптаманың, тотықтырғыштың перфорациялық арналары арқылы жанғыш ағыспен байытылған жетіспейтін эжектіленушіні қарқынды (детонациялық) жану мақсатында енгізу есебінен қол жеткізіледі [20, 3-б.].



7-сурет – Термодетонациялық бұзуға арналған құрылғы
1 – жанарғы; 2 – жану камерасы; 3 – шүмек;
4 – саптама; 5 – перфорация арналары

Лаваль соплосынан жанарғының цилиндрлік перфорирленген қоздыру камерасына (саптамаға) ағатын дыбыстан жоғары ағында оның бедерлі қабырғаларына үйкелу және суық сорылатын атмосфералық ауамен жанасу есебінен тығыздаудың күшті тұрақты секірісі (соққы толқыны) пайда болады. Бұл толқын атмосфералық ауадан перфорация арқылы эжектелетін тотықтырғышпен үнемі қоректенеді, бұл қарқынды (детонациялық) жоғары өнімді жануды қамтамасыз етеді.

Дыбыстан жоғары ағысты жанармаймен байыту жанарғының форсункалық аппараты арқылы жанарғының саптамасыз жұмысы кезіндегі негізгі шығынның 15...20 % шегінде жүргізіледі.

Термоқұралдың газ ағыны артық жанармайды (1500…1800 °С дейін) жылытады. Отын атмосфералық ауадан саптаманың перфорациясы арқылы және жоғары дыбысты химиялық реакциялар мен тығыздау секірісіндегі жылудың жылдам бөлінуі есебінен түсетін тотықтырғышпен әрекет ете отырып, цилиндрлік саптамада қайта жоғары дыбыстық жылдамдыққа дейін жылдамдатылады. Бұл ретте жоғары қарқындылықтағы, жылдамдықтағы және жаппай шығыстағы қызған газдардың қуатты ағыны пайда болады.

Негізгі ағын учаскесінің басында тығыздаудың күшті секіруінде жанармайды жағу және цилиндрлік саптамада ағынды қайта тарату ағынның қуатын оның геометриялық өлшемдерін қолданыстағымен салыстырғанда арттыруға мүмкіндік береді, бұл ретте тау жыныстарының бұзылу өнімділігі мен тиімділігі айтарлықтай артады.

Бұл елеулі әсер компрессордан қосымша ауа шығынсыз алынады. Бұл ретте жанармай шығыны тек 20 %-ға ұлғайған кезде өнімділік 1,5 есе артады. Бұл саптамасыз жанарғыны қолданумен салыстырғанда 30 % -ға жуық экономикалық тиімділікті қамтамасыз етеді.

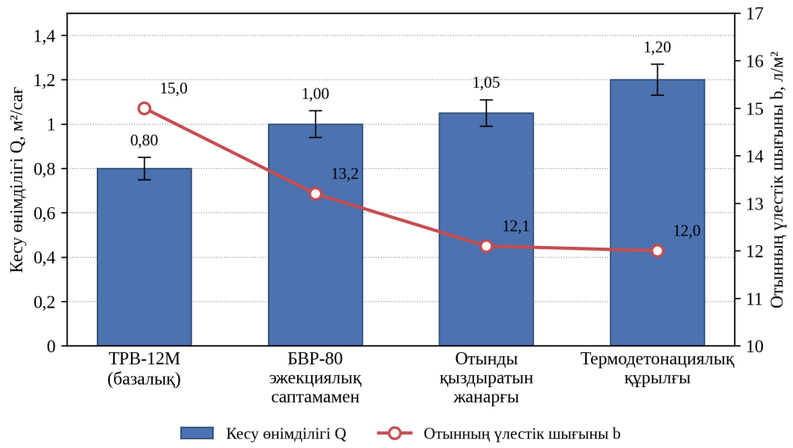
Жетілдірілген жанарғыларды салыстырмалы сынау нәтижелері

Төрт конструкцияны бірдей жағдайда сынау нәтижелері 2-кестеде жинақталған. Барлық мәндер бір кен орнының гранитінде (1-кесте) және бірдей режимдік параметрлерде алынды, сондықтан олар конструкциялық шешімнің таза әсерін сипаттайды.

2-кесте – Термоқұрал конструкцияларының салыстырмалы көрсеткіштері (гранит, n = 5, орташа мән ± стандартты ауытқу)

Көрсеткіш	ТРВ-12М (базалық)	БВР-80 эжекциялық саптамамен	Отынды қыздыратын жанарғы	Термодетонациялық құрылғы
Кесу өнімділігі Q, м²/сағ	0,80 ± 0,05	1,00 ± 0,06	1,05 ± 0,06	1,20 ± 0,07
Өнімділіктің өсуі, %	–	25	31	50
Отынның сағаттық шығыны B, л/сағ	12,0 ± 0,3	13,2 ± 0,3	12,7 ± 0,3	14,4 ± 0,4
Отынның үлестік шығыны b, л/м²	15,0	13,2	12,1	12,0
Үлестік шығынның төмендеуі, %	–	12	19	20
Ауаның шығыны, м³/сағ	240	240	240	240
Газ ағынының температурасы, °С	1450 ± 50	1600 ± 50	1700 ± 50	1800 ± 50
Жылу ағынының тығыздығы, 10^6 Вт/м²	1,5–2,0	2,4–2,8	2,8–3,2	3,5–4,0
Салыстырмалы экономикалық тиімділік, %	–	12	18	30

2-кестенің деректері бойынша эжекциялық саптаманы қолдану кесу өнімділігін 0,80-ден 1,00 м²/сағ-қа дейін (25 %) арттырады, ал отынның үлестік шығынын 15,0-ден 13,2 л/м²-ге дейін (12 %) төмендетеді. Отынды сопло бетінде булану температурасына дейін алдын ала қыздыру ағын температурасын шамамен 250 °С-қа жоғарылатып, үлестік шығынды 12,1 л/м²-ге дейін азайтады. Ең жоғары нәтиже детонациялық жану режимінде алынды: өнімділік 1,5 есе артады (0,80 → 1,20 м²/сағ), бұл ретте отынның сағаттық шығыны небәрі 20 %-ға (12,0 → 14,4 л/сағ) ұлғаяды, ал компрессордан қосымша ауа шығыны талап етілмейді. Нәтижесінде отынның үлестік шығыны 20 %-ға төмендеп, саптамасыз нұсқамен салыстырғандағы жалпы экономикалық тиімділік шамамен 30 % құрайды. Көрсеткіштердің конструкция бойынша өзгеру сипаты 8-суретте берілген.



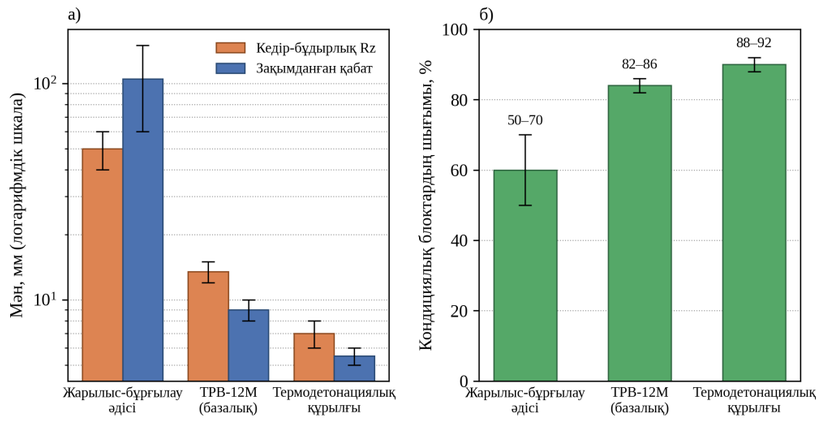
8-сурет – Термоқұрал конструкциясына байланысты кесу өнімділігі Q мен отынның үлестік шығыны b

Алынған мәндер өнеркәсіптік деректермен сәйкес келеді: бензин-ауа құрылғылары үшін 0,80 м²/сағ дейін, оттегі-керосин құрылғылары үшін 1,30 м²/сағ дейін [19, 25-б]. Термиялық шеплену бойынша шетелдік зерттеулерде де ағынның жылу ағыны тығыздығының артуы бұзылу жылдамдығының сызықтыға жуық өсуіне әкелетіні көрсетілген [9; 10; 17], ал сандық модельдеу нәтижелері бұзылу аймағының геометриясы бойынша осы қорытындыны растайды [17].

3-кесте – Кесу бетінің сапасы және массивтің зақымдану дәрежесі

Көрсеткіш	Жарылыс-бұрғылау әдісі	ТРВ-12М (базалық)	Термодетонациялық құрылғы
Кесу бетінің кедір-бұдырлығы Rz, мм	40–60	12–15	6–8
Қабырғаның 2 м базада жазықтықтан ауытқуы, мм	±40	±25	±15
Зақымданған қабаттың тереңдігі, мм	60–150	8–10	5–6
Қабырға маңында Vp төмендеуі, %	25–35	10–12	6–8
Кондициялық блоктардың шығымы, %	50–70	82–86	88–92

3-кестенің деректері термиялық кесудің басты артықшылығы – массивтің зақымдану аймағының шағын болуында екенін көрсетеді. Жарылыс-бұрғылау әдісінде жарықшақтану аймағы саңылау қабырғасынан 60–150 мм-ге дейін таралса, термиялық кесуде микрожарықшақты қабаттың тереңдігі 5–10 мм-ден аспайды; бұл қабырға маңындағы бойлық толқын жылдамдығының Vp салыстырмалы аз төмендеуімен (6–12 %) расталады. Осының арқасында кондициялық блоктардың шығымы 50–70 %-дан 88–92 %-ға дейін артады, яғни кен орнын игерудің рентабельділігі айтарлықтай жоғарылайды. Салыстырмалы деректер 9-суретте графикалық түрде келтірілген.

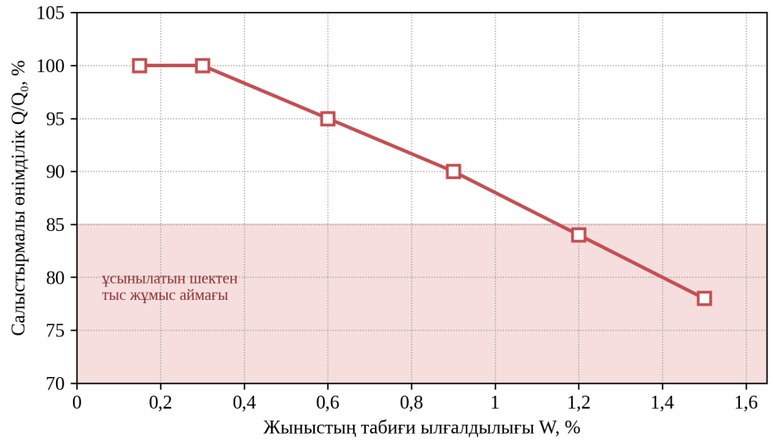


9-сурет – Өндіру әдісіне байланысты: а) кесу бетінің кедір-бұдырлығы Rz және зақымданған қабаттың тереңдігі; б) кондициялық блоктардың шығымы

Детонациялық режимде бет кедір-бұдырлығының Rz 12–15 мм-ден 6–8 мм-ге дейін төмендеуі ағын жылдамдығының артуы кезінде шеплену қабыршақтарының ұсақтауымен және олардың саңылаудан тиімдірек шығарылуымен түсіндіріледі. Бұл құбылыс шеплену механикасы бойынша теориялық түсініктермен үйлеседі: қабыршақтың қалыңдығы мен өлшемі бетке берілетін жылу ағынының тығыздығына кері пропорционал [11]. Практикалық тұрғыдан кедір-бұдырлықтың төмендеуі блоктарды кейінгі өңдеуде (аралау, тегістеу) алынатын қабаттың қалыңдығын және сәйкесінше шикізат шығынын азайтады.

Әдістің шектеулері мен қолдану шарттары.

Жыныстың ылғалдылығы. Кеуектердегі су термиялық бұзу процесінің тұрақтылығына елеулі әсер етеді: судың булану жылуы 2,26 МДж/кг болғандықтан, берілетін жылудың бір бөлігі бетті шеплену температурасына дейін қыздыруға емес, ылғалды буландыруға жұмсалады. Біздің бақылауларымызда табиғи ылғалдылықтың 0,3 %-дан 1,5 %-ға дейін артуы кесу өнімділігін 15–25 %-ға төмендетті. Әдебиетте де сумен қаныққан үлгілерде шеплену процесінің басталу уақыты құрғақ үлгілермен салыстырғанда шамамен екі есе ұзақ болатыны көрсетілген [10; 11]. Сонымен қатар, жаңбырдан кейінгі немесе қар еріген кезеңде кеуек қысымының бақыланбайтын өсуі болжанбаған жарықшақтануға және блок геометриясының бұзылуына әкелуі мүмкін. Сондықтан ылғалдылығы жоғары кезеңдерде бетті алдын ала кептіру немесе жанарғының жылжу жылдамдығын 20–30 %-ға азайту ұсынылады. Ылғалдылықтың кесу өнімділігіне әсерінің сипаты 10-суретте көрсетілген.



10-сурет – Гранит массивінің табиғи ылғалдылығы W-ға байланысты салыстырмалы кесу өнімділігі Q/Q_0

Жыныстың типі мен құрылымы. Әдіс тек шеплену (spalling) қабілеті жоғары жыныстарда тиімді. Кварц мөлшері 25 %-дан жоғары, ұсақ және орта түйірлі, минералдық құрамы біртекті емес граниттер жақсы бұзылады: 573 °С-та кварцтың α→β фазалық ауысуы көлемнің шамамен 0,8 %-ға артуымен жүріп, түйіаралық кернеулерді күшейтеді. Керісінше, карбонатты жыныстарда (мәрмәр, әктас) әдіс тиімсіз – 600–900 °С-та декарбонизация басталып, бет балқыма қабықпен жабылады және шеплену тоқтайды. Кварцы аз ірі түйірлі жыныстарда (габбро, диорит, лабрадорит) өнімділік 2–3 есе төмендейді, ал қатпарлы және тақталы жыныстарда анизотропия әсер етеді: қабаттасуға параллель және перпендикуляр бағыттарда бұзылу жылдамдығы мен қабыршақ өлшемі айтарлықтай ерекшеленеді. Тұрақты шеплену үшін жылу беру коэффициенті шамамен 500 Вт/(м² ·К)-нен, ал бет температурасы 500 °С-тан жоғары болуы қажет [12; 13]; бұл шарттар орындалмағанда процесс шеплену режимінен жыныстың жай ғана термиялық әлсіреуіне ауысады [14; 15; 16].

Жұмыс қауіпсіздігі. Отты-ағынды термоқұралдармен жұмыс істеу кезінде мынадай қауіп факторлары ескерілуі тиіс: шу деңгейі 110–120 дБА (қорғаныш құлаққаптар міндетті); жалынға 1 м қашықтықта 5–10 кВт/м²-ге жететін жылулық сәулелену (жылудан қорғайтын киім, беткап, қалқан); жану өнімдеріндегі CO және NOx (ашық кемерде табиғи желдету жеткілікті, ал шектелген кеңістікте мәжбүрлі сору жүйесі қажет); шеплену кезінде түзілетін ұсақ дисперсті кремнеземді (SiO_2) шаң – фиброгенді әсері бар, сондықтан респираторлар мен су тұманын беру арқылы шаңды басу қажет; ыстық қабыршақтардың 3–5 м-ге дейін ұшуы (қорғаныш экрандар және қауіпсіз аймақты белгілеу); бензин мен соляр майын сақтау және беру кезіндегі өрт-жарылыс қауіпсіздігі; жанарғыны іске қосу және отын түрін ауыстыру сәттеріндегі кері соққы қаупі. Оператордың бір ауысымдағы

үздіксіз жұмыс уақытын 4 сағатпен шектеу және жұмыс аймағындағы ауа құрамын мерзімді бақылау ұсынылады.

Технологиялық және экономикалық шектеулер. Термоқұралмен қалыптастырылатын саңылаудың тереңдігі 5 м-ге дейін шектелген, өйткені тереңдіктің артуымен жану өнімдерін шығару және жалынды тұрақты ұстау қиындайды. Ені 0,15–0,20 м саңылау жыныстың белгілі бір бөлігін қалдыққа айналдырады. Отынның шығыны жоғары (12–14 л/сағ), ал ауа температурасы 0 °С-тан төмен болғанда жанарғыны іске қосу сенімділігі нашарлайды. Жану өнімдерінің эмиссиясы (CO_2, NOx) экологиялық бақылауды талап етеді, ал жабдықты пайдалану білікті оператордың болуын қажет етеді. Осы себептерге байланысты термиялық кесу әмбебап шешім емес: ол ең алдымен кварцы жоғары, құрғақ және салыстырмалы біртекті гранит массивтерінде тиімді, ал басқа жағдайларда механикалық немесе аралас әдістермен үйлестіру орынды [16; 18].

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (грант № AP25796181).

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері бензин-ауалы және оттегі-керосинді термоқұралдарды пайдалана отырып, термиялық кесу әдістері блокты гранит өндірудің тиімділігі мен дәлдігін айтарлықтай арттыратынын көрсетті. Эжекция және детонация эффектілерін пайдаланатын термоқұралдардың инновациялық құрылымдары жабдықтың көлемін айтарлықтай ұлғайтпай-ақ өнімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Атмосфералық ауаны тарта отырып, жану қоспасын толық жағу арқылы жану процесін қарқындату жылу ағынының қуатын арттыруға және отынның меншікті шығынын азайтуға септігін тигізеді. Жалпы алғанда, термиялық технологияларды енгізу кондициялық шикізат шығымын арттыруға, экологиялық жүктемені азайтуға және тас өндіру үдерістерінің экономикалық тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Сандық түрде бұл нәтижелер былайша көрінеді: кесу өнімділігі 0,80-ден 1,20 м²/сағ-қа дейін (1,5 есе) артады, отынның сағаттық шығыны 12,0-ден 14,4 л/сағ-қа дейін ұлғайғанымен, үлестік шығын 15,0-ден 12,0 л/м²-ге дейін (20 %) төмендейді, ал саңылау бетінің кедір-бұдырлығы Rz 12–15 мм-ден 6–8 мм-ге дейін азайып, кондициялық блоктардың шығымы 88–92 %-ға жетеді. Сонымен қатар әдістің қолданылу аясы шектеулі: ол жыныстың ылғалдылығына, минералдық құрамы мен құрылымына сезімтал және жұмыс қауіпсіздігі бойынша арнайы шараларды талап етеді, сондықтан термиялық кесуді қолдану әрбір кен орны үшін жеке негізделуі тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Xia-Ting Feng Rock Mechanics and Engineering: Volume 1 – Principles. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – 780 p.

2 **Pivnyak, G., Bondarenko, V., Kovalevska, I.** New Developments in Mining Engineering 2015. Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. – CRC Press, 2015. – 616 p.

3 Truong Dang Quang. Current Situation of Stone Mining for Construction Materials in An Giang Province // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2022. – Vol. 11(06). – P. 80–85.

4 **De Silva, R. V., Pathegama Gamage, R., Perera, M. S. A.** An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review // Energies. – 2016. – Vol. 9(11). – 958 p.

5 **Dassanayake, A. B. N., Samarakoon, A. U., Chaminda, S. P., Jayawardena, C. L., Kondage, Y. S., Kannangara, K. A. T. T.** A Review of Dimension Stone Extraction Methods // Mining. – 2023. – Vol. 3(3). – P. 516–531. https://doi.org/10.3390/mining3030029

6 **Zhihong Zhao.** Thermal Influence on Mechanical Properties of Granite: A Microcracking Perspective // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – Vol. 49(3). – P. 747–762. – https://doi.org/10.1007/s00603-015-0767-1

7 **Hu, X., Song, X., Liu, Y., Li, G., Shen, Z., Lyu, Z.** Aspect ratio of spalls of granite in flame-jet spallation and its effect on the modeling prediction of spallation properties // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 171. – P. 1390–1399. – https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.061

8 **Gubin, S. G., Trushko, N. V.** Thermal Fragmentation of Rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2015. – Vol. 48. – P. 2085–2095. – https://doi.org/10.1007/s00603-015-0783-5

9 **Rauenzahn, R. M., Tester, J. W.** Rock failure mechanisms of flame-jet thermal spallation drilling – theory and experimental testing // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1989. – Vol. 26(5). – P. 381–399. – https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90935-2

10 **Wilkinson, M. A., Tester, J. W.** Experimental measurement of surface temperatures during flame-jet induced thermal spallation // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 1993. – Vol. 26(1). – P. 29–62. – https://doi.org/10.1007/BF01019868

11 **Walsh, S. D. C., Lomov, I. N.** Micromechanical modeling of thermal spallation in granitic rock // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 65. – P. 366–373.

12 **Kant, M. A., Rudolf von Rohr, Ph.** Minimal required boundary conditions for the thermal spallation process of granitic rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Vol. 84. – P. 177–186.

13 **Kant, M. A., Rossi, E., Höser, D., Amann, F., Rudolf von Rohr, Ph.** A theory on thermal spalling of rocks with a focus on thermal spallation drilling // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – Vol. 122(3). – P. 1805–1815. – https://doi.org/10.1002/2016JB013800

14 **Höser, D., Meier, T., Patru, A., Kant, M.A., Rudolf von Rohr, Ph.** An experimental study of the influence of uniaxial load on flame jet drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 106. – P. 311–318. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.007

15 **Rossi, E., Kant, M.A., Madonna, C., Saar, M. O., Rudolf von Rohr, Ph.** The effects of high heating rate and high temperature on the rock strength: feasibility study of a thermally assisted drilling method // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2018. – Vol. 51(9). – P. 2957–2964.

16 **Rossi, E., Jamali, S., Schwarz, D., Saar, M. O., Rudolf von Rohr, Ph.** Field test of a combined thermo-mechanical drilling technology. Mode II: flame-assisted rotary drilling // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 190. – 106880. – https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106880

17 **Saksala, T., Kouhia, R., Mardoukhi, A., Hokka, M.** Thermal jet drilling of granite rock: a numerical 3D finite-element study // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2021. – Vol. 379(2196). – 20200128. – https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0128

18 **Sun, Q., Liu, Y., Shen, Z.** A combined thermal spallation and melting technology by plasma jet for deep and hard rock reservoirs // SPE Journal. – 2023. – Vol. 28(1). – P. 49–63. – https://doi.org/10.2118/212263-PA

19 **Povetkin, V., Bukayeva, A., Zhauyt, A., Nurymov, Ye., Askarov, Ye.** Study of thermal stonecutting tools // Journal of Vibroengineering Procedia. – 2016. – Vol. 8. – P. 22–27.

20 Патент на изобретение № 33704. Поветкин, В.В., Букаева, А.З. Устройство для термического разрушения горных пород. – Опубл. 21.06.2019. – Бюл. № 25. – 4 с.

REFERENCES

1 Xia-Ting Feng Rock Mechanics and Engineering: Volume 1 – Principles. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – 780 p.

2 **Pivnyak, G., Bondarenko, V., Kovalevska, I.** New Developments in Mining Engineering 2015. Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. – CRC Press, 2015. – 616 p.

3 Truong Dang Quang. Current Situation of Stone Mining for Construction Materials in An Giang Province // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2022. – Vol. 11(06). – P. 80–85.

4 **De Silva, R. V., Pathegama Gamage, R., Perera, M. S. A.** An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review // Energies. – 2016. – Vol. 9(11). – 958 p.

5 **Dassanayake, A. B. N., Samarakoon, A. U., Chaminda, S. P., Jayawardena, C. L., Kondage, Y. S., Kannangara, K. A. T. T.** A Review of Dimension Stone Extraction Methods // Mining. – 2023. – Vol. 3(3). – P. 516–531. https://doi.org/10.3390/mining3030029

6 **Zhihong Zhao.** Thermal Influence on Mechanical Properties of Granite: A Microcracking Perspective // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – Vol. 49(3). – P. 747–762. – https://doi.org/10.1007/s00603-015-0767-1

7 **Hu, X., Song, X., Liu, Y., Li, G., Shen, Z., Lyu, Z.** Aspect ratio of spalls of granite in flame-jet spallation and its effect on the modeling prediction of spallation properties // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 171. – P. 1390–1399. – https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.061

8 **Gubin, S. G., Trushko, N. V.** Thermal Fragmentation of Rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2015. – Vol. 48. – P. 2085–2095. – https://doi.org/10.1007/s00603-015-0783-5

9 **Rauenzahn, R. M., Tester, J. W.** Rock failure mechanisms of flame-jet thermal spallation drilling – theory and experimental testing // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1989. – Vol. 26(5). – P. 381–399. – https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90935-2

10 **Wilkinson, M. A., Tester, J. W.** Experimental measurement of surface temperatures during flame-jet induced thermal spallation // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 1993. – Vol. 26(1). – P. 29–62. – https://doi.org/10.1007/BF01019868

11 **Walsh, S. D. C., Lomov, I. N.** Micromechanical modeling of thermal spallation in granitic rock // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 65. – P. 366–373.

12 **Kant, M. A., Rudolf von Rohr, Ph.** Minimal required boundary conditions for the thermal spallation process of granitic rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Vol. 84. – P. 177–186.

13 **Kant, M. A., Rossi, E., Höser, D., Amann, F., Rudolf von Rohr, Ph.** A theory on thermal spalling of rocks with a focus on thermal spallation drilling // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – Vol. 122(3). – P. 1805–1815. – https://doi.org/10.1002/2016JB013800

14 **Höser, D., Meier, T., Patru, A., Kant, M.A., Rudolf von Rohr, Ph.** An experimental study of the influence of uniaxial load on flame jet drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 106. – P. 311–318. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.007

15 **Rossi, E., Kant, M.A., Madonna, C., Saar, M. O., Rudolf von Rohr, Ph.** The effects of high heating rate and high temperature on the rock strength: feasibility study of a thermally assisted drilling method // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2018. – Vol. 51(9). – P. 2957–2964.

16 **Rossi, E., Jamali, S., Schwarz, D., Saar, M. O., Rudolf von Rohr, Ph.** Field test of a combined thermo-mechanical drilling technology. Mode II: flame-assisted rotary drilling // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 190. – 106880. – https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106880

17 **Saksala, T., Kouhia, R., Mardoukhi, A., Hokka, M.** Thermal jet drilling of granite rock: a numerical 3D finite-element study // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2021. – Vol. 379(2196). – 20200128. – https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0128

18 **Sun, Q., Liu, Y., Shen, Z.** A combined thermal spallation and melting technology by plasma jet for deep and hard rock reservoirs // SPE Journal. – 2023. – Vol. 28(1). – P. 49–63. – https://doi.org/10.2118/212263-PA

19 **Povetkin, V., Bukayeva, A., Zhauyt, A., Nurymov, Ye., Askarov, Ye.** Study of thermal stonecutting to

20 Patent na izobretenie № 33704. Povetkin, V.V., Bukaeva, A.Z. Ustrojstvo dlja termicheskogo razrushenija gornyh porod [Device for thermal destruction of rocks]. – Opubl. 21.06.2019. – Bjul. № 25. – 4 p.

11.06.25 ж. баспаға түсті.
27.06.25 ж. түзетулерімен түсті.
18.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. З. Букаева[1], В. В. Поветкин[2]
[1]Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, Республика Казахстан, г. Актау;
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 11.06.25.
Поступило с исправлениями 27.06.25.
Принято в печать 18.08.26.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕНЗОВОЗДУШНЫХ ТЕРМОИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ДОБЫЧЕ И ОБРАБОТКЕ БЛОЧНОГО КАМНЯ

В данной статье рассмотрены современные технологии термического разрушения горных пород, в частности – огнеструйные методы, применяемые при добыче блоков гранита. В условиях активного роста строительного сектора и растущей потребности в качественном природном камне, особенно актуальным становится поиск альтернатив традиционным буровзрывным методам, сопровождающимся высоким уровнем отходов и повреждением массива. В качестве перспективного подхода рассматривается применение термоинструментов, работающих на основе бензовоздушных и кислородно-керосиновых горелок, способных обеспечивать направленное разрушение породы с высокой точностью и минимальными структурными повреждениями.

В статье подробно рассмотрены технические характеристики различных типов термоинструментов, механизмы их действия, принципы формирования и подачи горючих смесей, а также особенности процесса теплового разрушения горных пород. Особое внимание уделено конструктивным усовершенствованиям горелок, направленным на интенсификацию процессов горения и повышение термодинамической эффективности. Описаны инновационные подходы, включающие использование эжекционных насадков, предварительный подогрев топлива, а также внедрение детонационного режима горения для увеличения мощности газовой струи.

Проведённые сравнительные испытания показали, что усовершенствованные горелки повышают производительность резки с 0,80 до 1,20 м²/ч (в 1,5 раза) при снижении удельного расхода топлива с 15,0 до 12,0 л/м² (на 20 %); шероховатость поверхности реза Rz уменьшается с 12–15 до 6–8 мм, а выход кондиционных блоков достигает 88–92 %. Отдельно обсуждаются ограничения метода – влияние влажности и минерального состава породы, а также требования безопасности работ. Работа представляет практическую ценность для специалистов горнодобывающей отрасли и может быть использована при модернизации технологий на камнеобрабатывающих предприятиях Казахстана.

Ключевые слова: термоинструмент, горная порода, топливные компоненты, детонационное горение, гранит.

A. Bukayeva[1], V. Povetkin[2]
[1]Caspian university of technology and engineering named after Sh. Yessenov, Republic of Kazakhstan, Aktau;
[2]Kazakh national technical university named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 11.06.25.
Received in revised form 27.06.25.
Accepted for publication 18.08.26.

APPLICATION OF FUEL-AIR THERMAL TOOLS DURING BLOCK STONE MINING AND PROCESSING

This article discusses modern technologies for thermal destruction of rocks, in particular, fire-jet methods used in the extraction of granite blocks. In the context of the active growth of the construction sector and the growing need for high-quality natural stone, the search for alternatives to traditional drilling and blasting methods, accompanied by a high level of waste and damage to the massif, is becoming especially relevant. As a promising approach, the use of thermal tools operating on the basis of fuel-air and oxygen-kerosene burners capable of providing directed rock destruction with high accuracy and minimal structural damage is considered.

The article details the technical characteristics of various types of thermal tools, their mechanisms of action, the principles of formation and supply of combustible mixtures, as well as the features of the process of thermal destruction of rocks. Particular attention is paid to the design improvements of burners aimed

at intensifying the combustion processes and increasing thermodynamic efficiency. Innovative approaches are described, including the use of ejection nozzles, fuel preheating, as well as the introduction of a detonation combustion mode to increase the power of the gas jet.

Comparative tests showed that the improved burners increase the cutting rate from 0.80 to 1.20 m²/h (by a factor of 1.5) while reducing the specific fuel consumption from 15.0 to 12.0 l/m² (by 20 %); the roughness of the cut surface Rz decreases from 12–15 to 6–8 mm, and the yield of marketable blocks reaches 88–92 %. The limitations of the method are discussed separately: the influence of rock moisture content and mineral composition, as well as occupational safety requirements. The work is of practical value for mining specialists and can be used to modernize technologies at stone processing enterprises in Kazakhstan.

Keywords: thermal tools, rock, fuel components, detonation combustion, granite.

МРНТИ 55.51.03., 55.57.13.

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/54-75

***Е. Р. Жумагалиев[1], И. А. Тайлер[2], Б. М. Касымбаев[3], С. С. Абдуллаев[4], М. Ж. Хазимов[5]**

[1,4]Казахский Национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

[1,2,3,5]Казахский Национальный аграрный исследовательский университет, Республика Казахстан, г. Алматы.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6234-7650

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2334-6088

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2470-6468

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-3122

*e-mail: yelaman.marmaray@gmail.com

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУЗОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ

В статье представлены результаты оценки устойчивости проектируемой транспортно-технологической машины, в задней части которой установлена КМУ установка «Hiab» 550 при подъеме груза. Цель исследования-научное обоснование конструктивных параметров машины, теоретическое определение запаса устойчивости крано-манипуляторной установки при различных режимах работы и подтверждение полученных результатов экспериментальными исследованиями. Поскольку транспортно-технологические машины широко используются в сельском хозяйстве, строительстве и других отраслях производства, существует высокая вероятность возникновения в процессе их эксплуатации опрокидывания, повреждения конструктивных элементов и других аварийных ситуаций. В связи с этим была проведена комплексная оценка показателей грузоподъемности и устойчивости машины для обеспечения ее эксплуатационной безопасности. В ходе исследования были выполнены теоретические расчеты различных грузовых масс, рабочих радиусов стрелы и углов подъема с учетом конструктивных особенностей машины, массовых характеристик, расположения центра тяжести и схемы монтажа крано-манипуляторной установки на основе действующих нормативно-технических требований. С целью определения взаимодействия факторов, влияющих на фонд устойчивости, был использован метод планирования многофакторного эксперимента, составлен матричный план и получены регрессионные уравнения. На основе полученных математических моделей построены трехмерные графические модели, описывающие законы изменения запаса устойчивости при рабочем радиусе стрелы, массе поднимаемого груза и углах подъема стрелы 25°, 45° и 65°.С целью оценки надежности теоретических расчетов проводились полевые экспериментальные

испытания, результаты которых сравнивались с расчетными данными. Сравнительный анализ показал наличие высокого соответствия между теоретическими и экспериментальными результатами, что подтвердило правильность и эффективность применения предложенной методики расчета. По результатам исследования установлено, что в режиме работы E–F показатели устойчивости транспортно-технологической машины превышают нормативные требования и машина безопасна в эксплуатации. А в рабочем режиме E–C установлено, что запас устойчивости ниже нормативного значения, и в этом случае обоснован повышенный риск опрокидывания при эксплуатации машины и необходимость применения дополнительных конструктивных или технологических мер безопасности.

Ключевые слова: проектирование, трехмерная модель, транспортно-технологическая машина, крано-манипуляторная установка, коэффициент грузовой устойчивости, коэффициент на запас устойчивости, ребро опрокидования, грузовысотная характеристика.

Введение

Мобильный кран является одним из наиболее широко используемых типов кранов и составляет приблизительно 75–80 % всех аварий и несправностей при различных работ с его использованием. Основными причинами аварий с мобильными кранами являются опрокидывание 45–50 %, повреждение опорных стоек, обрушение грунта и перегрузка [1].

Мерой опасности опрокидывания машины может быть величина крутящего момента, необходимая для поддержания равновесия крана относительно краев опрокидывания. Этот момент, называемый опрокидывающим моментом, в некоторых случаях складывается с дополнительными моментами от сил инерции [2; 3; 4].

Всякий кран и погрузочная машина в процессе стационарной работы и движении должны быть гарантированы от опрокидывания. Из практики известно, что больше половины аварий с кранами по причине потери устойчивости. Момент равновесия наиболее распространенный метод, используемый при анализе устойчивости крана. Максимальная грузоподъемность может быть рассчитана в соответсвии с моментом равносвесия. Однако при подъеме тяжелых предметов устойчивость крана будет значительно отличаться при различных условиях подъема и режима работы. Кран следует рассматривать как динамический объект из-за возможности выполнения различных движений различными способами. [5, с. 281–287].

Устойчивость свободно стоящих неподвижных грузоподъемных машин в основном обеспечивается геометрическими параметрами их массы и контура опоры. Устойчивость к опрокидыванию является одним из основных условий безопасной эксплуатации машин. Движение грузоподъемных и погрузочных машин, особенно в производственных и сельскохозяйственных условиях, может привести к снижению устойчивости из-за неровностей рельефа, наклона и колебаний. В связи с этим на этапе проектирования машины ее устойчивость

оценивается с помощью специальных расчетов. Устойчивость грузоподъемных и погрузочных машин к опрокидыванию в соответствии с требованиями промышленной безопасности Республики Казахстан характеризуется и оценивается соответствующим коэффициентом устойчивости [6, с. 53–95].

Автомобильные краны монтируются на автомобильном или специальном шасси. Большая мобильность и высокая производительность кранов этого типа позволяет все шире применять их в различной отрасли. Весьма большое применение в различных областях промышленности находят передвижные грузоподъемные машины, такие как автомобильные краны, краны на гусеничном ходу, железнодорожные краны и различные виды автопогрузчиков [7, с. 227–233].

За последнее время в грузоподъемных устройствах, установленных на транспортно-технологической машине (далее ТТМ), в качестве силового механизма все шире применяется гидравлический привод. Гидравлические манипуляторы в настоящее время широко используются в различных производственных и технологических процессах. Они позволяют выполнять множество операций, таких как погрузка и разгрузка, перегрузка, транспортировка и складские работы. Гидравлические крано-манипуляторные установки (далее КМУ), устанавливаемые на различные мобильные ТТМ и получили широкое распространение благодаря высокой универсальности, эффективности эксплуатации и широте функциональных возможностей. К основным техническим показателям манипуляционных систем относятся грузоподъемность и длина выхода стрелы. Параметры грузоподъемности устанавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 1575-87. Кроме того, в настоящее время для оснащения мобильных машин и технологических комплексов специального назначения производители разрабатывают манипуляционные системы, адаптированные к конкретным условиям эксплуатации. Несущие характеристики таких систем определяются их конструктивными особенностями и выполняемой функцией [8].

Применяемые в настоящее время методы расчета устойчивости груза не в полной мере учитывают влияние конструктивных особенностей системы подвески на базовом шасси ТТМ на котором установлена КМУ. В частности, в расчетных моделях недостаточно учитывается упругость элементов подвески, деформационные свойства конструкции шасси и их влияние на показатели устойчивости машины. В связи с этим одной из актуальных научно-технических задач является разработка усовершенствованных вычислительных методик, позволяющих более точно оценить устойчивость мобильных машин в работе и повысить уровень их безопасности [9, с. 328–339].

На задний свес ТТМ был установлен мало КМУ модели типа «Hiab» 550 вес которого составляет около 1 тонны с грузоподъемностью до 3,2 тонны и с максимальным вылетом стрелы до 5 метров.

Данный КМУ был установлен для того чтобы выполнять прямую разгрузку и погрузку грузонесущие мешки типа «Биг-Бег», которые в них установлены мягкие контейнеры без за действия дополнительного погрузчика. Использование КМУ на ТТМ позволяет оператору самостоятельно перегружать контейнеры с измельченной силосуемой массой в специальное отведенное место [10, с. 215–228].

Целью данной статьи является теоретический расчет на коэффициент грузовой устойчивости и экспериментальное исследование ТТМ с КМУ при разных положениях.

Для достижения цели согласно методике были поставлены следующие задачи:

1) Построение схемы опорного контура ТТМ;

2) Теоретически рассчитать грузовую устойчивость ТТМ с разными грузами в разных положениях с КМУ;

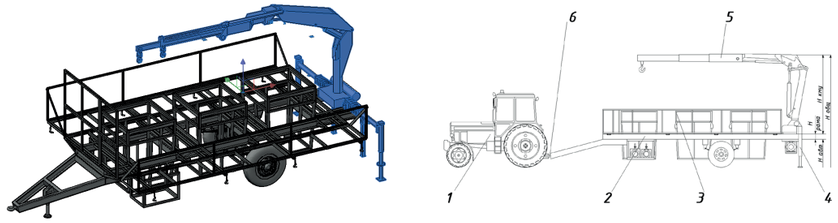
3) На оснований экспериментальных результатов построить графическую интерпретацию на запас устойчивости ТТМ.

Материалы и методы

Транспортные и погрузочно-разгрузочные работы тесно связаны с технологическими операциями такие как возделывания сельскохозяйственных культур и уборки урожая, обслуживанием животноводческих ферм и т.п.

Для приготовления и хранения силоса в мягких вакуумированных контейнерах выполняют на базе стандартных прицепов что не в полной мере соответствует нормам охраны труда. Одна из главных это вероятность высокой степени травматизма оператора из-за большой высоты прицепа и привлечение специализированного погрузчика для разгрузки и перезагрузки из матрицы мешков типа «Биг-Бег» на другой транспорт.

На основании проведенных исследований предлагается разработка ТТМ предназначеного для осуществления единого технологического процесса заготовки, хранения и транспортировки сочных кормов в вакуумируемых мягких контейнерах до места потребления. В конструкции машины которой предусмотрена КМУ, установленная в задней части, обеспечивающая выполнение операций погрузки, разгрузки и перестановки контейнеров. Такое конструктивное решение повышает технологическую самостоятельность производственного процесса, снижает необходимость использования дополнительных грузоподъемных машин, а также позволяет сократить трудовые и временные затраты. (Рисунок 1) [12].



где, $H_{авт}$ – 1000 мм., $H_{рама}$ – 160 мм., $H_{КМУ}$ – 1800 мм., $H_{общ}$ – 2960 мм.
1 – трактор Беларусь МТЗ-82, 2 – ТТМ,
3 – матрица, 4 – выдвижные опоры КМУ (аутригеры),
5 – КМУ, 6 – место сцепки
Рисунок 1 – Трехмерная модель и конструктивный чертеж
трнспортно-технологическоой машины с КМУ на заднем свесе

Поэтому стало необходимость разработать ТТМ, но до разработки необходимо учитывать следующие особенности и одна из главных причин является необходимостью провести расчеты для предотвращения аварий по потере грузовой устойчивости разрабатываемой ТТМ.

Изменение геометрических параметров стрелы в процессе работы манипуляционных систем приводит к повторному распределению силовых нагрузок и изменению характеристик устойчивости машины. Особенно рабочий радиус стрелы l_c при увеличении увеличивается ударный рычаг силы тяжести груза и увеличивается величина передающего момента. В результате изменяются реакций, поступающие на опорные устройства, уменьшается запас стабилизирующего момента. По этой причине грузоподъемность манипуляционной системы постепенно уменьшается с увеличением рабочего радиуса. Поэтому учет взаимозависимости грузоподъемности и стреловидности является одним из решающих факторов при выборе конструктивной схемы манипулятора, а также при оценке грузовой устойчивости и эксплуатационной безопасности ТТМ.

Несущая способность манипуляционной системы не является постоянной величиной, а является переменным параметром, зависящим от кинематического положения стрелки. Увеличение рабочего радиуса приводит к увеличению силового плеча груза и увеличению передающего момента. В результате в целях поддержания коэффициента устойчивости на нормативном уровне допустимая масса груза ограничивается поэтапно. Поэтому несущая характеристика манипуляционной системы характеризуется следующим неравенством в интервале изменения рабочего радиуса стрелы:

$$G_{min} \leq G(l_c) \leq G_{max}, \quad (1)$$

где, $G_{\max}$ – грузоподъемность манипуляционной системы при минимальном вылете $l_{c\min}$;

$G_{\min}$ – грузоподъемность манипуляционной системы при максимальном вылете $l_{c\max}$.

В конструкции некоторых манипуляционных систем может быть предусмотрено дополнительное разгрузочное устройство (противовес или дополнительный опорный элемент) в области корневого сустава. Такое техническое решение способствует перераспределению нагрузок и обеспечивает оптимальное распределение сил, поступающих в опорный контур. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации масса поднимаемого груза более вероятно, что манипулятор будет ниже номинальной грузоподъемности. Уменьшение передающего момента в таких режимах увеличивает запас устойчивости машины, что позволяет выполнять определенные технологические операции без использования дополнительных опор (аутригеров). Однако применение такого режима работы допускается только при условии выполнения результатов расчетов по устойчивости и требований безопасности [11, с .37–43].

Бурное развитие современных производственных систем привело к значительному ужесточению требований к грузоподъемно-транспортным машинам. Эти машины обеспечивают непрерывное движение материальных потоков и позволяют выполнять погрузочно-разгрузочные, транспортировочные и технологические операции с высокой производительностью. В автоматизированном и потоковом производстве их деятельность стала одним из важнейших факторов, определяющих эффективность и непрерывность технологического процесса, не ограничиваясь выполнением отдельных механических операций. В этой связи конструктивное совершенствование, безопасность эксплуатации, устойчивость и надежность грузоподъемно-транспортных машин являются одними из основных научных и инженерных задач повышения технико-экономической эффективности производства.

Интенсивное развитие конструкций и сферы применения КМУ требует разработки новых подходов к определению показателей их грузоподъемности и устойчивости. Обеспечение эксплуатационной безопасности манипуляторов, устанавливаемых, в частности, на шасси различных типов, оценка перераспределения нагрузок и снижение риска опрокидывания является одной из актуальных на сегодняшний день научных и инженерных задач [13, с. 46–60. 14, с. 338–352]. Основные параметры расчетной схемы КМУ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры расчетной схемы КМУ

Наименование расчетного параметра	Условное обозначение	Численное зачение, кН
1 Масса базового шасси	$G_{ш}$	39
2 Масса КМУ	$G_{кму}$	8,82
3 Масса надрамной констукции	$G_{р}$	1,13
4 Масса бортовой платформы	$G_{бп}$	0,44
5 Максимальная грузоподъёмность КМУ	P_1	31,87
6 Грузоподъёмность КМУ на вылете 2,5 м.	P_2	21,57
7 Грузоподъёмность КМУ на максимальном вылете	P_3	10,78
8 Вес стрелового оборудования КМУ	$G_{стр}$	4,41

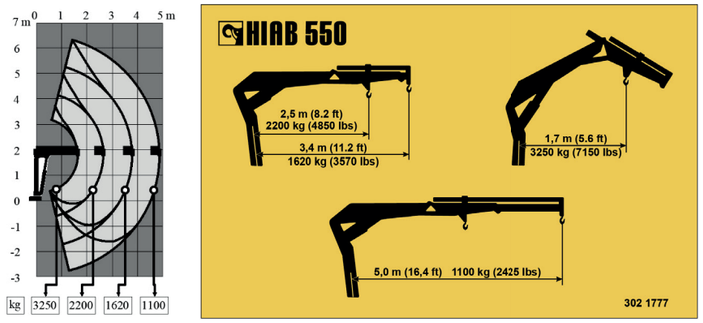
Грузовая устойчивость КМУ обеспечивается при выполнении следующего условия:

Расчет коэффиицента устойчивости выполнятется по следующей формуле:

$$K_y = \frac{M_{уд}}{M_{оп}} \geq 1{,}15 \quad (2)$$

где $M_{уд}$ – удерживающий момент,
$M_{оп}$ – опрокидывающий момент.

Согласно грузовысотной характеристике КМУ модели типа «Hiab» 550 может поднять груз при вылете стрелы 1,7 метра 3250 тонн, при вылете стрелы 2,5 метра 2200 тонн, а при вылете стрелы 5 метров 1100 тонн. Тем самым демонстрируя о том, что при уменьшений вылета стрелы увеличивается вес поднимаемого груза, а при увеличений вылета стрелы уменьшается вес груза, это связано с тем что есть вероятностью повышением риска потери устойчивости и опрокидования ТТМ (Рисунок 2).



а) б)

Рисунок 2 – Грузовысотная характеристика КМУмодели типа «Hiab» 550a – диаграмма грузоподъемност;
б – рабочие положения стрелы при различных вылетах

Расчет удерживающего момента ТТМ определяется следующим образом:

$$M_y = G_a \times f + G_m \times (c - a) \quad (3)$$

где, G_a – масса ненагруженного автомобиля без КМУ, водителя и топлива в топливном баке;
G_m – масса КМУ и элементов дополнительного оборудования;
f – расстояние от центра тяжести автомобиля до ребра опрокидывания;
c – расстояние от оси колонны КМУ до ребра опрокидывания;
a – расстояние между центром тяжести КМУ и осью колонны.

Расчет опрокидывающего момента ТТМ определяется следующим выражением:

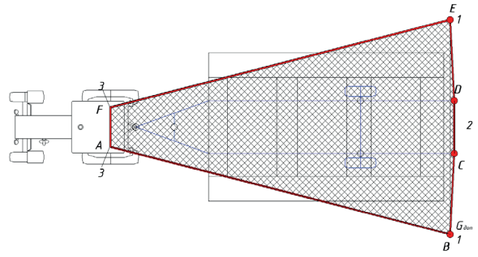
$$M_{оп} = (1{,}4 \times P + 0{,}1 \times G_c) \times (b - c) \quad (4)$$

где, P – масса поднимаемого груза;
G_c – приведенная к оголовку стрелы масса стрелового оборудования;
b – вылет стрелы КМУ.

В процессе определения грузовой устойчивости за ось возможного опрокидования принимают линию, проходящую через наиболее удаленные точки опорного контура машин. Конфигурация этой линий зависит от типа ходовой части и применения выносных опор. При изменении пространственного положения КМУ изменеятся и положение расчетного ребра, относительно которого оценивается устойчивость машины.

Для определения устойчивости при опрокидывании, на основе теории точки нулевого момента, необходимо определить зону устойчивости. В случае гусеничных экскаваторов прямоугольная зона, определяемая как зона устойчивости, определяется длиной и шириной гусеницы. А при использовании обычной строительной техники, работа которой требует развертывания опорных стоек, например, мобильных кранов, прямоугольная площадь, образованная передними и задними опорными стойками, распределяется равномерно, обеспечивая устойчивое пространство [1].

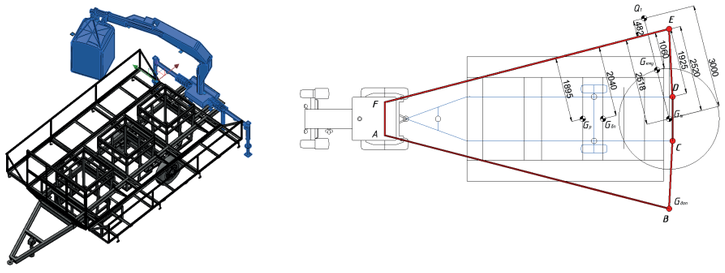
В нашем случае ТТМ точки опорных элементов ТТМ является 1 – выдвижные опоры КМУ (аутригеры), 2 – дополнительные опоры ТТМ, 3 – задние колеса трактора Беларус МТЗ-82 (Рисунок 3).



1 – выдвижные опоры(аутригеры) КМУ,
2 – дополнительные опоры
ТТМ; 3 – задние колеса трактора
Беларус МТЗ-82
Рисунок 3 – Принципиальная схема устойчивой зоны и точек опорных элементов ТТМ

Теоретический расчет будет осуществляться с боковой правой стороны ТТМ согласно рисунку 3 по расположению ребер опрокидования в точках где выдвижные опоры (аутригеры) КМУ и задние колеса трактора Беларус МТЗ-82 (E и F) при вылете стрелы 3, 4 и 5 метров, а также с задней части ТТМ по расположению ребер опрокидования в точках выдвижных опор (аутригеров) КМУ и где дополнительные опоры ТТМ (E и C) при вылете стрелы 3 и 5 метров. Устанавливая угол поворота колонны в 90 градусов перпендикулярно к ребру опрокидования. Выбором данных положений является то, что КМУ работает и поворочивается в положении к углу 180 °С градусов. Вес груза будет выбираться в диапазоне 550–850 кг, это связано с тем что в грузонесущие мешки вмешается до 1 тонны груза зеленной массы.

Произведем теоретический расчет на коэффициент грузовой устойчивости ТТМ оснащенной КМУ с грузом при вылете стрелы 3 метра для ребра опрокидования (E и F) (Рисунок 4):



а) б)

Рисунок 4 – Трехмерная модель и расчетная схема
ТТМ с КМУ при угле поворота 90 °С и вылете стрелы 3 м:
а – трехмерная модель; б – расчетная схема (вид сверху)

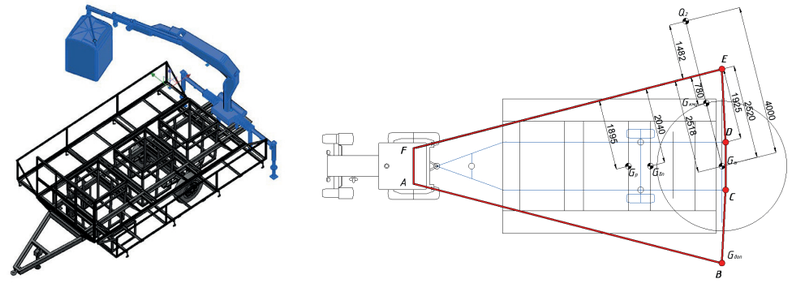
$$\mathrm{M_{оп}} = Q1 \cdot 0{,}482 = 21{,}71 \text{ кНм},$$

$$Q1 = 45{,}059 \text{ кН},$$

$$\mathrm{M_{уд}} = 119.18 \text{ кНм},$$

$$\mathrm{K_у} = \frac{\mathrm{M_{уд}}}{\mathrm{M_{оп}}} = \frac{119{,}18}{21{,}71} = 5{,}48 \geq 1{,}15.$$

Произведем теоретический расчет на коэффициент грузовой устойчивости ТТМ с КМУ с грузом при вылете стрелы 4 метра для ребра опрокидования (E и F) (Рисунок 5):



а) б)

Рисунок 5 – Трехмерная модель и расчетная схема
ТТМ с КМУ при угле поворота 90 °С и вылете стрелы 4 м:
а – трехмерная модель; б – расчетная схема (вид сверху

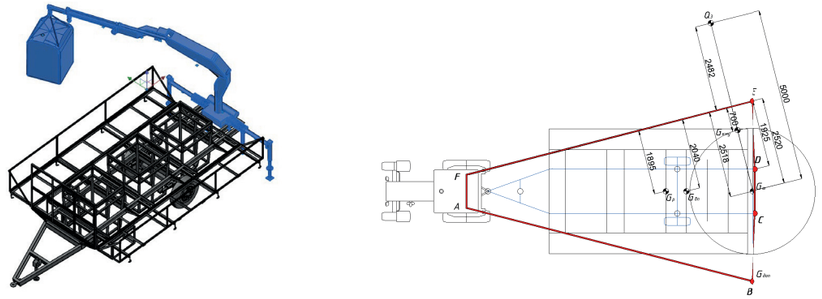
$$\mathrm{M_{оп}} = 45{,}34 \text{ кНм},$$

$$Q2 = 30{,}6 \text{ кН},$$

$$\mathrm{M_{уд}} = 110{,}025 \text{ кНм},$$

$$\mathrm{K_у} = \frac{\mathrm{M_{уд}}}{\mathrm{M_{оп}}} = \frac{110{,}025}{45{,}34} = 2{,}42 \geq 1{,}15.$$

Здесь также, произведем теоретический расчет на коэффициент грузовой устойчивости ТТМ с КМУ с грузом при вылете стрелы 5 метров для ребра опрокидования (E и F) (Рисунок 6):



а) б)

Рисунок 6 – Трехмерная модель и расчетная схема
ТТМ с КМУ при угле поворота 90 °С и вылете стрелы 5 м:
а – трехмерная модель; б – расчетная схема вид сверху

$$М_{оп} = Q3 \cdot 2{,}482 = 38{,}55 \text{ кНм},$$

$$Q3 = 15{,}53 \text{ кН},$$

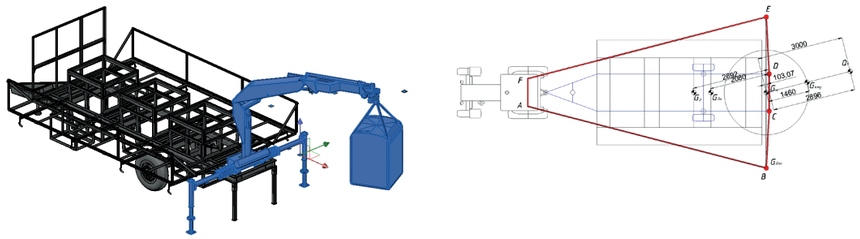
$$М_{уд} = 109{,}32 \text{ кНм},$$

$$К_у = \frac{М_{уд}}{М_{оп}} = \frac{109{,}32}{38{,}55} = 2{,}83 \geq 1{,}15.$$

По результатам теоретического расчета и анализа на коэффицент устойчивости КМУ установленного на ТТМ получены показания коэффициентов по расположению ребер оброкидования Е и F, а также сравнены с нормой коэффициента устойчивости. Результаты являются положительными выше нормативного коэффициента устойчивости. При вылете стрелы КМУ на 3 метра 5,48, на 4 метра 2,42 и на 3 метра 2,83. По итогам можно предположить что ТТМ будет устойчивым в этом положений.

Теперь, мы будем проводить теоретический расчет на расположению ребер опрокидования Е и С, на заднюю часть ТТМ, также устанавливая угол в 90 градусов перпендикулярно к ребру опрокидования.

Выполним теоретический расчет на коэффициент грузовой устойчивости ТТМ с КМУ с грузом при вылете стрелы 3 метра для ребра опрокидования (Е и С) (Рисунок 7):



а) б)

Рисунок 7 – Трехмерная модель и расчетная схема
ТТМ с КМУ при угле поворота 90 °С и вылете стрелы 3 м:
а – трехмерная модель; б – расчетная схема вид сверху

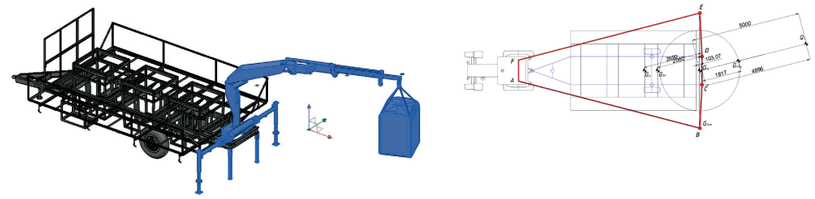
$$М_{оп} = Q4 \cdot 2{,}896 = 130{,}46 \text{ кНм},$$

$$Q4 = 45{,}05 \text{ кН},$$

$$М_{уд} = 20{,}84 \text{ кНм},$$

$$К_у = \frac{М_{уд}}{М_{оп}} = \frac{20{,}84}{130{,}46} = 0{,}15 \geq 1{,}15.$$

Сделаем теоретический расчет на коэффициент грузовой устойчивости на ТТМ с КМУ с грузом при вылете стрелы 5 метра для ребра опрокидования (Е и С) (Рисунок 8):



а) б)

Рисунок 8 – Трехмерная модель и расчетная схема
ТТМ с КМУ при угле поворота 90 °С и вылете стрелы 5 м:
а – трехмерная модель; б – расчетная схема вид сверху

$$М_{оп} = Q5 \cdot 4{,}893 = 76{,}04 \text{ кНм},$$

$$Q5 = 15{,}53 \text{ кН},$$

$$М_{уд} = 23{,}987 \text{ кНм},$$

$$К_у = \frac{М_{уд}}{М_{оп}} = \frac{23{,}987}{76\,04} = 0{,}31 \geq 1{,}15.$$

Теперь, по результатам теоретического расчета и анализа, на коэффицент грузовой устойчивости ТТМ оснащенной КМУ получены показания коэффициентов по расположению ребер оброкидования Е и С, а также сравнены с нормой коэффициента устойчивости. Результаты являются неудовлитворительными ниже нормативного коэффициента устойчивости. При вылете стрелы КМУ на 3 метра 0,15, и на 5 метров 0,31. По итогам можно предположить что КМУ будет неустойчивым в этом положений и категорический запрещается работать в заданном положений, так как это очень опасно при выполнени операций с разгрузочно-погрузочными работами.

Экспериментальные исследования проводились в двух разных условиях. На первом этапе испытания проводились на специальной испытательной площадке НАО Казахского национального аграрного исследовательского университета. На втором этапе эксперимателно практические испытания проводились в реальных условиях на полях ТОО «Амиран завод Казахской академии и питания». Экспериментальные исследования включала:

1) Оценить и проанализировать теоретический расчет с полученными данными экспериментального испытания. Полученные при различных условиях эксплуатации результаты позволили комплексно оценить характеристики устойчивости машины в процессе подъема и определить соответствие теоретических расчетов экспериментальными данными (Рисунок 10):

2) Оценить устойчивость стрелы с испытательным грузом в подвешенном состояний. Согласно грузовысотной характеристике данной модели КМУ при вылете стрелы от 3, 4 и 5 метров, вес груза составлял 550, 650 и 850 кг. Груз находился в подвешенном состояний в течений 10 минут, для того чтобы оценить работоспособность стрелы КМУ и выдержит ли разные нагрузки веса груза при разном вылете и подъеме стрелы.

3) Для определения на запас устойчивости ТТМ оснащенной КМУ. Для получения функций был проведена многофакторная экспериментальное исследование, для определения ТТМ на запас устойчивости от длины стрелы и от поднимаемого массы груза с разными положениями (градусами) подъема стрелы карно-манипуляторной установки по вертикали α25°, α45° и α65°. План проведения эксперимента изложен в таблице 3.

Таблица 3 – Уровни и интервалы независимых факторов ТТМ оснащенной КМУ

	Кодовое значение	Угол подъема стрелы КМУ, α	Масса груза, кг.	Длина стрелы КМУ, м
Базовый уровень	0	45	700	3,35
диапазон	ε	20	150	1,75
Верхний уровень	+1	65	850	5,10
Нижний уровень	-1	25	550	1,60
Верхняя точка	+1.68	78,6	952	6,29
Нижняя точка	-1.68	11,4	448	0,41
Кодовый знак	xi	X_1	X_2	X_3

Планируемая матрица для проведения многофакторного эксперимента представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Планируемая матрица для проведения многофакторного эксперимента

№ эксперимента	X_1	Масса груза, кг.	X_2	Длина стрелы КМУ, м	X_3	Угол подъема и/или наклона стрелы по по вертикалили КМУ, α	Крен платформы транспортно-технологической машины по горизонту,
1	-1	550	-1	1,60	-1	25	1,43
2	+1	850	-1	1,60	-1	25	1,45
3	-1	550	+1	5,10	-1	25	4,58
4	+1	850	+1	5,10	-1	25	4,62
5	-1	550	-1	1,60	+1	65	0,68
6	+1	850	-1	1,60	+1	65	0,68
7	-1	550	+1	5,10	+1	65	2,15
8	+1	850	+1	5,10	+1	65	2,15
9	-1.68	448	0	3,35	0	45	2,37
10	+1.68	952	0	3,35	0	45	2,37
11	0	700	-1.68	0,41	0	45	0,29
12	0	700	+1.68	6,29	0	45	4,45
13	0	700	0	3,35	-1.68	11,4	3,29
14	0	700	0	3,35	+1.68	78,6	0,68
15	0	700	0	3,35	0	45	2,37

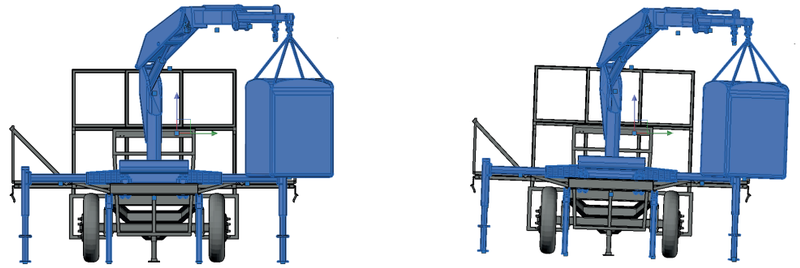
16	0	700	0	3,35	0	45	2,35
17	0	700	0	3,35	0	45	2,38
18	0	700	0	3,35	0	45	2,36
19	0	700	0	3,35	0	45	2,39
20	0	700	0	3,35	0	45	2,37

Результаты и обсуждение

КМУ на ТТМ оснащена одним выдвижным и одной дополнительной опорой самого ТТМ. Экспериментальные испытания были проведены и по результатам теоретического и экспериментального испытания, был сделан анализ для определения достоверности и сравнения результатов.

Одним из основных факторов, обеспечивающих безопасную и эффективную работу КМУ, является профессиональная квалификация и практический опыт оператора. Навыки управления КМУ оператора позволяют плавно и управляемо передавать нагрузку при выполнении грузоподъемных и погрузочно-разгрузочных операций. Это, в свою очередь, снижает динамические воздействия на рабочее оборудование, способствует сохранению устойчивости машины и снижению риска возникновения аварийных ситуаций.

По результатам можно сделать вывод что ТТМ устойчив при положений (E и F) и удовлетворяет нормативные требования. А при положений (E и C) результаты являются неудовлитворительными, это подтвердилась в ходе полевых испытаний при подъеме испытательных грузов в расчетных условиях (E и C) зафиксировано наклонение ТТМ в сторону действия нагрузки в котором находится груз, около 4,0–4,5° (Рисунок 9, 10).



а) б)

Рисунок 9 – Трехмерная модель ТТМ в режимах работы КМУ.
а) увеличение контура опоры и повышение статической устойчивости машины за счет установки аутригеров на опорную поверхность;
б) наклон машины в направлении груза вследствие деформации упругих элементов подвески при работе без аутригеров

Это явление объясняется увеличением передающего момента за счет увеличения рабочего радиуса стрелы и деформацией упругих элементов

подвески шасси. Полученные экспериментальные результаты показали хорошее совпадение с проведенными теоретическими расчетами и подтвердили правильность разработанной расчетной модели и ее пригодность для применения в прогнозировании показателей устойчивости машины. (Рисунок 11).



Рисунок 10 – При подъеме груза КМУ, расположенной в задней части ТТМ, в расчетных положениях Е и С наблюдался наклон машины в сторону направления, в котором находился испытательный груз

С увеличением рабочего радиуса КМУ и увеличением массы поднимаемого груза увеличивается величина передающего момента, влияющего на устойчивость машины. Если крутящий момент превышает крутящий момент, возникает риск опрокидывания ТТМ. Поэтому в целях предотвращения такой опасности в конструкции КМУ используются подвижные гидравлические опоры (аутригеры). Их основная функция-распределять нагрузку на большую площадь за счет расширения опорного контура и обеспечивать статическую устойчивость машины. В связи с этим расположение и размеры аутригеров должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить запас устойчивости даже при самых неблагоприятных режимах работы манипулятора, то есть при максимальной грузоподъемности и максимальном радиусе работы.

Также по результатам испытаний установлено, что при нахождений испытательного груза в подвешенном состоянии в течение 10 минут признаков потери устойчивости стрелы КМУ не наблюдалась. При этом испытательный грузовой мешок созранял исходное положение и самопроизвольного опускания груза в течение указанного времени не зафиксировано.

На основании результатов экспериментальных исследований было получено следующие уравнение регрессии:

$$Y = 1{,}755 - 0{,}26\ X_1 + 0{,}68\ X_2 + 0{,}04\ X_3.$$

Графическая интерпретация значения функции (запаса устойчивости КМУ) в уравнениях регрессии в трехмерном пространстве, который демонстрирует изменение массы поднимаемого груза в зависимости от длины стрелы КМУ на запас устойчивости КМУ с разными углами подъема стрелы по вертикали КМУ 25, 45 м. и 65 градусов (Рисунок 11,12).

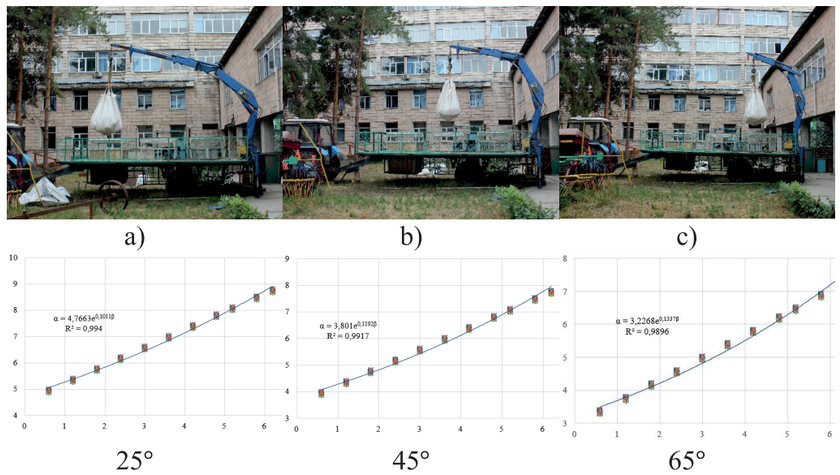
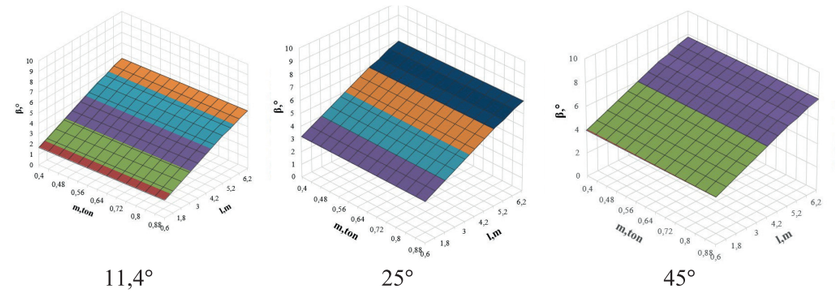
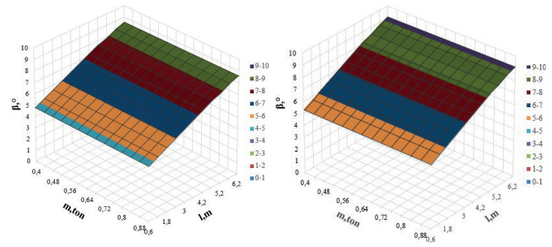


Рисунок 11 – Запас устойчивости ТТМ от длины стрелы от поднимаемого груза с разными положениями (градусами) подъема стрелы КМУ по вертикали a) 25; b) 45 и c) 65





65° 78,6°

Рисунок 12 – Запас устойчивости ТТМ от длины стрелы от поднимаемого груза с разными положениями (градусами) подъема стрелы КМУ по вертикали

Полученные результаты показали, что устойчивость ТТМ зависит от дальности полета стрелы, массы поднимаемого груза и угла подъема стрелы. По мере увеличения дальности полета стрелы и массы груза запас устойчивости уменьшается, что объясняется увеличением крутящего момента опрокидывания. Наиболее неблагоприятные условия наблюдаются при совмещении большой массы груза и значительной дальности полета стрелы.

Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме проекта: ИРН AP26193857 «Технология заготовки и хранения сенажа путем разработки технических средств под вакуумным уплотнением измельченных растений в мягких полимерных контейнерах в условиях Алматинской области».

Выводы

Одним из важных этапов при проектировании ТТМ является научное обоснование геометрических параметров рамы, расположения центра веса, распределения нагрузки по осям и эффективного расположения КМУ. Эти параметры напрямую влияют на грузоподъемность машины, общую устойчивость и безопасность эксплуатации. В связи с этим проводятся теоретические исследования, направленные на определение соотношения упрочняющего и опрокидывающего моментов в различных режимах работы машины, оценку пределов грузоподъемности и расчет запаса устойчивости. Такие расчеты позволяют заранее прогнозировать возможные случаи опрокидывания, выбирать эффективные параметры конструкции и обосновывать безопасную зону эксплуатации машины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Yoon, B.-J., Lee, K.-S., Lee, J.-H.** Study on Overturn Proof Monitoring System of Mobile Crane [Текст] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – Article ID 6819. – https://doi.org/10.3390/app11156819

2 **Kacalak, W., Budniak, Z., Majewski, M.** Simulation model of a mobile crane with ensuring its stability [Текст] // Modelowanie Inżynierskie – Modelling in Engineering. – 2016. – Vol. 29. – P. 35–43.

3 **Kacalak, W., Budniak, Z., Majewski, M.** Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements [Текст] // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. – Vol. 23. – № 3. – P. 587–599.

4 **Kacalak, W, Budniak, Z, Majewski, M.** Modelling and Analysis of the Positioning Accuracy in the Loading Systems of Mobile Cranes [Текст] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – № 23. – Article ID 8426. – https://doi.org/10.3390/ma15238426

5 **Zhou, Q, Liu,Y, Xie,Y, Zhang, X.** Analysis on anti-overturning stability of a truck crane based on zero moment point theory [Текст] // DYNA. – 2024. – Vol. 97. – P. 281–287. – https://doi.org/10.3832/ifor4753-018. – https://doi.org/10.6036/10484.

6 **Лагерев, И. А., Лагерев, А. В.** Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов: конструкции и условия эксплуатации: – Брянск : РИО БГУ, 2018. – 190 с.

7 **Lagerev, A, Lagerev, I, Makulina, A.** Improving the harvester functionality by optimizing the manipulator kinematic scheme [Текст] // iForest. – 2025. – Vol. 18. – № 4 – P. 227–233. – https://doi.org/10.3832/ifor4753-018

8 ГОСТ 1575—87. Краны грузоподъемные. Ряды основных параметров [Текст] – М.: Издательство стандартов, 1987.

9 **Мехонин, О. Н., Пугин, К. Г.** Обоснование изменения методики расчета грузовой устойчивости автомобильных грузоподъемных кранов и кранов-манипуляторов на основе анализа регламентирующих нормативных документов [Текст] // Вестник СибАДИ. – 2020. – № 3.

10 **Жумагалиев, Е., Тайлер, И., Касымбаев, Б., Бора, Г., Хазимов, М.** Определение эффективности транспортировки вакуумированной измельченной зеленой массы на тракторно-транспортном агрегате [Текст] // Izdenister Natigeler. – 2026. – Т. 28. – № 1(109). – С. 215–228. – https://doi.org/10.37884/1-2026/21

11 **Мехонин, О. Н., Пугин, К. Г., Щеткин, Р. В.** Анализ влияния конструкционных особенностей выносных опор автомобильного крана-манипулятора на коэффициент грузовой устойчивости [Текст] // Транспорт. транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 4.

12 Патент на изобретение № 37742. Тележка с контейнерами для загрузки и перевозки силоса. – 2024.

13 **Мехонин, О. Н., Щеткин, Р. В., Пугин, К. Г.** Оценка влияния смещения ребер опрокидывания при крене подрессоренных элементов конструкции базовых шасси автомобильных кранов-манипуляторов на значение коэффициента грузовой устойчивости [Текст] // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S13. – P. 17.

14 **Щеткин, Р. В., Янковский, Л. В., Тюзюльбаева, А. Г.** Расчет и испытания на грузовую устойчивость автомобильного крана-манипулятора с КМУ РК 3002К на шасси КамАЗ 43118-0003078-46 [Текст] // Транспортное, горное и строительное машиностроение. Вестник СибАДИ. – 2020. – Т. 17. – № 3 (вып.73).

REFERENCES

1 **Yoon, B.-J., Lee, K.-S., Lee, J.-H.** Study on Overturn Proof Monitoring System of Mobile Crane [Текст] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – Article ID 6819. – https://doi.org/10.3390/app11156819

2 **Kacalak, W., Budniak, Z., Majewski, M.** Simulation model of a mobile crane with ensuring its stability [Текст] // Modelowanie Inżynierskie – Modelling in Engineering. – 2016. – Vol. 29. – P. 35–43.

3 **Kacalak, W., Budniak, Z., Majewski, M.** Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements [Текст] // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. – Vol. 23. – № 3. – P. 587–599.

4 **Kacalak, W, Budniak, Z, Majewski, M.** Modelling and Analysis of the Positioning Accuracy in the Loading Systems of Mobile Cranes [Текст] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – № 23. – Article ID 8426. – https://doi.org/10.3390/ma15238426

5 **Zhou, Q, Liu,Y, Xie,Y, Zhang, X.** Analysis on anti-overturning stability of a truck crane based on zero moment point theory [Текст] // DYNA. – 2024. – Vol. 97. – P. 281–287. – https://doi.org/10.3832/ifor4753-018. – https://doi.org/10.6036/10484.

6 **Lagerev, I. A., Lagerev, A. V.** Sovremennaya teoriya manipulyacionny`x sistem mobil`ny`x mnogocelevy`x transportno-texnologicheskix mashin i kompleksov: konstrukcii i usloviya e`kspluatacii [Modern theory of manipulation systems of mobile multipurpose transport and technological machines and complexes: designs and operating conditions] Bryansk: RIO BGU, 2018. – 190 p.

7 **Lagerev, A, Lagerev, I, Makulina, A.** Improving the harvester functionality by optimizing the manipulator kinematic scheme [Текст] // iForest. – 2025. – Vol. 18. – № 4 – P. 227–233. – https://doi.org/10.3832/ifor4753-018

8 GOST 1575—87. Krany` gruzopod``emny`e. Ryady` osnovny`x parametrov [Tekst] [Lifting cranes. Series of basic parameters] – M.: Izdatel`stvo standartov, 1987.

9 **Mexonin, O. N., Pugin, K. G.** Obosnovanie izmeneniya metodiki rascheta gruzovoj ustojchivosti avtomobil`ny`x gruzopod``emny`x kranov i kranov-manipulyatorov na osnove analiza reglamentiruyushhix normativny`x dokumentov [Tekst] [Justification of the change in the methodology for calculating the load stability of automobile lifting cranes and manipulator cranes based on the analysis of regulatory documents] // Vestnik SibADI. – 2020. – № 3.

10 **Zhumagaliev, E., Tajler, I., Kasy`mbaev, B., Bora, G., Xazimov, M.** Opredelenie e`ffektivnosti transportirovki vakuumirovannoj izmel`chennoj zelenoj massy` na traktorno-transportnom agregate [Tekst] [Determination of the efficiency of transportation of evacuated crushed green mass on a tractor-transport unit] // Izdenister Natigeler. – 2026. – T. 28. – № 1(109). – P. 215–228. – https://doi.org/10.37884/1-2026/21

11 **Mexonin, O. N., Pugin, K. G., Shhetkin, R. V.** Analiz vliyaniya konstrukcionny`x osobennostej vy`nosny`x opor avtomobil`nogo krana-manipulyatora na koe`fficient gruzovoj ustojchivosti [Tekst] [Analysis of the influence of structural features of outriggers of an automobile crane manipulator on the coefficient of load stability] // Transport. transportny`e sooruzheniya. E`kologiya. – 2022. – № 4.

12 Patent na izobretenie № 37742. Telezhka s kontejnerami dlya zagruzki i perevozki silosa. [A trolley with containers for loading and transporting silage] – 2024.

13 **Mexonin, O. N., Shhetkin, R. V., Pugin, K. G.** Ocenka vliyaniya smeshheniya reber oprokidy`vaniya pri krene podressorenny`x e`lementov konstrukcii bazovy`x shassi avtomobil`ny`x kranov-manipulyatorov na znachenie koe`fficienta gruzovoj ustojchivosti [Tekst] [Assessment of the effect of the displacement of the tipping ribs during the roll of the sprung structural elements of the base chassis of automobile cranes on the value of the load stability coefficient] // Texnika i texnologiya transporta. [Transport equipment and technology] – 2019. – № S13. – P.17.

14 **Shhetkin, R. V., Yankovskij, L. V., Tyuzyul`baeva, A. G.** Raschet i ispy`taniya na gruzovuyu ustojchivost` avtomobil`nogo krana-manipulyatora s KMU RK 3002K na shassi KamAZ 43118-0003078-46 [Tekst] [Calculation and testing of cargo stability of an automobile crane manipulator with KMU RK 3002K on a KamAZ 43118-0003078-46 chassis] // Transportnoe, gornoe i stroitel`noe mashinostroenie. Vestnik SibADI. [Transport, mining, and construction engineering. SibADI Bulletin] – 2020. – T. 17. – № 3 (vy`p.73). [In.Russ]

Поступило в редакцию 02.06.26.
Поступило с исправлениями 17.06.26.
Принято в печать 02.09.26.

Е. Р. Жумагалиев[1], И. А. Тайлер[2], Б. М. Касымбаев[3],
С. С. Абдуллаев[4], М. Ж. Хазимов[5]
[1,4]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[1,2,3,5]Қазақ Ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
02.06.26 ж. баспаға түсті.
17.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КРАН-МАНИПУЛЯТОР ҚОНДЫРҒЫСЫ БАР КӨЛІК-ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ МАШИНАНЫҢ ЖҮК ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЕСЕПТЕУ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Мақалада жобаланған көлік-технологиялық машинаның тұрақтылығын бағалау нәтижелері келтірілген, оның артқы жағында жүкті көтеру кезінде «HIAB» 550 қондырғысы орнатылған. Зерттеудің мақсаты машинаның құрылымдық параметрлерін ғылыми негіздеу, әртүрлі жұмыс режимдерінде кран-манипулятор қондырғысының тұрақтылық қорын теориялық анықтау және алынған нәтижелерді эксперименттік зерттеулермен растау. Көлік және технологиялық машиналар ауыл шаруашылығында, құрылыста

және басқа да өндіріс салаларында кеңінен қолданылатындықтан, оларды пайдалану процесінде аударылу, құрылымдық элементтердің зақымдануы және басқа да төтенше жағдайлардың пайда болу ықтималдығы жоғары. Осыған байланысты машинаның пайдалану қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін оның жүк көтергіштігі мен тұрақтылығы көрсеткіштерін кешенді бағалау жүргізілді. Зерттеу барысында машинаның конструктивтік ерекшеліктерін, массалық сипаттамаларын, ауырлық орталығының орналасуын және қолданыстағы нормативтік-техникалық талаптар негізінде кран-манипуляторлық қондырғыны монтаждау схемасын ескере отырып, әртүрлі жүк массаларының, жебенің жұмыс радиустары мен көтеру бұрыштарының теориялық есептеулері орындалды. Тұрақтылық қорына әсер ететін факторлардың өзара әрекеттесуін анықтау үшін көп факторлы экспериментті жоспарлау әдісі қолданылды, матрицалық жоспар жасалды және регрессиялық теңдеулер алынды. Алынған математикалық модельдер негізінде жебенің жұмыс радиусы, көтерілетін Жүктің массасы және жебенің көтерілу бұрыштары 25°, 45° және 65°болатын тұрақтылық қорының өзгеру заңдылықтарын сипаттайтын үш өлшемді графикалық модельдер құрылды. Теориялық есептеулердің сенімділігін бағалау үшін далалық эксперименттік сынақтар жүргізілді, олардың нәтижелері есептелген мәліметтермен салыстырылды. Салыстырмалы талдау теориялық және эксперименттік нәтижелер арасында жоғары сәйкестіктің болуын көрсетті, бұл ұсынылған есептеу техникасын қолданудың дұрыстығы мен тиімділігін растады. Зерттеу нәтижелері бойынша E–F жұмыс режимінде көлік-технологиялық машинаның тұрақтылық көрсеткіштері нормативтік талаптардан асып түсетіні және машинаны пайдалану қауіпсіз екендігі анықталды. Ал E–C жұмыс режимінде тұрақтылық қоры нормативтік мәннен төмен екендігі анықталды, бұл жағдайда машинаны пайдалану кезінде аударылу қаупінің жоғарылауы және қосымша конструктивті немесе технологиялық қауіпсіздік шараларын қолдану қажеттілігі негізделген.

Кілтті сөздер: жобалау, үш өлшемді модель, көлік-технологиялық машина, кран-манипуляторлық қондырғы, жүк тұрақтылығының коэффициенті, тұрақтылық қорының коэффициенті, аударылу жиегі, жүк биіктігінің сипаттамасы.

Ye. R. Zhumagaliyev[1], I. A. Tailer[2], B. M. Kassymbayev[3],
S. S. Abdullayev[4], M. Zh. Khazimov[5]
[1,4]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[1,2,3,5]Kazakh National Agrarian Research University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 02.06.26.
Received in revised form 17.06.26.
Accepted for publication 02.09.26.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF CARGO STABILITY OF A TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINE WITH A CRANE MANIPULATOR UNIT

The article presents the results of an assessment of the stability of the projected transport and technological machine, in the rear of which the Hiab 550 CMU installation is installed when lifting cargo. The purpose of the study is the scientific substantiation of the design parameters of the machine, the theoretical determination of the stability margin of the crane-manipulator installation under various operating modes and the confirmation of the results obtained by experimental studies. Since transport and technological machines are widely used in agriculture, construction and other industries, there is a high probability of overturning, damage to structural elements and other emergency situations during their operation. In this regard, a comprehensive assessment of the machine's load capacity and stability was carried out to ensure its operational safety. In the course of the study, theoretical calculations of various cargo weights, working boom radii and lifting angles were performed, taking into account the design features of the machine, mass characteristics, the location of the center of gravity and the installation scheme of the crane manipulator installation based on current regulatory and technical requirements. In order to determine the interaction of factors affecting the sustainability fund, the method of planning a multifactorial experiment was used, a matrix plan was drawn up and regression equations were obtained. Based on the obtained mathematical models, three-dimensional graphical models are constructed that describe the laws of variation of the stability margin at the working radius of the boom, the mass of the load being lifted, and the boom lifting angles of 25°, 45°, and 65°.In order to assess the reliability of theoretical calculations, field experimental tests were conducted, the results of which were compared with the calculated data. The comparative analysis showed a high correspondence between the theoretical and experimental results, which confirmed the correctness and effectiveness of the proposed calculation methodology. According to the results of the study, it was found that in the E–F operation mode, the stability indicators of the transport and technological machine exceed the regulatory requirements and the machine is safe to operate. And in the E–C operating mode, it was found that the stability margin is lower than the standard value, and in this case, the increased risk of overturning during operation of the machine and the need for additional structural or technological safety measures is justified.

Keywords: design, three-dimensional model, transport and technological machine, crane-manipulator installation, load stability coefficient, stability margin coefficient, tipping edge, cargo height characteristic.

SRSTI 55.33.02

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/76-87

***A. A. Ibrayeva[1], Zh. M. Kuanyshbayev[2], D. V. Kapskii[3]**

[1,2]L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3]Belarusian National Technical University, Belarus, Minsk.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2893-9173
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3497-2206
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8660-8197
*e-mail: ibraeva_aa@bk.ru

STUDY OF FAILURE FLOW OF HEAVY LOAD VEHICLES OF «ZHOMART» MINE BY «ZHEZKAZGANTSVETMET»

The Zhezkazgan deposit is one of the world's major copper-ore regions and is characterized by significant mineral reserves and favorable prospects for further development. The geological and mining conditions of the deposit support the extensive use of heavy-duty underground mining vehicles. The high degree of mechanization of mining operations places increased requirements on the reliability, maintainability, and availability of mining equipment. Failures of individual vehicle components may result in significant downtime and affect the continuity of production processes. Therefore, the analysis of failure data and the development of quantitative approaches for determining spare-parts requirements are important for improving maintenance planning.

In this study, failure data for the main components of heavy-duty mining vehicles operating at the Zhomart Mine were analyzed using a probabilistic approach based on the normal distribution. Particular attention was paid to determining the parameters of the failure distribution and estimating the number of spare parts required to maintain a specified probability of failure-free operation.

Keywords: failure distribution, heavy-duty mining vehicles, normal distribution, mathematical expectation, standard deviation, quantile, spare parts.

Introduction

The Zhezkazgan deposit is one of the world's major copper-ore regions and is characterized by significant mineral reserves and favorable prospects for further development. The deposit consists predominantly of sedimentary rocks and includes mineralized ore bodies located at different distances from each other. The hardness of gray ore ranges from 12 to 16, while that of red rocks ranges from 6 to 8 on the Protodyakonov scale. In addition to copper, the polymetallic ores contain zinc, silver, and gold. The geological and mining conditions of the Zhezkazgan deposit are favorable for the use of heavy-duty mining vehicles [1;2].

The giant mines № 55, № 57, № 65, № 67 operate only using new technology, where all production processes are mechanized and automated. Drilling operations are performed using Sandvik DD-410-60, Paramatik H-205T, UBSh-532D, SBSh.

Ore loading is performed using CAT 980F and CAT 980G loaders. Ore transportation is performed using TORO-40D and MoAZ-7405 heavy-duty diesel vehicles. Most mining operations are highly mechanized and automated. At the plants of Kazakhmys Corporation LLP, when performing work, each employee reaches the indicators of the main mines of the USA, Canada, France, Sweden and other developing countries of the world. Today, we mine more than 95 % of all ore mined using self-propelled tools (figure - 1).

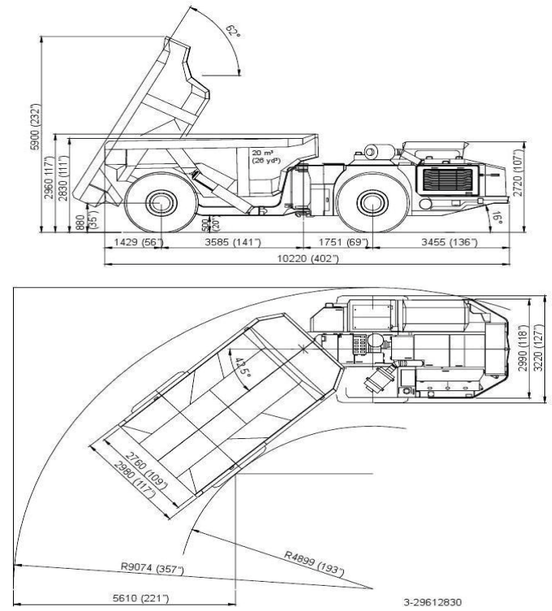
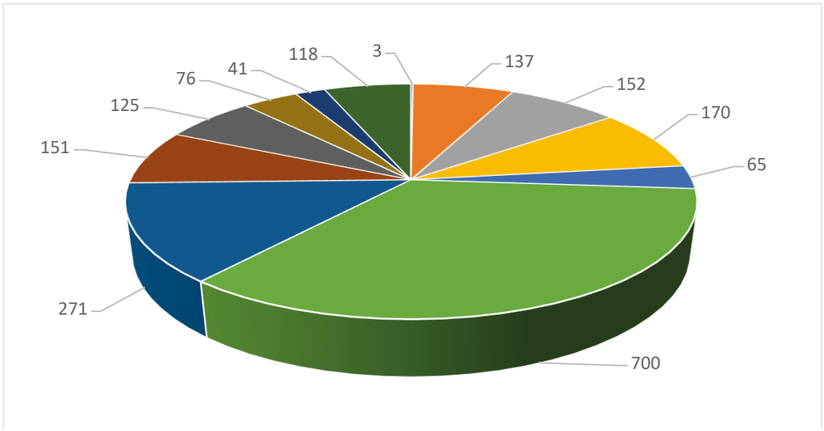


Figure 1 – General view of the TORO-50D mining vehicle

Today, the fleet of self-propelled underground tools at the Zhezkazgan mines of Kazakhmys Corporation LLP can number more than 700 units, the volume of mechanized mining is 92 %. AZhM – Annensky mine; EZhM – East Zhezkazgan mine; SZhM – South Zhezkazgan mine; Stepnoy mine; mining concern Zhomart Mine for the plants of the Zhezkazgan mine. After a feasibility study, a decision was made to provide large vehicles of the TORO-50+ model for the mines. Due to some problems with repair work at the underground mines of the Zhezkazgan LLP of the Kazakhmys Corporation LLP, we can show some downtime of road transport. We have several reasons for these problems. Currently, transport scientists are beginning to develop new ways to repair cars based on their technical condition. The distribution of the failure rate of the main elements of heavy-duty vehicles is shown in figure-2.

Currently, scientists in aviation and transport are beginning to develop new ways to repair vehicles based on their technical condition. The author of the article presents

probabilistic methods for assessing the repair and technical condition of heavy vehicles. [3; 4]



3 – stabbing system; 41 – compressor; 65 – transmission axle; 76 – brake system; 118 – other components; 125 – drilling equipment; 137 – engine; 151 – vehicle frame; 152 – vehicle boom; 170 – transmission; 271 – electrical equipment; 700 – hydraulic system

Figure 2 – Pie chart of distribution of failures in the Zhomart Mine

Materials and methods

The determination of the technical condition is carried out on the basis of the quantile of the standard normal law of distribution of the flow of failures of the main elements of heavy-duty vehicles. A normal distribution with numbers a=0, b=1 is called the standard normal distribution law [10]. The density of the normal standard distribution is represented by the following equation:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{x^2}{2}}, \quad (1)$$

Function of the normal standard distribution law of heavy-duty vehicle failure occurrence:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (2)$$

F(x) denotes the standard normal cumulative distribution function,

1 F(x)=1F(-x), because of why we only should know the meaning of function F(x) at x³0.

2 If random variable X is by normal law N (a, b), that her line function $U(x) = \frac{(x-a)}{b}$, submit to standard normal distribution N (0, 1), and it should be:

$$P(X < x) = P(\frac{X-a}{b} < \frac{x-a}{b}) = \Phi\left(\frac{x-a}{b}\right), \quad (3)$$

For a normally distributed random variable, the cumulative probability is determined using the standardized value calculated according to formula 3.

3.The probability of that random variable will be about from x1 to x2:

$$P(x1 < X < x2) = \Phi\left(\frac{x_1-a}{b}\right) - \Phi\left(\frac{x_2-a}{b}\right), \quad (4)$$

For a normally distributed random variable, the probability of occurrence within the interval (a-3σ, a+3σ) is approximately 0.987. The required quantile values were obtained from standard references on probability theory and reliability engineering [2, 5].

For each observed failure frequency, the standardized value was calculated using formula (4), and the corresponding cumulative probability was determined from the standard normal distribution.

The obtained probability value was then used to determine the corresponding quantile and to calculate the required number of spare parts.

Results and Discussion

The calculated quantiles for the Zhomart Mine are presented in Table 1.

Table 1 - Calculated quantiles for the main components of heavy-duty mining vehicles

Mathematical expectation of random variable, M					167,4
Standard deviation, σ					181,4
	X	Φ(x)=(x-M)/σ	Φ (x)		Quantile, K_α
1	3		-0,9062845	-0,906	0,181
2	152		-0,0848953	-0,085	0,468
3	137		-0,1675854	-0,168	0,433
4	170		0,01433297	0,0143	0,496
5	65		-0,5644983	-0,564	0,288
6	700		2,93605292	2,9361	0.9983
7	271		0,57111356	0,5711	0.716
8	76		-0,5038589	-0,504	0,309
9	151		-0,0904079	-0,09	0,464
10	125		-0,2337376	-0,234	0,409
11	41		-0,6968026	-0,697	0,242
12	118		-0,2723264	-0,272	0,394

Their main task to define required number of spare parts and revolution aggregates by their time of work and by next methodology. The dependent of need number is n details with time of work T_0, σ and with degree of risk α of restanding because of absent of stock parts will define with following case. When k_α degree of risk will be:

$$k_\alpha = \frac{t_c - nT_o}{\sigma\sqrt{n}}, \quad (5)$$

Where t_c – simple time of work n – details; n – number of details; T_O – mathematical expectation of time for one detail; σ – value of mid- square of decline value (standard).

These standard meanings we will show in Table 2.

Table 2 – Calculation of the probability of failure-free operation

probability of failure-free operation **P**	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,99
Degree of risk α	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
Quantile kα	-0,524	-0,674	-0,842	-1,036	-1,281	-1,645	-2,326

When we have a value α, by table which we have in up, we should receive from formula (6) needful for working without stop during the time t_C number n of details

$$n = n_{cp} + k_\alpha \nu\,(0{,}5k_\alpha \nu + \sqrt{n_{cp}}), \quad (6)$$

Where $n_{cp} = \frac{t_c}{t_0}$; ν – number of variation of time of work for one detail, $\nu = \frac{\sigma}{t_0}$

Formula (6) is valid for the considered cases, when $n_{cp} = 4$ and number of variation is n_{cp} =1,5, it means in all cases. A mistake in the worst of possible cases will not be 6,7 %. If in calculation we have α=0,05; k_α = -1,645, then needful number of stock parts we should define by formula (7):

$$n = n_{cp} + 1{,}645\,\nu\,(0{,}582\nu + \sqrt{n_{cp}}), \quad (7)$$

If in calculation we have α = 0,10 quantile define by formula 7: k_α =-1,281, then needful number of stock parts we should formula (8):

$$n = n_{cp} + 1{,}281\,\nu\,(0{,}64\nu + \sqrt{n_{cp}}), \quad (8)$$

If in (8) we neglect the first number in bracates we will have a such view of formula (9):

$$n = n_{cp} + k_\alpha \nu \sqrt{n_{cp}}, \quad (9)$$

The number of spare parts for the main components of the mining vehicles was determined using formula (9). The data used for the calculations are presented in Table 3.

Spare-parts requirement calculation

The number of recorded failures was used as the initial statistical information for estimating the required stock of spare parts. The calculation does not assume that the observed number of failures is directly equal to the required number of spare parts. Instead, the observed failure frequency is transformed into a probabilistic estimate that accounts for the variability of failures and the required probability of failure-free operation.

For each component, the observed number of failures X_i was first standardized using the parameters of the overall failure distribution:

$$Z_i = \frac{X_i - M}{\alpha}, \quad (10)$$

The corresponding cumulative probability F (Z_i) was then determined from the standard normal distribution. This probability characterizes the position of the observed failure frequency of the component within the empirical distribution of failures.

The expected operating time of one component was taken as,

$$T_o = 100.8, \quad (11)$$

while the standard deviation was

$$\sigma = 181{,}4\,, \quad (12)$$

The coefficient of variation was calculated as

$$\vartheta = \frac{\sigma}{T_o} = \frac{181.4}{100.8} = 1.79, \quad (13)$$

The required number of spare parts was then determined using the probabilistic reliability criterion and the selected risk level. Thus, the calculated quantity represents not simply the average number of failed components, but the number of spare parts required to provide the specified probability of failure-free operation during the considered operating period.

For practical application, the calculated values were rounded upward to the nearest integer, since spare parts are discrete units and rounding downward could result in an insufficient stock level. Therefore, the adopted spare-parts quantity was determined according to:

$$N_{adopted} = \lceil N_{calculated} \rceil,$$

where $N_{calculated}$ is the calculated number of spare parts and $\lceil \cdot \rceil$ denotes rounding upward to the nearest integer.

Table 3 – Calculation of quantiles, Zhomart Mine

№	Component	Recorded failures	Quantile	Mathe-matical expectation	Standard deviation	Mean operating time	Coefficient of variation	Calcu-lated spare parts	Adopted spare parts
1	Stabbing system	3	0.181	167.4	181.4	100.8	1.79	3.61	4
2	Vehicle boom	152	0.468	167.4	181.4	100.8	1.79	162.68	163
3	Engine	137	0.433	167.4	181.4	100.8	1.79	146.37	147
4	Transmission	170	0.504	167.4	181.4	100.8	1.79	182.17	183
5	Transmission axle	65	0.288	167.4	181.4	100.8	1.79	69.29	70
6	Hydraulic system	700	0.9983	167.4	181.4	100.8	1.79	748.88	749
7	Electrical equipment	271	0.716	167.4	181.4	100.8	1.79	292.92	293
8	Brake system	76	0.309	167.4	181.4	100.8	1.79	80.97	81
9	Vehicle frame	151	0.464	167.4	181.4	100.8	1.79	161.55	162
10	Drilling equipment	125	0.409	167.4	181.4	100.8	1.79	133.45	134
11	Compressor	41	0.242	167.4	181.4	100.8	1.79	43.87	44
12	Other components	118	0.394	167.4	181.4	100.8	1.79	125.91	126

For the analyzed fleet, the mean operating time was calculated as T_o =100.8, while the coefficient of variation was determined as v=1.79.

The analysis of the recorded failures at the Zhomart mine demonstrates a pronounced non-uniformity in the distribution of failures among the main elements of heavy-duty mining vehicles. The highest number of failures was recorded for hydraulic systems (700 cases), followed by electrical equipment (271 cases), transmission units (170 cases), vehicle booms (152 cases), and vehicle frames (151 cases). Lower numbers of failures were observed for drilling equipment (125 cases), other components (118 cases), brake systems (76 cases), transmission axles (65 cases), compressors (41 cases), and stabbing systems (3 cases).

The obtained distribution indicates that hydraulic, electrical, and transmission systems represent the most significant sources of equipment failures under the operating conditions considered. The high number of hydraulic-system failures is particularly important from the maintenance-planning perspective because hydraulic components directly affect the operation of several functional systems of underground mining vehicles. Consequently, their failure may lead not only to replacement of individual components but also to increased equipment downtime.

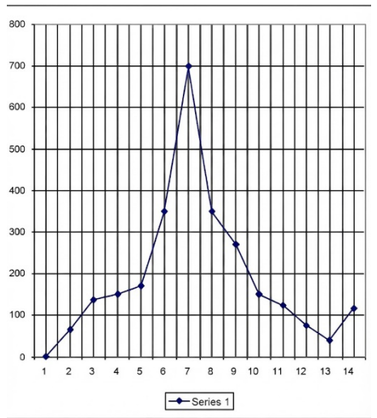
The probabilistic analysis provides an additional interpretation of the recorded failure statistics. The calculated quantiles demonstrate the position of each component within the overall failure distribution. Components with higher observed failure frequencies have correspondingly higher calculated requirements for spare parts. Thus, the hydraulic

system, which had the highest number of recorded failures, also produced the highest estimated spare-parts requirement.

The results show that the transition from observed failure statistics to spare-parts requirements should be based on a specified reliability criterion rather than on the recorded number of failures alone. The proposed procedure accounts for the variability of failure occurrence and allows the required stock level to be adjusted according to the selected probability of failure-free operation.

For practical maintenance planning, the calculated spare-parts quantities were rounded upward to integer values. This provides a conservative stock estimate and prevents a reduction in the required number of spare parts caused by mathematical rounding.

The obtained results can be used to prioritize spare-parts procurement and maintenance resources. In particular, the largest calculated requirements correspond to hydraulic systems, electrical equipment, and transmission-related components. This allows maintenance personnel to focus inventory management and preventive maintenance measures on the components that contribute most substantially to equipment downtime.



3 – stabbing system; 137 – engine; 152 – vehicle boom; 170 – transmission;
65 – transmission axle; 700 – hydraulic system; 271 – electrical equipment;
151 – vehicle frame; 125 – drilling equipment;
76 – brake system; 41 – compressor; 118 – other components
Figure 3 – Distribution of failures of the main components of heavy-duty mining vehicles

The calculated spare-parts requirements were determined using the failure distribution and the specified probability of failure-free operation. The resulting estimates are presented in Table 3.

The scientific novelty of the study lies in the quantitative characterization of the failure distribution of the main elements of heavy-duty underground mining vehicles

under the specific operating conditions of the Zhomart mine. The study identifies the components that make the greatest contribution to the observed failure statistics and establishes their position within the overall normal-distribution model using standardized values and quantiles.

In contrast to maintenance planning based solely on average failure frequencies, the proposed approach combines actual failure statistics with the variability of failures and a specified probability of failure-free operation. This makes it possible to transform failure observations into a quantitative estimate of the required spare-parts stock and provides a probabilistic basis for maintenance and inventory planning.

Conclusion

The study analyzed the distribution of failures of the main elements of heavy-duty underground mining vehicles operating at the Zhomart mine. Based on the recorded failure data, the parameters of the normal distribution were determined, including the mathematical expectation, standard deviation, and standardized quantiles.

The analysis demonstrated a non-uniform distribution of failures among the main vehicle components. The highest number of failures was recorded for hydraulic systems, electrical equipment, and transmission units. These components therefore require particular attention in maintenance planning and spare-parts management.

A probabilistic procedure was applied to transform the observed failure statistics into an estimate of the required number of spare parts for a specified probability of failure-free operation. Unlike a direct estimation based only on the average number of failures, the proposed approach takes into account the variability of the failure data and the selected reliability criterion.

The calculated spare-parts quantities were rounded upward to the nearest integer because spare parts are discrete units. This provides a conservative estimate of the stock required to maintain the specified level of failure-free operation.

The proposed approach can be applied to maintenance and inventory planning for underground mining vehicles under comparable operating conditions. Its practical value consists in establishing a direct quantitative relationship between the observed failure structure of mining equipment and the required stock of spare components, thereby supporting the reduction of equipment downtime and improvement of maintenance efficiency.

REFERENCES

1 **Рембеза А. И.** Надежность и эффективность в технике (Reliability and Efficiency in Engineering). – М. : Советское радио, 1986. – 368 с.

2 **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

3 **Гнеденко Б. В.** Курс теории вероятностей. – М. : Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.

4 **Коваленко И. Н.** Надежность технических систем. – М. : Радио и связь, 1986. – 240 с.

5 **Болотин В. В.** Методы теории вероятностей и теории надежности в инженерных расчетах. – М. : Стройиздат, 1982. – 351 с.

6 **O'Connor P. D. T., Kleyner A.** Practical Reliability Engineering. – 5th ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2012. – 512 p.

7 **Elsayed E. A.** Reliability Engineering. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. – 688 p.

8 **Billinton R., Allan R. N.** Reliability Evaluation of Engineering Systems : Concepts and Techniques. – 2nd ed. – New York : Plenum Press, 1992. – 611 p.

9 **Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V.** Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 536 p.

10 **Smith D. J.** Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. – 9th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 436 p.

REFERENCES

1 **Rembeza, A. I.** Nadezhnost i effektivnost v tekhnike [Reliability and Efficiency in Engineering]. – Moscow : Sovetskoe Radio Publ., 1986. – 368 p.

2 **Venttsel, E. S.** Teoriya veroyatnostei [Probability Theory]. – Moscow : Nauka Publ., 1969. – 576 p.

3 **Gnedenko, B. V.** Kurs teorii veroyatnostei [Course of Probability Theory]. – Moscow: Editorial URSS, 2005. – 448 p.

4 **Kovalenko, I. N.** Nadezhnost tekhnicheskikh sistem [Reliability of Technical Systems]. – Moscow : Radio i Svyaz Publ., 1986. – 240 p.

5 **Bolotin, V. V.** Metody teorii veroyatnostei i teorii nadezhnosti v inzhenernykh raschetakh [Methods of Probability Theory and Reliability Theory in Engineering Calculations]. – Moscow: Stroyizdat Publ., 1982. – 351 p.

6 **O'Connor P. D. T., Kleyner A.** Practical Reliability Engineering. – 5th ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2012. – 512 p.

7 **Elsayed E. A.** Reliability Engineering. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. – 688 p.

8 **Billinton R., Allan R. N.** Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques. – 2nd ed. – New York : Plenum Press, 1992. – 611 p.

9 **Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V.** Reliability Engineering and Risk Analysis : A Practical Guide. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 536 p.

10 **Smith D. J.** Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. – 9th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. – 436 p.

Received 26.05.26.
Received in revised form 26.07.26.
Accepted for publication 25.08.26.

А. А. Ибраева[1], Ж. М. Қуанышбаев[2], Д. В. Капский[3]
[1,2]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]Беларусь ұлттық техникалық университеті,
Беларусь Республикасы, Минск қ.
26.05.26 ж. баспаға түсті.
26.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
25.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЕЗҚАЗҒАНЦВЕТМЕТ» КОРПОРАЦИЯСЫНЫҢ «ЖОМАРТ» КЕНІНДЕГІ АУЫР ЖҮК КӨЛІКТЕРІНІҢ ІСТЕН ШЫҒУ АҒЫНЫН ЗЕРТТЕУ

Жезқазған кен орны әлемдегі ірі мыс кенді өңірлердің бірі болып табылады және пайдалы қазбалардың едәуір қорларымен әрі одан әрі игерудің қолайлы перспективаларымен сипатталады. Кен орнының геологиялық және тау-кен техникалық жағдайлары ауыр жерасты тау-кен көлік құралдарын кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Тау-кен жұмыстарының жоғары деңгейде механикаландырылуы тау-кен жабдықтарының сенімділігіне, жөндеуге жарамдылығына және пайдалану дайындығына қойылатын талаптарды арттырады. Көлік құралдарының жекелеген компоненттерінің істен шығуы айтарлықтай тоқтап қалуға және өндірістік процестердің үздіксіздігінің бұзылуына әкелуі мүмкін. Сондықтан істен шығу деректерін талдау және қосалқы бөлшектерге қажеттілікті анықтаудың сандық тәсілдерін әзірлеу техникалық қызмет көрсетуді жоспарлауды жетілдіру үшін маңызды.

Осы зерттеуде Жомарт кенішінде пайдаланылатын ауыр тау-кен көлік құралдарының негізгі компоненттерінің істен шығу деректері қалыпты үлестірімге негізделген ықтималдық тәсіл арқылы талданды. Істен шығу үлестірімінің параметрлерін анықтауға және берілген ақаусыз жұмыс істеу ықтималдығын қамтамасыз ету үшін қажетті қосалқы бөлшектердің санын бағалауға ерекше назар аударылды.

Кілтті сөздер: істен шығу үлестірімі, ауыр тау-кен көлік құралдары, қалыпты үлестірім, математикалық күтім, стандартты ауытқу, квантиль, қосалқы бөлшектер.

А. А. Ибраева[1], Ж. М. Қуанышбаев[2], Д. В. Капский[3]
[1,2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва,
Республика Казахстан, г. Астана;
[3]Белорусский национальный технический университет,
Республика Беларусь, г. Минск.
Поступило в редакцию 26.05.26.
Поступило с исправлениями 26.07.26.
Принято в печать 25.08.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА ОТКАЗОВ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ РУДНИКА «ЖОМАРТ» КОРПОРАЦИИ «ЖЕЗКАЗГАНЦВЕТМЕТ»

Жезказганское месторождение является одним из крупнейших меднорудных регионов мира и характеризуется значительными запасами полезных ископаемых и благоприятными перспективами дальнейшего освоения. Геологические и горнотехнические условия месторождения создают предпосылки для широкого применения тяжёлых подземных горных транспортных средств. Высокая степень механизации горных работ предъявляет повышенные требования к надёжности, ремонтопригодности и эксплуатационной готовности горного оборудования. Отказы отдельных компонентов транспортных средств могут приводить к значительным простоям и нарушению непрерывности производственных процессов. Поэтому анализ данных об отказах и разработка количественных подходов к определению потребности в запасных частях имеют важное значение для совершенствования планирования технического обслуживания.

В настоящем исследовании проанализированы данные об отказах основных компонентов тяжёлых горных транспортных средств, эксплуатируемых на руднике Жомарт, с использованием вероятностного подхода, основанного на нормальном распределении. Особое внимание уделено определению параметров распределения отказов и оценке количества запасных частей, необходимых для обеспечения заданной вероятности безотказной работы.

Ключевые слова: распределение отказов, тяжёлые горнотранспортные средства, нормальное распределение, математическое ожидание, стандартное отклонение, квантиль, запасные части.

ҒТАМР 55.16.19

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/88-100

М. Е. Исаметова[1], Е. С. Ильясов[2], *Н. Қ. Толунбеков[3], Д. Е. Ткаченко[4]

[1,2,3,4]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университет, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4630-271X

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2375-2617

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7219-4199

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9148-3612

*e-mail: tolunbekov@mail.ru

MIMICS ЖӘНЕ MSC PATRAN БАҒДАРЛАМАЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ВТ1-0 ТИТАН ҚОРЫТПАСЫНАН ОСТЕОСИНТЕЗГЕ АРНАЛҒАН ЖАҢА ПЛАСТИНАЛАРДЫ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ТАЛДАУ

Мақала білек сүйегінің дистальды бөлігінің сынықтарын емдеуде қолданылатын остеосинтездік пластиналардың құрылымын инженерлік және технологиялық талдауға негізделген. Зерттеудің мәселесі әдеттегі титаннан жасалған импланттардың сүйек тінімен жанасудағы биомеханикалық сәйкессіздіктің негізінде туындады. Mimics, PATRAN/MARC, соңғы элемент әдісі СЭӘ осы аталған бағдарламаларда модельдеу мен кернеулі-деформацияланған күйді соңғы элементтер әдісінде талдау жүргізілді. Зерттеу кезінде сүйек құрылымының 3D моделі 60-80 жас аралығындағы пациенттердің КТ деректері Mimics бағдарламасында өңделді. Антропометриялық өлшеулер негізінде 11 градус иіні мен бекіту тесігі 5 градус бұрышпен оңтайландырылған пластинаның құрылымы дайындалды.

NASTRAN/PATRAN бағдарламасы мен СЭӘ әдісімен есептеулер жүргізіліп пластикалығы жоғары ВТ1-0 таза техникалық титанының иілуі мен бұралуы кезіндегі төзімділігі анықталды. Лазерлік және электр эрозиялық кесу әдістерін салыстыру кезінде лазерлік өңдеу бет сапасының жоғарырақ көрсеткіштерін көрсетті. Осы себепті волярлық пластиналарды дайындауда аталған технологияны қолдану тиімді деп санаймыз. Зерттеулердің нәтижелеріне қарай биоүйлесімді пластиналы имплантарды дайындауда ВТ1-0 таза техникалық титанының ерекшелігін дәлелдейді.

Пластинаның ерекше биоүйлесімділігі, коррозияға төзімділігі мен икемділігінің төмендігі остеосинтез пластиналарын өндіру үшін дұрыс шешім екені анықталды. Сонымен қатар медицинада кеңінен қолданылатын легирленген титан қорытпасымен салыстырғанда білек сүйегінің серпімділігіне сәйкес келетіндігі, уытты бөлмейтіндігі ерекше орын алды.

Кілтті сөздер: имплантат, остеосинтез, кернеулі-деформацияланған күй, ВТ1-0 техникалық титан, биомеханика, сүйек тіндері, пластина.

Кіріспе

Остеосинтез әдісі травматология мен ортопедияда сынықтарды емдеудің ең маңызды қызметін атқарады, пластинаның жоғары беріктігімен, биоүйлесімділігімен ерекшеленетін қорытпаның түрі болып саналады. Имплантаттың серпімділік қасиеті 110 ГПа шамасында болса, ал адам білек сүйегінің серпімділік көрсеткіші 15-25 ГПа құрайды, сонымен бірнеше есе жоғары екені байқалады. Бұл айырмашылық механикалық үйлесімділікке сәйкес келмейді, соның салдарынан кернеу эффектісінің шоғырлануына алып келеді, ВТ1-0 таза титаны серпімділік модулі 102–108 ГПа, аққыштық шегі $\sigma_{0,2}$ 290–390 МПа, беріктік шегі σв 450–550 МПа, ал титан Ti-6Al-4V серпімділік модулі 110–120 ГПа, аққыштық шегі $\sigma_{0,2}$ 800–900 МПа, беріктік шегі σв 860–1000 МПа [1].

ВТ1-0 және Ti-6Al-4V серпімділік модулінің мәндеріне жақын шамамен 110 ГПа, ал кортикальды білек сүйегінің серпімділік модулі шамамен 15–25 ГПа құрайды. Осылайша, титан имплантаты сүйек тініне қарағанда бірнеше есе қатты, бұл сүйек–пластина жүйесінің механикалық үйлесімділігін төмендетеді. Алайда, материалдың қасиеттеріндегі айырмашылықтан басқа, пластинаның геометриясы да маңызды рөл атқарады: сәйкес келмейтін пішінде, артық қалыңдықта немесе қиманың біркелкі бөлінбеуінде пластина қаттылықтың жергілікті аймақтарын құра алады. Сыртқы жүктеме кезінде бұл кернеулердің біркелкі бөлінбеуіне, олардың саңылаулар, бұрандалар және сыну аймағындағы шоғырлану әсерінің жоғарылауына әкеледі. Сондықтан имплантты оңтайландыру материалды таңдауды ғана емес, сонымен қатар сүйекке жүктеменің біркелкі берілуін қамтамасыз ететін пластинаның геометриялық параметрлерін де ескеруі керек.

Механикалық жүктеменің артуына байланысты білек сүйегі нығаяды, яғни резорбцияға ұшырайды бұл үдеріс Вольф заңына сай келеді [2]. Имплантат қатаң болған сайын физиологиялық жүктемені өзіне алады, осы кезде сүйек тіні жүктемеден ажырап резорбцияға ұшырайды. Бұл үдерісте имплантат босаңсып, сынықтың жазылуы баяулайды және оңалу уақыты біршама ұзарады.

Сонымен қатар қазіргі уақыттағы бірыңғайландырылған күрделі пластиналар адамның білек сүйегіне дәл сәйкес келмеуіде маңызды мәселе болып отыр. Хирургиялық операция жасау кезінде біршама қиындықтар туғызады мысалы ию, түзету т.с.с.

Ота жасау кезіндегі кедергілер:

– Ота жасау уақытының созылуы;

– Сапасыз пластина, ондағы ішкі кернеулер, шаршауға төзімділігін төмендетеді [3];

– Орнатудың төмендігі, ота жасау уақыты, сонымен қатар инфекциялық аурулардың таралуы.

Осы мәселеге байланысты ВТ1-0 маркалы таза техникалық титанды пайдалану – оның төмен серпімділік қасиетімен мен жоғары икемділігінің арқасында сүйек пен имплантат арасындағы биомеханикалық тепе-теңдікті сақтаудың оңтайлы әдісі болып табылады. Имплантаттың сүйекпен максималды байланысын қамтамасыз ету үшін, емделушінің жеке антропометриялық ерекшеліктерін ескере отырып,

ВТ1-0 титан қорытпасынан алынатын дайындама - анатомиялық пластинаны оңтайландыру болып табылады [4].

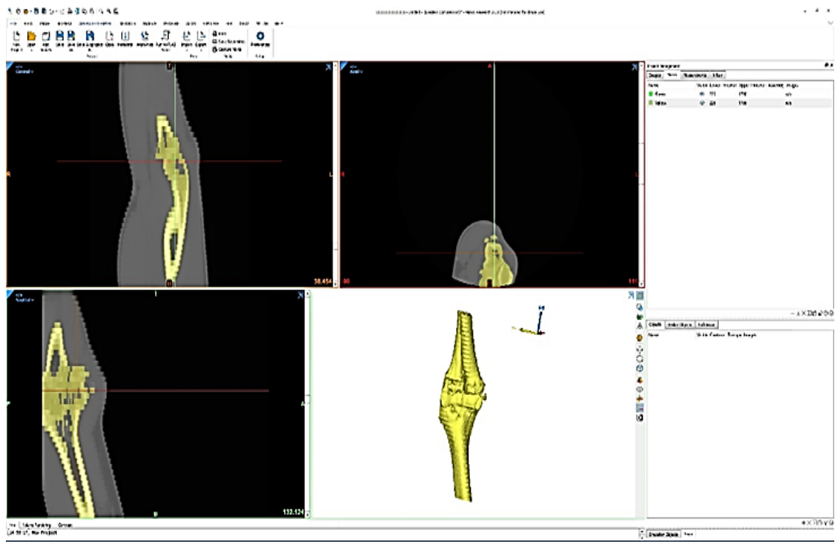
Зерттеу нысаны-дистальды радиустың сынуын біріктіруге арналған волярлық пластина.

Зерттеудің мақсаттары мен міндеттері геометриялық сәйкестік принципі бойынша волярлық пластинаны инженерлік және технологиялық талдау, сүйектің бірігу жағдайын қанағаттандыру үшін жасалған пластинаның беріктігі мен қозғалысын тексеру, сонымен қатар одан әрі қалыптау және өңдеу үдерісі үшін алғашқы дайындамаларды алу.

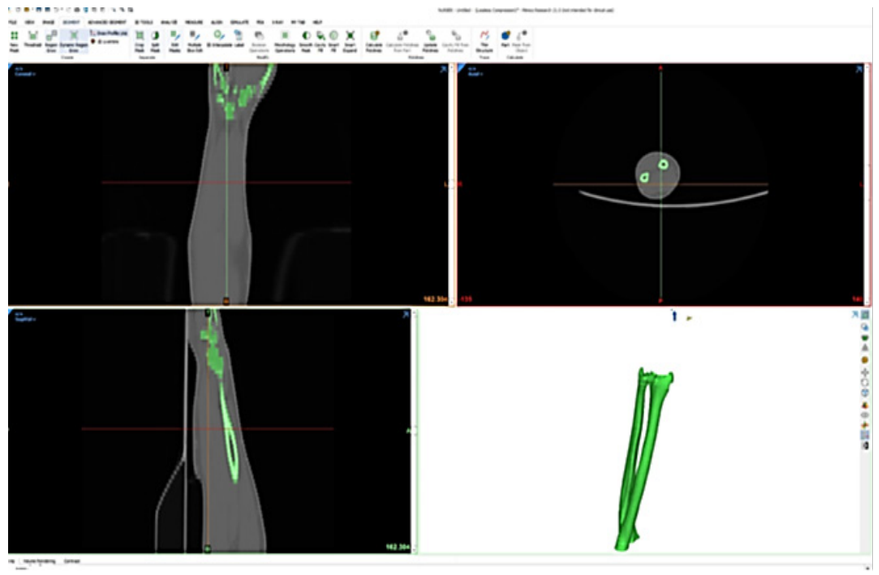
Материалдар мен әдістері

Зерттеу барысында төмендегі компьютерлік бағдарламалық кешендер мен материалдар пайдаланылды:

Пластиналарды компьютерлік CAD модельдеу, Компьютерлік томография және ультрадыбыстық бейнелердің графикалық деректерін жоғары сапалы цифрлық модельдерге түрлендіру үшін Mimics әмбебап бағдарламалық кешенінде жүргізілді [5;6]. 1 және 2-суретте Mimics бағдарламалық кешенінің терезелері және КТ деректеріне негізделген білек сүйектерін сегменттеу операциясының бейнелеу фрагменттері көрсетілген.



1-сурет – Білек пен иық сүйектерінің сегментациясын бейнелейтін Mimics бағдарламасының терезесі



2-сурет – Mimics бағдарламасының терезесі, білек кескіндерінің КТ сегментация процесін көрсетеді

Биомедициналық модельдеу 60-80 жас аралығындағы 10 пациенттің КТ деректері негізінде білек сүйегінің 3D модельдері Mimics бағдарламасында құрастырылды. CAD-модельдеу КТ және ультрадыбыстық кескіндердің графикалық мәліметтерін жоғары сапалы цифрлық модельдерге түрлендіру үшін Mimics әмбебап бағдарламалық кешенінде пластиналарды компьютерлік CAD-модельдеу (сурет 1,2). Mimics бағдарламасының мақсаты - Mimics (Materialise Interactive Medical Image Control System) – медициналық кескіндерді (КТ) өңдеуге және олардың негізінде жоғары дәлдіктегі 3D модельдерді құрастыруға арналған мамандандырылған бағдарлама [5; 6]. Ол медициналық диагностика мен инженерлік жобалау арасындағы негізгі байланыстырушы буын болып табылады.

DICOM форматтың негізгі мүмкіндіктері -деректерді импорттау компьютерлік томография (КТ) және басқа да сканерлеу әдістерінің нәтижелерімен жұмыс істеу. Сегментация - тіндердің тығыздығына негізделе отырып, нақты тіндерді (сүйектер, тамырлар, жұмсақ тіндер, ісіктер) бөліп алу. Жоғары дәлдіктегі 3D-модельдеу пациенттің бірегей анатомиясын дәл қайталайтын көлемді модельдер құру. Өлшеу құралдары тікелей модель үстінде дәл антропометриялық өлшемдерді (қашықтықтар, бұрыштар, көлемдер) жүргізу. Инженерлік БҚ-ға экспорттау модельдерді NASTRAN, PATRAN сияқты бағдарламаларда одан әрі талдауға дайындау.

Жұмыстың орындалу реті. Mimics-те модель құру процесі әдетте келесі алгоритм бойынша жүзеге асады:

1 Деректерді жүктеу: Бағдарламаға DICOM форматындағы қималар жиынтығы жүктеледі. Бағдарлама оларды үш проекцияға тұрғызады: аксиалды, фронталды және сагиталды.

2 Табалдырықты орнату: Пайдаланушы тіндердің тығыздық диапазонын белгілейді. Мысалы, сүйекті бөліп алу үшін жоғары тығыздық мәндері таңдалады. Осы диапазонға түсетін барлық пиксельдер ерекшеленеді.

3 Масканы редакциялау: Бір сүйекті екіншісінен ажырату немесе кедергілерді шуларды жою үшін «Region Growing» (аймақтың ұлғаюы) құралдары қолданылады. Қажет болған жағдайда бөлек қималарда қолмен түзету жүргізіледі.

4 3D-нысанды генерациялау: Өңделген маска негізінде бағдарлама нысанның үш өлшемді геометриясын есептейді. Осы кезеңде полигоналды тор (STL-модель) құрылады.

5 Тегістеу және оңтайландыру: Медициналық кескіндердің белгілі бір қадамы (түйіршіктілігі) болатындықтан, модельдің беті сатылы болып шығуы мүмкін. Mimics анатомиялық дәлдікті жоғалтпай, модельді тегістеуге мүмкіндік береді.

6 Басып шығару: Имплантатты остеосинтез пластинасын тікелей сүйек бетінде жобалау үшін 3-matic модуліне беріледі, немесе дайын модель 3D-басып шығару форматтарында (STL) сақталады.

Үш өлшемді модельдеу нәтижесінде дистальды радиустың орташа анатомиялық қисаюы анықталды. Пластинаның геометриясының сүйектің кортикальды қабатымен үйлесімділігін және буын бетінің анатомиялық ерекшелігін ескере отырып, остеосинтезге арналған волярлық пластинаның жетілдірілген құрылымы жасалды (3-сурет).



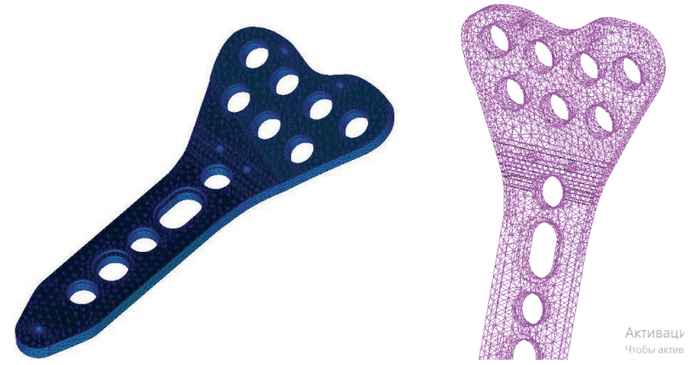
3-сурет – Волярлық пластиналардың оңтайландырылған құрылымы

Т-үлгісіне ұқсас пластиналардың ерекшелігі – мұндағы пластинаның дистальды аймағы саңылау ойығымен және иілу бұрышы 11 градуспен иіліп анатомиялық иінімен сәйкес келтірілген, тесіктер 5 градус бұрышпен, ал диаметрі 2,8 мм жасалған, екі қатарда орналасқан конусты бұрандасы бар.

Бұл бірыңғайландырылған остеосинтездік пластина жүктемелерді бірқалыпты таратып, сүйек бетіне нық отырады.

Әзірленген пластинаның беріктігін бағалау үшін NASTRAN/PATRAN 2021 бағдарламасындағы соңғы элементтер әдісіне негізделген инженерлік талдау жүргізілді. Механикалық есептеу схемасы жүктемені қамтыды қысу, бұралу және иілу. ВТ1-0 материалының механикалық параметрлері титанның серпімділік модулі ретінде берілген $E=1{,}1 \cdot 10^{11}$ Па, Пуассон коэффициенті $\nu=0.3$; сүйек буынына түсетін күштер 100 Н, ию моменті 1–3 Нм, көлденең күш 100 Н.

Модель 82000 төрт түйінді тетраэдрлік элементтермен жақындастырылды. Элементтің ең кіші өлшемі 0,002 м болды, бұл пластина құрылымының ең кіші геометриялық параметріне сәйкес келеді. Бұрандалы саңылаулар мен өтпелі аймақтардағы кернеу концентрациясы аймақтарында тордың жергілікті қалыңдауы орындалды. (4-сурет)



4-сурет – Пластина моделінің соңғы элемент торы

Соңғы элементтің мөлшері зерттелетін аймақтың геометриялық күрделілігіне байланысты өзгеріп отырды және 0,004-тен 0,002 м-ге дейін болды. Кернеу концентрациясы аймақтарында, атап айтқанда бұрандалы тесіктер мен құрылымның өтпелі учаскелеріне жақын жерде тордың жергілікті қалыңдауы орындалды. Есептеу параметрлерінде SOL 120 шешуші таңдалды, есептеу түрі статикалық.

Сонымен қатар кесу кезінде DK 7763 маркалы электр эрозиялық сым кесетін станокта және XT-H1530 маркалы лазерлік кесуге арналған жабдықта технологиялық параметрлерде лазерлік кесу ең тиімді болып табылатын эксперименттік сынақтар нәтижесінде алынған дайындамалар кесілді. Үдеріс параметрлері сәйкесінше 1 және 2 кестелерде келтірілген.

1-кесте – Электр эрозиялық сымды кесудің технологиялық параметрлері

Параметр	Шама
Ең жоғары ток	6 А
Кернеу	70 В
Импульса ұзақтығы	8 мкс
Импульс арасындағы үзіліс	25 мкс
Беру жылдамдығы	18 м/мин
Сым тарту күші	20 Н

2-кесте – Лазерлік кесудің технологиялық параметрлері

Параметр	Шама
Лазер қуаты	1500 Вт
Кесу жылдамдығы	3 м/мин
Азот қысымы	12 бар

5-суретте Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ-дың «Машина жасау» кафедрасының зертханасында орнатылған DK 7763 маркалы станокта электр эрозиялық сым кесу станоктарының және XT-H1530 маркалы лазерлік кесуге арналған жабдықтардың суреттері көрсетілген.

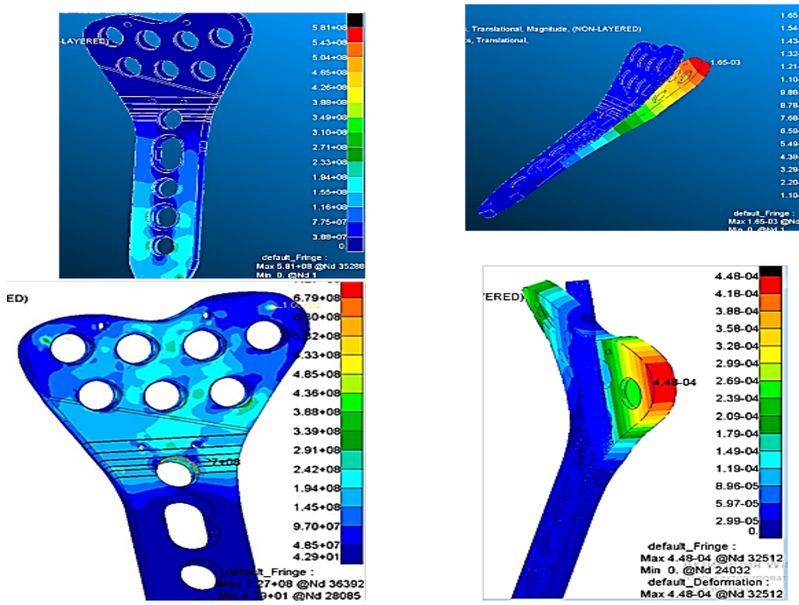


а б

5-сурет – а – DK 7763 электр эрозиялық сым кесу станогы,
б – XT – H 1530 талшықты лазерлік табақша кесу станогы

Нәтижелер және талқылау

Статикалық есептеу нәтижелері бойынша кернеулер мен орын ауыстырулардың таралу өрістері жасалды, олардың негізінде пластинаның кернеулі-деформацияланатын күйінің диаграммалары жасалды.



6-сурет – Кернеу мен орын ауыстыру диаграммасы

СӘӘ бағдарламасын қолдану пластинаның жанасуы, геометриясы, материалының қасиетін талдауда жоғарғы мәнін берді. Сонымен қатар СӘӘ бағдарламасы, NASTRAN/PATRAN титан пластиналарының кернеулі-деформацияланған күйін зерттеудің құралы болып отыр [7;8].

Пластинаның иілу кезіндегі нәтижесі:

– кернеулі-деформацияланған күйі $\sigma_{мах}$ = 381 МПа,

– сынық аймағындағы орын ауыстыру $y_{мах}$ = 0,002 м;

Бұралу деформациясы кезінде:

– кернеулі-деформацияланған күйі $\sigma_{мах}$ = 379 МПа,

– сынық аймағындағы орын ауыстыру $y_{мах}$ = 0,004 м.

Бұл көрсеткіштер беріктікпен қатаңдыққа сәйкес келеді, сонымен қатар сүйектің уақытында жазылуына әсер етеді. Ал титан маркасының Ti-6Al-4V беріктік шегі $\sigma_в$=860 МПа құрайды. Сол себепті беріктік шегі σв=500 МПа болатын ВТ1-0 титан маркасы биоүйлесімділігі жағынан, әрі иілімділігі жоғары және аз жүктеме түсетін құрылымдарда қолдануға болады [11].

ВТ1-0 маркалы титанның жоғары технологиялық қасиеттері, оның икемділігін, аққыштығы мен қалыптау жұмысын жеңілдетеді.

Титан қорытпаларын салыстыратын болсақ, титан ВТ1-0 илемдеу кезінде TI-6Al-4V титанына қарағанда аз күш жұмсалады және жарықшақтар азаяды, бұл өндіріс процесін жеңілдетеді.

Остеосинтез пластиналарын жасау үшін қолайлы материал оның биоүйлесімділігі мен икемділігі болып саналады. Осылайша, танымал

TI-6AL-4V титан қорытпасымен салыстырғанда беріктігі төмен және жүктемесі жоғары құрылымдауда қолдану оны біршама шектейтіні анықталды. ВТ1-0 маркалы техникалық титан парағынан пластинаны дайындау (кесу) зерттеу нәтижелері бойынша алынды.

Шектеулі қалыптау қабілеті мен бөлме температурасындағы серпілістерді салыстырған кезде, зерттеулер Ti-6Al-4V сияқты танымал титан қорытпаларының стандартты суықтай қалыптау кезінде қалыптасу қабілетінің шектеулі екенін және серпімді қалпына келтіруге (серіппелі) жоғары бейімділігін көрсетті.

Күрделі геометриялы пішіндерді жылу термиялық әдіс тәсілдерсіз де қалыптауға болатынын көрсетеді. Жұқа биомедициналық компоненттер үшін бұл мәселе негізгі қиындық болып қала береді [12].

Жұмыстарға сәйкес [12,13], электроэрозиялық кесу кезінде титан оксидтерінің түзілуі және бетінің түсінің өзгеруі кристалдану, жылу қабатының өзгеруі және оның жергілікті балқу температурасының әсерінен болады. Мұндай қабаттың өзгеруінен химиялық, механикалық өңдеуді қажет етпейтін микрокеуектер пайда болады. Электроэрозиялық кесу кезінде термиялық жаңартылған қабаттың қалыңдығы 5-20 мкм (кейде 50 мкм дейін) құрайды. Жергілікті қатаю, микрокеуектердің пайда болуы және құрылымдық өзгерістер болуы мүмкін (α → β → кері).

Лазерлік кесу кезінде жылу әсер ететін аймақ бар, бірақ әдетте қалыңдығы ~10-50 мкм электрлік эрозиялық кесуге қарағанда ақаулары аз. Электроэрозиялық жабдықпен кесу кезінде шаршауға, төзімділікке, тотқа және беттің биологиялық үйлесімділігіне әсер ететін кемшіліктер бар [14].

Екі түрлі кесуді қолданған кезде де, бұл медициналық пластиналар биоүйлесімділік пен шаршауға төзімділікті арттыру үшін механикалық өңдеуге тура келеді. 7-суретте ВТ1 - 0 маркалы электроэрозиялық сыммен және лазермен кесілген титан табағынан алынған дайындамалар келтірілген.



7-сурет – Титан табағынан волярлы пластина дайындау

Тәжірибе көрсеткендей дайындаманы кесу, электроэрозиялық кесу әдісі бетінде термиялық өзгерген аймақтың пайда болуына және 50 мкм-ге дейінгі микро жарықтардың пайда болуына әкеледі[15]. Екінші әдіс-лазерлік кесу кезінде жоғары концентрацияланған энергия ағыны бетінің тазалығы мен биоүйлесімділігін сақтай отырып, металл құрылымын минималды деңгейде өзгертеді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті AP26199207 қаржыландырған «Остеосинтезге арналған жекелендірілген және біртұтас пластиналарды инновациялық өндірудің биоинженерлік сандық дизайны» гранттық тақырыбы аясында орындалды.

Қорытынды

Анатомиялық сәйкестік Mimics бағдарламасында жүргізілген 3D модельдеу нәтижесінде егде жастағы адамдардың білек сүйектерінің орташаланған геометриялық параметрлері алынды, бұл интраоперациялық түзетуді қажет етпейтін құрылым жасауға негіз болды.

Биомеханикалық оңтайландыру ВТ1-0 титанынан жасалған оңтайландырылған құрылымдар кернеуді экрандау әсерін төмендетіп, жүктеменің сүйекке физиологиялық тұрғыдан дұрыс берілуін қамтамасыз етеді.

Өндірістік тиімділік лазерлік кесу технологиясын қолдану электр эрозиялық әдіспен салыстырғанда бұйымның шаршауға төзімділігін арттырып, беткі қабаттың бүтіндігін сақтайды.

REFERENCES

1 **Hsuan Chih Liu, Jin-Siou Jiang, Chun-Li Lin.** Biomechanical investigation of a novel hybrid dorsal double plating. for distal radius fractures by integrating topology optimization and finite element analysis // International Journal of Nanomedicine. – 2020. – Vol. 51. – Issue 6. – P. 1271–1280. – https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.03.011

2 **Andrew J. Teichtahl, Anita E. Wluka, Pushpika Wijethilake, Yuanyuan Wang, Ali Ghasem-Zadeh and Flavia M.** Cicuttini Wolff's law in action : a mechanism for early knee osteoarthritis . Teichtahl et al. // Arthritis Research & Therapy. – 2015. – Vol. 17. – Art. 207. – https://doi.org/10.1186/s13075-015-0738-7

3 **Disseldorp D. J., Hannemann P. F., Poeze M., Brink P. R.** Dorsal or volar plate fixation of the distal radius: does the complication rate help us to choose? // Journal of Wrist Surgtry – 2016. – Vol. 5. – P. 202–210. – https://doi.org/10.1055/s-0036-1571842

4 **Li CH, Wu CH, Lin CL.** Design of a patient-specific mandible reconstruction implant with dental prosthesis for metal 3D printing using integrated weighted topology optimization and finite element analysis // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2020. – Vol. 105. – Art. 103700. – https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103700

5 **Niek Wijnen, Lars Brouwers, Erik Groot Jebbink, Jan M. M. Heyligers, Mike Bemelman.** Comparison of segmentation software packages for in-house 3D

medical models // Journal of Medical Imaging/ –2021. – Vol. 8. Isses 3. – Art. 034004. – https://doi.org/10.1117/1.JMI.8.3.034004

6 **Soeli T. Fiorini(&)Leonardo Frajhof, Bruno Alvares de Azevedo, Jorge R. Lopes dos Santos, Heron Werner, Alberto Raposo and Carlos José Pereira de Lucena.** Three-Dimensional Models and Simulation Tools Enabling Interaction and Immersion in Medical Education // DUXU 2015, Part III. – Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 9188. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – P. 662–671. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-20889-3_61

7 **Jaroslaw Chodor, Kukielka Leon, Grzegorz Chomka, Lukasz Bohdal, Radoslaw Patyk, Marek Kowalik, Tomasz Trzepieciński, Andrii M. Radchenko.** Using the FEM Method in the Prediction of Stress and Deformation in the Processing Zone of an Elastic / Visco-Plastic Material during Diamond Sliding Burnishing // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 3. – Art. 1963. – https://doi.org/10.3390/app13031963

8 **Chandra Mohana Reddy G, Safeeruddin Khan, Abdul Saddique Shaik and Murali Krishna CH.** Performing FEM Analysis to Evaluate the Static and Thermal Characteristics of a Piston // MATEC Web of Conferences. – 2024. – Vol. 405. – Art. 03007/ (ICASMMT 2024). – https://doi.org/10.1051/matecconf/202440503007

9 **Isametova, M. E., Martyushev, N. V., Abilkaiyr, Zh., Tursynbayeva, A., Abilezova, G.** Determination of Residual Stresses in 3D-Printed Polymer Parts // Polymers. – 2024. – Vol. 16, № 14. – Art. 2067. – https://doi.org/10.3390/polym16142067

10 **Balgayev, D., Isametov, Aisen., Balgynova, A., Tkachenko, D., Isametova, M., Zaurbekov, S., Sarybayev, Y.** Numerical Modeling of Hydrodynamic Performance in an Advanced Rod Pump Valve Design // Applied Sciences. – 2026. – Vol. 16. – Art. 5555. – https://doi.org/10.3390/app16115555

11 **Dobrzańska-Danikiewicz, A. D., Bączyk, A.** A review of new Ti-based materials manufactured in situ for biomedical applications // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2023. – Vol. 121. – № 2 (extended). – Art. 18. – https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.2844

12 **Pramanik, A.** Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 86. –P. 44–61. – https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.07.003

13 **Pramanik, A., Basak, A. K.** Effect of wire electric discharge machining (EDM) parameters on fatigue life of Ti-6Al-4V alloy // International Journal of Fatigue. – 2019. Vol. 128. – Art. 105186. – https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2019.105186

14 **Umashanker Gupta, Jalaj Kumar, Deepak Kumar.** Effect of EDM and milling on high cycle fatigue life of Ti-6Al-4V alloy specimen // Manufacturing Technology Today. – 2024. – Vol. 23. – № 1–2. – P. 1–8. – https://doi.org/10.58368/MTT.23.1-2.2024.1-8

15 **Gvozdev, A. E., Sergeyev, N. N., Minayev, I. V., A. G. Kolmakov, I. V. Tikhonova, A. N. Sergeyev, D. A. Provotorov, D. M. Khonelidze, D. V. Maliy & I. V. Golyshev.** Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for

steel sheets after laser cutting // INORGANIC MATERIALS: APPLIED RESEARCH. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 148–152. – https://doi.org/10.1134/S2075113317010178

16.04.26 ж. баспаға түсті.
22.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

М. Е. Исаметова[1], Е. С. Ильясов[2], *Н. Қ. Толунбеков[3], Д. Е. Ткаченко[4]
[1,2,3,4]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 16.04.26.
Поступило с исправлениями 22.04.26.
Принято в печать 02.08.26.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ НОВЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА ИЗ СПЛАВА ВТ1-0 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ MIMICS И MSC PATRAN

Данная исследовательская работа посвящена комплексному совершенствованию остеосинтетических пластин, применяемых при лечении переломов дистального отдела лучевой кости. Актуальность исследования обусловлена необходимостью устранения механического диссонанса между традиционными титановыми имплантатами и костной тканью (эффект «защитного экранирования напряжений»). В статье рассматривается комплексный подход, включающий КТ-моделирование в среде Mimics, а также анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов в программных комплексах PATRAN/MARC. В ходе исследования были обработаны DICOM-данные пациентов возрастной категории 60–80 лет, на основе которых в программе Mimics сконструированы трехмерные модели костных структур. На базе проведенного антропометрического анализа была разработана оптимизированная конструкция пластины с анатомическим изгибом в 11 градусов и фиксирующими отверстиями, ориентированными под углом 5 градусов. Биомеханические расчеты, выполненные методом конечных элементов (FEA) в системе NASTRAN/PATRAN, подтвердили предел прочности пластины из титана марки ВТ1-0 при нагрузках на изгиб и кручение. Кроме того, был проведен сравнительный анализ лазерного и электроэрозионного (EDM) методов резки заготовок, в результате которого выявлена высокая эффективность лазерных технологий для обеспечения качества поверхности и сохранения биосовместимости. Результаты проведенных изысканий полностью обосновывают значимость применения технически чистого титанового сплава марки ВТ1-0 для производства биосовместимых имплантатов с оптимизированной геометрией. Исключительная биосовместимость, коррозийная стойкость и низкий модуль упругости данного материала определяют его как незаменимое и эффективное решение в производстве современных пластин для остеосинтеза.

Ключевые слова: имплантат, остеосинтез, напряженно-деформированное состояние, технический титан ВТ1-0, биомеханика, костные ткани, пластина.

M. E. Isametova[1], E. S. Il`yasov[2], *N. K. Tolunbekov[3], D. E. Tkachenko[4]
[1,2,3,4]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 16.04.26.
Received in revised form 22.04.26.
Accepted for publication 02.08.26.

COMPUTER MODELING AND ENGINEERING ANALYSIS OF NEW PLATES FOR OSTEOSYNTHESIS FROM VT1-0 ALLOY USING MIMICS AND MSC PATRAN PROGRAMS

This research paper is devoted to the comprehensive improvement of osteosynthetic plates used in the treatment of fractures of the distal radius. The relevance of this study is driven by the urgent need to mitigate the mechanical mismatch between conventional titanium implants and bone tissue, commonly known as the "stress shielding" effect. The paper details an integrated approach involving CT modeling within the Mimics environment and Finite Element Analysis (FEA) of the stress-strain state using PATRAN/MARC software. During the study, DICOM data from patients aged 60–80 were processed in Mimics to generate high-fidelity 3D models of bone structures. Based on this anthropometric analysis, an optimized plate design was developed, featuring an 11-degree anatomical contour and fixation holes oriented at a 5-degree angle. Biomechanical simulations performed via FEA in the NASTRAN/PATRAN system verified the ultimate strength of the VT1-0 titanium plate under bending and torsional loads. Furthermore, a comparative analysis between laser cutting and Electrical Discharge Machining (EDM) was conducted, identifying laser technology as the superior method for maintaining surface integrity and biocompatibility. The findings provide a robust justification for the use of VT1-0 commercially pure titanium alloy in the production of biocompatible implants with optimized geometries. Its exceptional biocompatibility, superior corrosion resistance, and low elastic modulus distinguish it as an indispensable and highly efficient solution for modern osteosynthesis plate manufacturing.

Keywords: implant, osteosynthesis, stress-strain state, VT1-0 technical titanium, biomechanics, bone tissues, plate.

SRSTI 55.13.17
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/101-118

A. Zh. Kassenov[1], *D. A. Iskakova[2], Zh. K. Mussina[3], A. S. Yanushkin[4]
[1,2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[1]Kazakh National University of Water Management and Irrigation, Taraz;
[4]Chuvash State University, Chuvash Republic, Cheboksary.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1439
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3104-4818
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2233-4947
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1969-7840
*e-mail: iskakovada@mail.ru

SIMULATION OF WEDGE GATE CONTACT INTERACTION IN DIFFERENT OPERATING ENVIRONMENTS

Loss of tightness of the sealing surfaces of pipe fittings is one of the most common causes of pipeline failures. The most loaded valve assembly is the wedge gate, which operates under harsh conditions of tribological wedge–saddle contact with significant pressure drops and intense flow dynamics. When the wedge is planted and moving, local stresses on the sealing chamfers can exceed the yield strength of the material, causing adhesive setting, scuffing, and intense plastic shear of the surface layer. The additional effect of hydrodynamic factors of the working environment – cavitation and waterjet erosion – significantly accelerates the destruction of the microstructure of structural steels and surfacing materials.

Timely prevention of node failure requires a comprehensive analysis of the processes in the contact area, combining numerical modeling with metallographic studies. Joint numerical modeling makes it possible to determine with high accuracy the location of the zones of maximum equivalent stresses according to Mises, taking into account the physical and mechanical properties of the working medium. A comparison of the calculated stress concentration zones with metallography data and microhardness profiles reveals the physical nature of corrosion-mechanical and erosive wear. Thus, pitting corrosion and cavitation destruction prevail in the aquatic environment; high-speed gas flows provoke intense erosive wear; and viscous petroleum products change the distribution of the lubricating layer and contact pressure. The formation of wear-resistant surface layers through corrosion-resistant surfacing and surface plastic deformation reduces the destruction of the microstructure and prevents the nucleation of microcracks. A reasonable choice of the geometry of the contact pair and the technological parameters of hardening ensures that the required sealing class of the gate according to GOST 9544-2015 is maintained throughout the entire standard service life of the valve.

Keywords: wedge gate, tribo-tension, contact interaction, stress-strain state, microstructure, microhardness, working medium, computer modeling.

Introduction

The reliability of wedge gate valves is largely determined by the condition of the sealing surfaces of the wedge and seat. Their damage changes the geometry of the contact zone, reduces the actual area of contact and contributes to the formation of leakage channels. Therefore, the evaluation of the gate's operability should combine the modeling of contact interaction with the study of wear and microstructure of the surface layers.

The tightness of the wedge–saddle interface is ensured by contact pressure. An insufficient value increases the likelihood of leakage, while an excessive value increases the likelihood of plastic deformation and damage to sealing surfaces. Finite element analysis of the wedge gate valve showed that the contact forces are distributed unevenly over the interface area [1]. Therefore, during the calculation, it is necessary to determine not only the clamping force, but also the distribution of contact pressure, equivalent stresses and deformations.

The loading of the gate also depends on the pressure, speed and physical properties of the working medium. In the presence of solid particles, eddy and secondary currents form local zones of intense particle impact with the wedge and body, causing erosive removal of the material [4; 5]. Analysis of failed valves also shows that high gas flow velocity combined with corrosive components can lead to erosive and corrosive damage and leakproofness [7].

In liquid media, cavitation can be an additional factor of wear. The collapse of steam bubbles near the metal surface causes multiple micro-impacts, as a result of which the surface is deformed, covered with depressions and gradually collapses [6]. However, the presence of cavitation must be confirmed by calculating the local pressure and using an appropriate numerical model. Erosion and corrosion are mutually enhanced when exposed together: mechanical removal of corrosion products exposes the metal, and corrosion weakening of the surface facilitates its subsequent destruction [7; 8].

The resistance of the gate is determined not only by its hardness, but also by its phase composition, structural uniformity, inclusions, and the ability of the material to resist cyclic plastic deformation. Using the example of gas fittings made of 17-4PH steel, it was found that the phase composition and non-metallic inclusions can significantly affect the impact strength and erosion resistance of the material [9]. In this work, the condition of the surface layer of steel 20 with coated wire Sv-10X17T is assessed by metallographic analysis, measurement of microhardness and study of the morphology of damage.

Existing studies of contact interaction, hydrodynamics, erosion, and reinforcement microstructure are mostly performed separately. The relationship between the characteristics of the working medium, the stress-strain state of the wedge gate and changes in its surface layers remains insufficiently studied.

The aim is to establish the contact interaction of the wedge and the seat, as well as to assess the condition of the surface layers of the wedge gate under the influence of various working media using modeling of contact pressure, equivalent stresses and deformations,

analysis of velocity and pressure fields, study of microstructure and microhardness with comparison of calculated zones of increased stress with experimentally detected damage.

Materials and methods

The object of the experimental study was a full-scale wedge sample of a DN 400 Pn25 pearlite steel pipe valve (steel 20/25), decommissioned at an industrial facility and used as a basic prototype to study microstructure degradation [1; 3; 11].

The sealing surfaces of the wedge are made by automatic multi-pass submerged welding of SFM-701 with Sv-10X17T welding wire with a diameter of 1.2 mm according to GOST 2246-70 [14], in three layers (the total thickness of the deposited coating is up to 4 mm). The surfacing was performed with preheating of the product to 400–450 ° C and subsequent finishing high tempering in a furnace at 600–650 ° C with an exposure time of 2.5–3.5 hours, which ensured the removal of welding stresses and normalization of the phase composition in the zone of thermal influence [2; 10].

The methodology of microstructural and tribological tests.

In addition to the full-scale sample (Figure 1), to assess the technological reproducibility of surfacing and the spread of properties over the depth of the layer, a batch of samples No. 1–6 (Figure 1) was prepared, deposited using a single technology.

A general view of the micro-grinders of the batch after pressing into a conductive resin and polishing is shown in Figure 2.

Metallographic sections were prepared by sequential grinding on abrasive paper of decreasing grain size (from P240 to P2500), followed by finishing polishing on cloth circles with diamond pastes and suspensions. The detection of microstructure and phase boundaries was achieved by chemical etching of prepared grinders with a 5% solution of nitric acid [17].

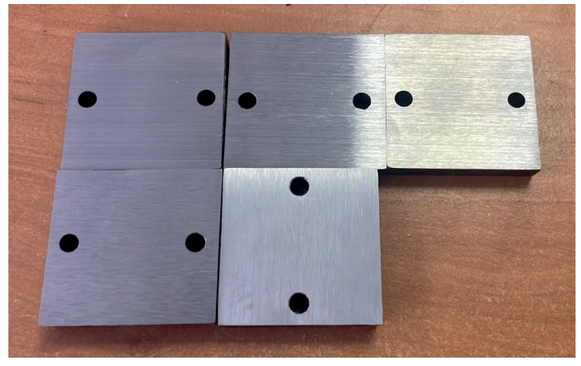


Figure 1 – Blank samples with a deposited layer before pressing and polishing

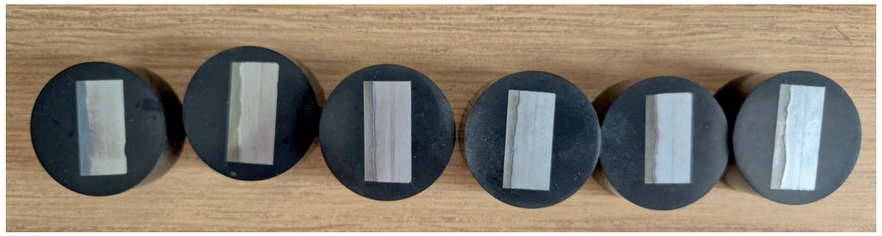


Figure 2 – General view of micro-grinders of a batch of samples
№ 1–6 with a deposited layer prepared for microstructural analysis

The microstructure, morphology of the surface layer, and microhardness distribution of HV were studied on prepared micrographs of a full-scale sample using light and scanning electron microscopy (SEM) on an Axio Observer Dlm device; the data obtained were subsequently used for physical validation of the computational model [19]. The elemental composition of the deposited layer and the zones of corrosion and mechanical degradation was determined locally by energy dispersion spectrometry on an analyzer embedded in an electron microscope.

To assess the stress-strain state of the deposited surface layer, modeling was carried out on a representative two-layer sample measuring 30×30×10 mm, including a base of structural steel with a thickness of 6 mm and a deposited layer of Sv-10X17T with a thickness of 4 mm, which corresponds to the actual total thickness of the sealing coating of the wedge. The geometric model of the sample and the finite element grid of the computational domain were constructed and solved in the COMSOL Multiphysics 6.0 environment using the Solid Mechanics method [1; 18] (Figures 3 and 4).

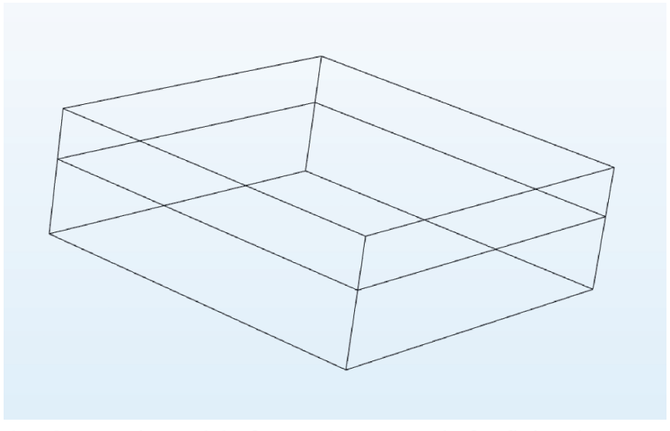


Figure 3 – Geometric model of a two-layer sample for finite element analysis

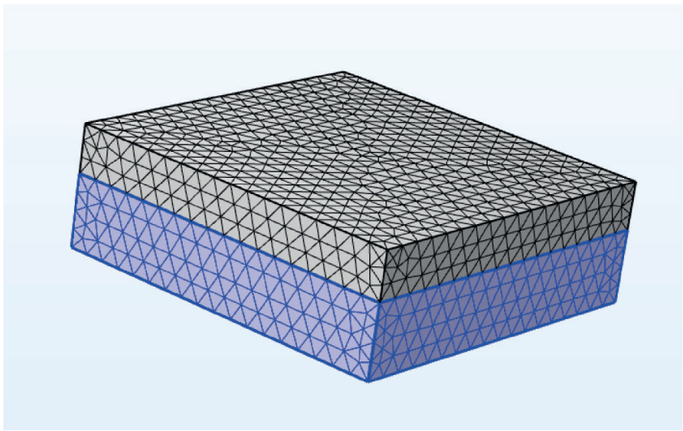


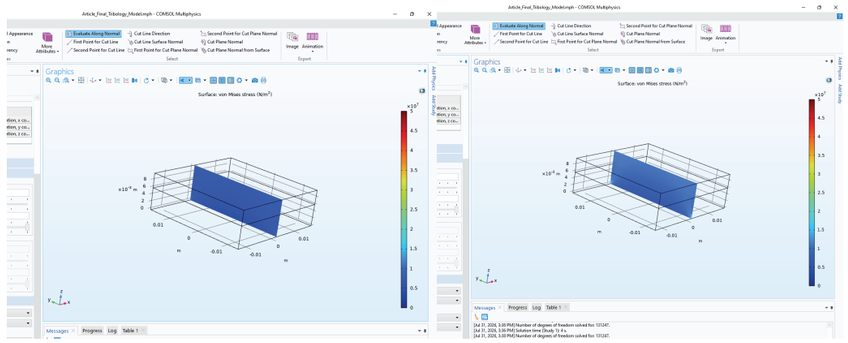
Figure 4 – Finite element grid of a two-layer computational model

The lower surface of the sample was rigidly fixed; evenly distributed pressure of 6, 10 and 16 MPa was applied to the upper (deposited) surface – the accepted calculated loading modes, conventionally compared with the operation of the valve in an aqueous environment, natural gas (methane) and petroleum products, respectively. The properties of the materials were determined by the modulus of elasticity, Poisson's ratio, and density separately for the steel base and the deposited layer [18].

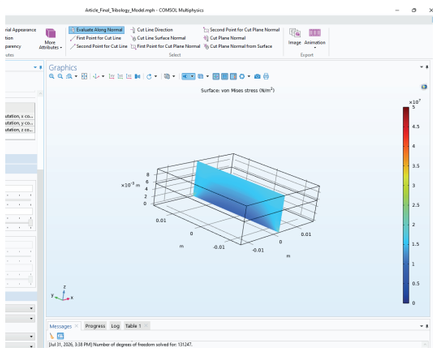
Results and discussion

The calculation of equivalent stresses according to Mises, the first main stresses and displacements was performed on a representative two-layer sample for three accepted loading modes – 6, 10 and 16 MPa (clause 2.3). The highest values of equivalent stresses are localized in the region of sample fixation and in the interface zone of the deposited layer with the substrate; with increasing pressure, a proportional increase in stress intensity is observed without changing the nature of their distribution, which indicates the linear elastic nature of the deformation of the adopted model (Figure 5).

The distribution of equivalent stresses according to Mises: a – water (6 MPa); b – methane (10 MPa); c – petroleum products (16 MPa).



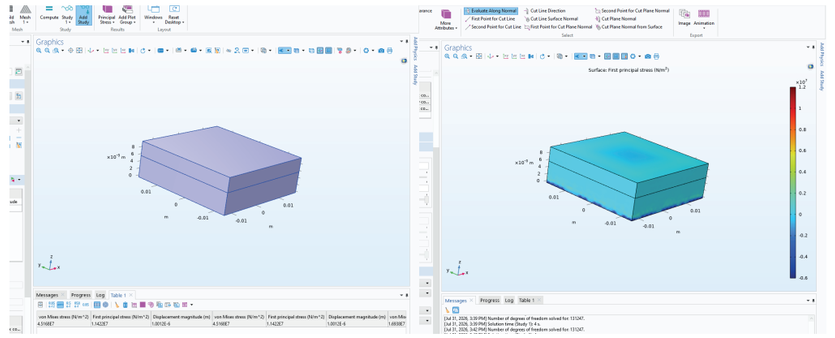
a *b*



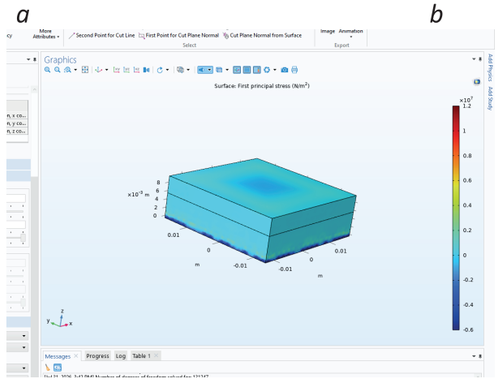
c

a – water, 6 MPa, b – methane, 10 MPa, c – petroleum products, 16 MPa
Figure 5 – Mises equivalent stress distribution in a two-layer sample

The distribution of displacements (Figure 6) shows that the maximum displacements are fixed on the loaded surface of the deposited layer, while the fixed lower surface of the sample retains almost zero displacements; the distribution over the thickness of the sample is close to linear, which corresponds to the accepted boundary conditions.



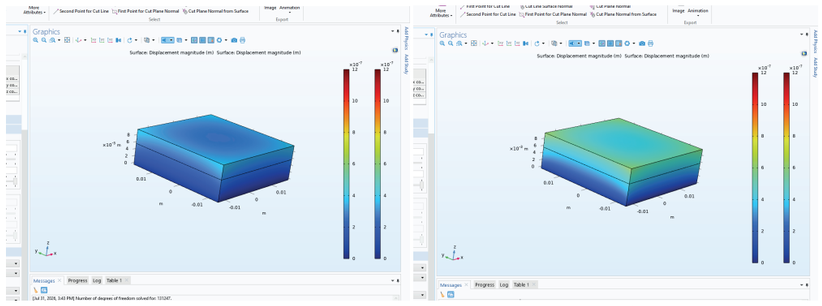
a *b*



c

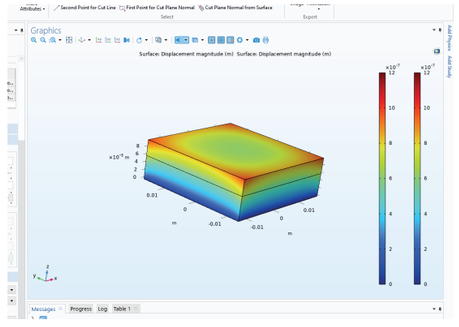
a – water, 6 MPa, b – methane, 10 MPa, c – petroleum products, 16 MPa
Figure 6 – Distribution of sample movements

The distribution of the first main stresses (Figure 7) confirms the presence of stress concentration zones in the area of the interface of materials and along the contour of the sample attachment; with increasing pressure, the absolute values of the main stresses increase without changing the overall picture of the stress-strain state.



a

b



c

a – water, 6 MPa, b – methane, 10 MPa, c – petroleum products, 16 MPa

Figure 7 — Distribution of the first main stresses

The quantitative modeling results are summarized in Table 1.

Table 1 – Results of numerical simulation of the stress-strain state of the sample

Working environment	Pressure, MPa	σ von Mises, max, MPa	σ1, max, MPa	U max, mm
water	6	16,94	4,28	0,000375
methane	10	28,23	7,14	0,000626
petroleum products	16	45,16	11,42	0,001001

The results obtained demonstrate an almost linear dependence of the maximum stresses and displacements on the applied pressure. With an increase in pressure from 6 to 16 MPa, the maximum equivalent stresses increase by 2.67 times (from 16.94 to 45.16 MPa), which corresponds to an increase in external load; a similar pattern is observed for the first main stresses and maximum displacements. The obtained dependences confirm the correctness of the accepted finite element model and allow it to be used for a comparative assessment of the stress-strain state of the deposited surface layer during operation of the wedge gate valve in various working environments [8; 9].

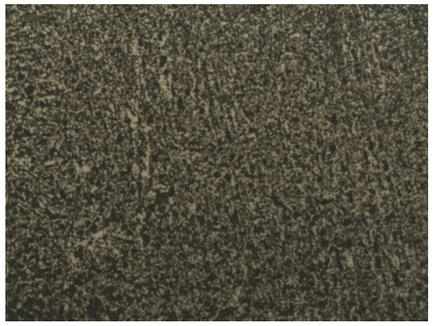
A direct spatial comparison of the calculated maximum stress zones with the actual site of microcrack formation on the wedge was not carried out in the framework of

this work, since the calculation was performed on a simplified representative sample (clause 2.3), and not on a full–size geometric model of the wedge with real chamfer radii and wedge-saddle contact conditions. Nevertheless, the calculated levels of equivalent Mises stresses in the sample attachment zone (17–45 MPa, depending on the loading mode) reach values commensurate with the yield strength of the deposited material in a thin surface layer, which is qualitatively consistent with the experimentally established fact of riveting and nucleation of fatigue microcracks on a real wedge (clause 3.1). Quantitative spatial validation of the model based on the actual location of defects requires a transition to a full-size 3D wedge model with a real chamfer geometry and would be a logical continuation of the work.

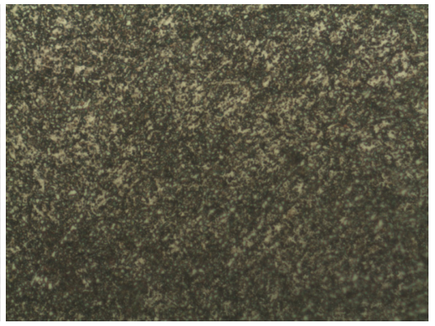
The microstructure of the deposited layer in all batch samples is represented by a ferrite-carbide mixture (Figure 8, a–d, ×500). The thickness of the deposited layer and the microhardness of the near-surface zone and the zone adjacent to the fusion line are shown in Table 2.

The variation in the thickness of the deposited layer (0.25–0.42 mm) is not related to the difference in surfacing modes, but to the unevenness of subsequent mechanical processing (grinding) of samples during the preparation of micro-grinders.

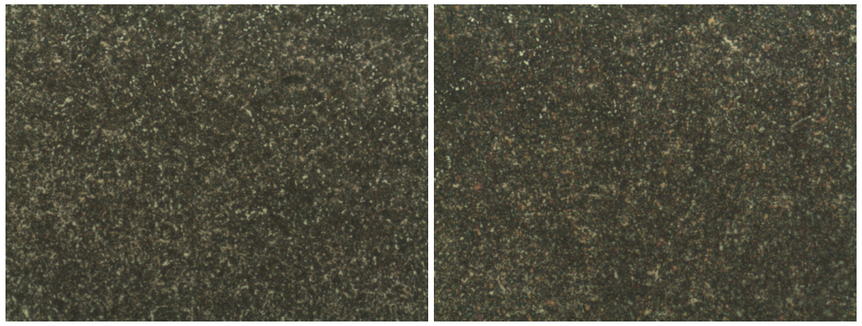
The hardness of the deposited layer increases naturally from the near–surface zone (10.3–17.3 HRC) to the zone adjacent to the fusion line (13.9–24.5 HRC). The variation in values and the relative decrease in surface hardness are explained by the cast dendritic heterogeneity of the structure, as well as the burnout of carbon and alloying elements during surfacing. The increase in hardness near the fusion line (up to 24.5 HRC) is due to a higher cooling rate due to intensive heat dissipation into the base metal mass.



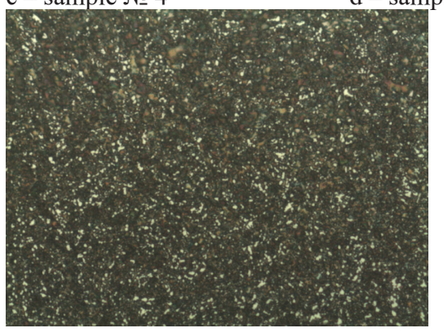
a – sample № 2



b – sample № 3



c – sample № 4 d – sample № 5



f – sample № 6

Figure 8 – Microstructure of the deposited layer of samples № 2–6, ×500

A joint analysis of experimental data from full-scale and technological samples with the results of finite element modeling of the deposited layer allows us to propose a physically sound model of degradation of the surface layers of the wedge–saddle tribo-conjugation. It is advisable to consider the destruction of sealing chamfers not as an isolated mechanical or chemical process of wear, but as a result of the synergistic action of cyclic contact stresses and the specific effects of the working environment.

Table 2 – Thickness of the deposited layer and microhardness by zones for samples № 2–6

Sample	The thickness of the deposited layer, mm	Hardness in the near-surface zone, HRC	Hardness at the fusion line, HRC
№ 2	0,25	11,4–13,2	15,5–19,2
№ 3	0,33	10,3–11,1	13,9–14,1
№ 4	0,38	11,0–13,3	20,1–23,4
№ 5	0,42	16,4–17,3	19,1–21,5
№ 6	0,40	12,0–13,6	21,4–24,5

When the wedge is released and seated under normal and tangential loads, localized von Mises stress peaks occur on the contact surfaces, exceeding the yield strength of

the deposited material. Metallographic analysis of a full-scale specimen confirms that this leads to plastic deformation, work hardening, and the formation of an oriented grain texture in the surface layer up to 50 өm thick [10].

The physicochemical properties of the working environment significantly alter both the trajectory of microdamage accumulation and the nature of its development. In an aqueous environment, high calculated contact stresses initiate mechanochemical failure: emerging microcracks fill with liquid, and dynamic wedge oscillations lead to the wedge wedging effect (Rehbinder effect) and localized cavitation, which explains scoring, grain spalling, and pitting on real components [6; 7]. In a gas environment, the determining factor is the absence of a lubricating layer combined with high flow rates during throttling: contact is accompanied by increased friction, the risk of microwelding (galling), and intense abrasive-erosive metal removal [4; 8]. In the environment of petroleum products, despite the partial formation of a lubricating film due to the viscosity of the environment, the presence of asphaltene-resin compounds and sulfur-containing components causes corrosion-mechanical wear, in which the destruction of passivating films is accelerated by cycles of elastic-plastic deformation [9].

The established patterns of distribution of stress-strain state and mechanisms of structural degradation allow us to formulate practical recommendations for mechanical engineering enterprises aimed at increasing the reliability and durability of pipeline valves.

Design solutions. Reducing peak contact stresses in the friction coupling is achieved by optimizing the geometry of the sealing chamfers. According to numerical analysis in COMSOL, increasing the rounding radii of the wedge's entry and exit edges from 0.5 mm to 1.5–2.0 mm (for a DN 400 valve, up to 5 mm according to current process standards) reduces the equivalent stress concentration by 15–20 %. Additionally, adjusting the wedge angle within tolerances ensures a more uniform distribution of contact pressures across the chamfer area and eliminates the edge distortion effect [1; 18].

Technological solutions. To prevent microstructural degradation of the surface layer, a differentiated selection of hardening technologies is proposed depending on the operating environment:

1 For aqueous environments (with a risk of cavitation and pitting), the use of protective chromium-nickel or cobalt-based hardfacing (such as Stellite 6) or Sv-10X17T hardfacing wire, which have increased resistance to cavitation erosion, is recommended.

2 For gas environments (with a risk of scoring and erosive wear), it is advisable to apply wear-resistant coatings using high-velocity oxygen-flame spraying (HVOF) or laser hardfacing of WC-Co-Cr carbide compounds.

3 For petroleum environments, it is recommended to supplement the process (after final tempering) with surface plastic deformation (SPD) of the sealing chamfers using diamond burnishing or roller burnishing. This treatment creates residual compressive stresses of up to 400–600 MPa in a surface layer 0.1–0.3 mm deep, blocking the initiation of fatigue microcracks.

This differentiated approach to the selection of strengthening technologies is consistent with the results of numerical modeling and provides a targeted increase in

the wear resistance of the wedge-saddle tribocoupling for specific operating conditions of the reinforcement [11].

Financing information

The research is carried out within the framework of grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under project BR24993003 «Development of a set of measures for instrumental support of the manufacturing sectors of the economy of the Republic of Kazakhstan».

Conclusions

Based on the results of a comprehensive study of the wedge-seat tribocoupling of a wedge gate valve Du 400, the following conclusions can be drawn.

1 Metallographic analysis and microhardness testing of a full-scale sample of a wedge with Sv-10X17T surfacing made it possible to establish the nature of the degradation of the sealing layer: the formation of a strain-hardened layer up to 50 μm deep with an increase in microhardness by 25–40 % (30–45 HRC) and the initiation of fatigue microcracks along grain boundaries in the zone of maximum tribocontact.

2 A connection has been established between the microstructural state of the surface layer and the wear pattern: strain hardening of the fine-grained structure increases resistance to abrasive microcutting, but the combination of high work hardening with peak contact stresses provokes a transition from plastic deformation to brittle fatigue chipping of the weld grains.

3 In COMSOL Multiphysics 6.0, finite element modeling of the stress-strain state of a representative two-layer weld deposited specimen was performed for three adopted loading conditions (6, 10, and 16 MPa, conventionally associated with the «water», «gas», and «oil product» environments). A linear dependence of maximum stresses and displacements on pressure was demonstrated, and the calculated stress levels are in qualitative agreement with the experimentally determined work hardening and cracking of the full-scale specimen. Direct spatial validation of the model using full-size wedge geometry is an area for future work.

4 Reduction of chamfer rounding radii (reduction of peak stresses by 15–20 %) and the introduction of final diamond smoothing (FDS), which generates residual compressive stresses of up to 400–600 MPa and ensures the maintenance of tightness class A according to GOST 9544-2015 throughout the standard service life of the fittings.

REFERENCES

1 **Wu, H., Li, J., Gao, Z.** Flow Characteristics and Stress Analysis of a Parallel Gate Valve // Processes. – 2019. – Vol. 7. – № 11. – Art. 803. – https://doi.org/10.3390/pr7110803.

2 **Ding, Y., Liu, R., Yao, J., Zhang, Q., Wang, L.** Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 329. – P. 97–108. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.018

3 **Liu, P., Liu, Y., Huang, Z., Cai, B., Sun, Q., Wei, X., Xin, C.** Design optimization for subsea gate valve based on combined analyses of fluid characteristics and sensitivity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 182. – Art. 106277. – https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106277

4 **Lin, Z., Sun, X., Yu, T., Zhang, Y., Li, Y., Zhu, Z.** Gas–solid two-phase flow and erosion calculation of gate valve based on the CFD-DEM model //Powder Technology. – 2020. – Vol. 366. – P. 395–407. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.050

5 **Zhu, H., Pan, Q., Zhang, W., Feng, G., Li, X.** CFD simulations of flow erosion and flow-induced deformation of needle valve : Effects of operation, structure and fluid parameters // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 273. – P. 396–411. – https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.02.030

6 **Lee, M. W., Kim, Y. K., Oh, Y. M., Kim, Y., Lee, S. H., Hong, H. S., Kim, S. J.** Study on the cavitation erosion behavior of hardfacing alloys for nuclear power industry // Wear. – 2003. – Vol. 255. – № 1–6. – P. 157–161. – https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00144-3

7 **Gao, G., Guo, S., Li, D.** A Review of Cavitation Erosion on Pumps and Valves in Nuclear Power Plants // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 5. – Art. 1007. – https://doi.org/10.3390/ma17051007

8 **Sotoodeh, K.** Chapter 6 – Wedge gate valve applications and design. In: A Practical Guide to Piping and Valves for the Oil and Gas Industry. – Gulf Professional Publishing (Elsevier). – 2021. – P. 321–360. – https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823796-0.00019-2

9 Metallurgical Failure Analysis of an Axial Gas Flow Valve: The Erosion of Valve Cage Closures // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2021. – https://doi.org/10.1007/s11668-021-01190-y.

10 **Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P., Dunchev, V. P., Argirov, Y. B.** Effect of diamond burnishing on fatigue behaviour of AISI 304 chromium-nickel austenitic stainless steel. Materials. – 2022. – Vol. 15. – № 14. – Art. 4768. – https://doi.org/10.3390/ma15144768.

11 **Mussina, Z., Iskakova, D., Kassenov, A., Abishev, K., Itybayeva, G., Taskarina, A., & Radjibaev, D.** An experimental study of the tribological properties of a wedge gate valve components with Sv-10X17T welding wire surfacing // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 28891–28897. – https://doi.org/10.48084/etasr.13453

12 ГОСТ 23677-79. Твердомеры для металлов. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1979 (с Изм. № 1, 2).

13 ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу (СТ СЭВ 470-77). – М. : Изд-во стандартов, 1975 (с Изм. № 1, 2).

14 ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1970 (с Изм. № 1–5).

15 **Мусина, Ж. К., Новосёлова, Е. А., Магеллан, Д. А.** Литературный обзор наплавок уплотнительных поверхностей задвижек трубопроводной арматуры //

Материалы международной научной конференции «XXIII Сатпаевские чтения» / Торайгыров университет. – Павлодар. – 2023. – Т. 11. – С. 318–324.

16 **Мустафин, С. Ю.** Исследование износостойкости подвижных сопряжений запорной арматуры газо-нефтепроводов. – М. : 2002. – 228 с.

17 **Iskakova, D. A., Kasenov, A. Zh., Magellan, D. A., Korka, Z. I.** Analysis of methods of hardening and restoration of worn parts // Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Engineering. – 2024. – Vol. 69. – № 1. – P. 137–148. – https://doi.org/10.24193/subbeng.2024.1.14.

18 **Денчик, А. И., Касенов А. Ж., Янюшкин А. С., Мусина Ж.К., Абишев, К. К., Искакова, Д. А., Ткачук, А. А.** Практическое применение имитационного моделирования формирования точности исполнительного размера // Вестник машиностроения. – 2023. – № 7. – С. 566–572. – https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-7-566-572.

19 **Касенов, А. Ж., Искакова Д. А., Янюшкин А. С., Ткачук А. А., Қабдымали, Д. Т.** Анализ напряженно-деформированного состояния трубной запорной арматуры // Наука и техника Казахстана. – 2024. – № 4. – С. 138–149. – https://doi.org/10.48081/LOWU5474.

REFERENCES

1 **Wu, H., Li, J., Gao, Z.** Flow Characteristics and Stress Analysis of a Parallel Gate Valve // Processes. – 2019. – Vol. 7. – № 11. – Art. 803. – https://doi.org/10.3390/pr7110803.

2 **Ding, Y., Liu, R., Yao, J., Zhang, Q., Wang, L.** Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 329. – P. 97–108. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.018

3 **Liu, P., Liu, Y., Huang, Z., Cai, B., Sun, Q., Wei, X., Xin, C.** Design optimization for subsea gate valve based on combined analyses of fluid characteristics and sensitivity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 182. – Art. 106277. – https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106277

4 **Lin, Z., Sun, X., Yu, T., Zhang, Y., Li, Y., Zhu, Z.** Gas–solid two-phase flow and erosion calculation of gate valve based on the CFD-DEM model //Powder Technology. – 2020. – Vol. 366. – P. 395–407. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.050

5 **Zhu, H., Pan, Q., Zhang, W., Feng, G., Li, X.** CFD simulations of flow erosion and flow-induced deformation of needle valve: Effects of operation, structure and fluid parameters // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 273. – P. 396–411. – https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.02.030

6 **Lee, M. W., Kim, Y. K., Oh, Y. M., Kim, Y., Lee, S. H., Hong, H. S., Kim, S. J.** Study on the cavitation erosion behavior of hardfacing alloys for nuclear power industry // Wear. – 2003. – Vol. 255. – № 1–6. – P. 157–161. – https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00144-3

7 **Gao, G., Guo, S., Li, D.** A Review of Cavitation Erosion on Pumps and Valves in Nuclear Power Plants // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 5. – Art. 1007. – https://doi.org/10.3390/ma17051007

8 **Sotoodeh, K.** Chapter 6 – Wedge gate valve applications and design. In: A Practical Guide to Piping and Valves for the Oil and Gas Industry. – Gulf Professional Publishing (Elsevier). – 2021. – P. 321–360. – https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823796-0.00019-2

9 Metallurgical Failure Analysis of an Axial Gas Flow Valve: The Erosion of Valve Cage Closures // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2021. – https://doi.org/10.1007/s11668-021-01190-y.

10 **Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P., Dunchev, V. P., Argirov, Y. B.** Effect of diamond burnishing on fatigue behaviour of AISI 304 chromium-nickel austenitic stainless steel. Materials. – 2022. – Vol. 15. – № 14. – Art. 4768. – https://doi.org/10.3390/ma15144768.

11 **Mussina, Z., Iskakova, D., Kassenov, A., Abishev, K., Itybayeva, G., Taskarina, A., & Radjibaev, D.** An experimental study of the tribological properties of a wedge gate valve components with Sv-10X17T welding wire surfacing // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 28891–28897. – https://doi.org/10.48084/etasr.13453

12 GOST 23677-79. Tverdomery` dlya metallov. Obshhie texnicheskie trebovaniya [Hardness testers for metals. General technical requirements] [Text]. – Moscow: Izd-vo standartov, 1979 (s Izm. № 1, 2). GOST 23677-79.

13 GOST 2999-75. Metally` i splavy`. Metod izmereniya tverdosti po Vikkersu (ST SE`V 470-77) [GOST 2999-75. Metals and alloys. Vickers hardness test method (ST SEV 470-77)] [Text]. – Moscow : Izd-vo standartov, 1975 (s Izm. № 1, 2).

14 GOST 2246-70. Provoloka stal`naya svarochnaya. Texnicheskie usloviya [GOST 2246-70. Steel welding wire. Specifications] [Text]. – Moscow : Izd-vo standartov, 1970 (s Izm. № 1–5).

15 **Musina, Zh. K., Novosyolova, E. A., Magellan, D. A.** Literaturny`j obzor naplavok uplotnitel`ny`x poverxnostej zadvizhek truboprovodnoj armatury` // Materialy` mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «XXIII Satpaevskie chteniya» / Torajgy`rov universitet [A literature review of weld deposits on the sealing surfaces of pipeline valves. Proceedings of the XXIII Satpayev Readings International Scientific Conference / Toraigyrov University] [Text]. – Pavlodar, 2023. – Vol. 11. – P. 318–324.

16 **Mustafin, S. Yu.** Issledovanie iznosostojkosti podvizhny`x sopryazhenij zapornoj armatury` gazo-nefteprovodov [Study of wear resistance of movable joints of shut-off valves of gas and oil pipelines.] [Text]. – Moscow, 2002. – 228 p.

17 **Iskakova, D. A., Kasenov, A. Zh., Magellan, D. A., Korka, Z. I.** Analysis of methods of hardening and restoration of worn parts // Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Engineering. – 2024. – Vol. 69. – № 1. – P. 137–148. – https://doi.org/10.24193/subbeng.2024.1.14.

18 **Denchik, A. I., Kasenov, A. Zh., Yanyushkin, A. S., Musina, Zh. K., Abishev, K. K., Iskakova, D. A., Tkachuk, A. A.** Prakticheskoe primenenie imitacionnogo modelirovaniya formirovaniya tochnosti ispolnitel`nogo razmera [Practical application of simulation modeling of the formation of the accuracy of the executive size.] [Text] // Vestnik mashinostroeniya. – 2023. – № 7. – P. 566–572. – https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-7-566-572.

19 **Kasenov, A. Zh., Iskakova, D. A., Yanyushkin, A. S., Tkachuk A. A., Kabdy`mali, D. T.** Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya trubnoj zapornoj armatury` [Analysis of stress-strain state of pipe shut-off valves] [Text] // Nauka i texnika Kazaxstana. – 2024. – № 4. – P. 138–149. – https://doi.org/10.48081/LOWU5474.

Received 04.08.26.
Received in revised form 10.08.26.
Accepted for publication 20.08.26.

А. Ж. Касенов[1], *Д. А. Искакова[2], Ж. Қ. Мусина[3], А. С. Янюшкин[4]
[1,2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[1]Қазақ ұлттық су шаруашылығы және суару университеті,
Қазақстан Республикасы Тараз қ.;
[4]Чуваш мемлекеттік университеті, Чуваш Республикасы, Чебоксары қ.
04.08.26 ж. баспаға түсті.
10.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӘРТҮРЛІ ЖҰМЫС ОРТАЛАРЫНДА ЖҰМЫС ІСТЕУ КЕЗІНДЕГІ СЫНАЛЫ ҚАҚПАНЫҢ ЖАНАСУ ӨЗАРА ӘСЕРЛЕСУІН МОДЕЛЬДЕУ

Құбыр арматураларының тығыздағыш беттерінің тығыздығының жоғалуы – бұл себептердің бірі құбырлардың істен шығуының ең көп таралған себептері. Ең көп жүктелген клапан жинағы - сына қақпасы, ол қысымның айтарлықтай төмендеуімен және қарқынды ағын динамикасымен трибологиялық сына-ершік байланысының қатал жағдайларында жұмыс істейді. Сына отырғызылған және қозғалған кезде, тығыздағыш фаскалардағы жергілікті кернеулер материалдың беріктігінен асып кетуі мүмкін, бұл жабысқақ қатаюға, сызаттарға және беткі қабаттың қарқынды пластикалық ығысуына әкеледі. Жұмыс ортасының гидродинамикалық факторларының қосымша әсері – кавитация және су ағыны эрозиясы – құрылымдық болаттар мен беткі материалдардың микроқұрылымының бұзылуын айтарлықтай жеделдетеді.

Түйіннің істен шығуының уақтылы алдын алу үшін сандық модельдеуді металлографиялық зерттеулермен біріктіре отырып, жанасу аймағындағы процестерді кешенді талдау қажет. Бірлескен сандық модельдеу жұмыс ортасының физикалық және механикалық қасиеттерін ескере отырып, Мизес бойынша максималды эквивалентті кернеулер аймақтарының орналасуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді. Есептелген кернеу концентрациясы аймақтарын металлография деректерімен және микроқаттылық профильдерімен салыстыру коррозия-механикалық және эрозиялық тозудың физикалық сипатын көрсетеді. Осылайша, су ортасында шұңқырлы коррозия және кавитацияның бұзылуы басым болады; Жоғары жылдамдықты газ ағындары қарқынды эрозиялық тозуды тудырады; ал тұтқыр мұнай өнімдері майлау қабатының таралуын және жанасу қысымын өзгертеді. Коррозияға төзімді беткі қабат және беттік пластикалық деформация арқылы тозуға төзімді беткі қабаттардың пайда болуы микроқұрылымның бұзылуын азайтады және микрожарықтардың пайда болуына жол бермейді. Байланыс жұбының геометриясын және беріктендірудің технологиялық параметрлерін ақылға қонымды таңдау МЕСТ 9544–2015 бойынша қақпаның қажетті тығыздау класының клапанның бүкіл стандартты қызмет ету мерзімі ішінде сақталуын қамтамасыз етеді.

Кілтті сөздер: сына қақпасы, трибо-кернеу, жанасу өзара әрекеттесуі, кернеу-деформация күйі, микроқұрылым, микроқаттылық, жұмыс ортасы, компьютерлік модельдеу.

А. Ж. Касенов[1], *Д. А. Искакова[2], Ж. Қ. Мусина[3], А. С. Янюшкин[4]
[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[1]Казахский национальный университет управления
водными ресурсами и ирригации, Республика Казахстан, г. Тараз;
[4]Чувашский государственный университет, Чувашская Республика, г. Чебоксары;
Поступило в редакцию 04.08.26.
Поступило с исправлениями 10.08.26.
Принято в печать 20.08.26.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИНОВОГО ЗАТВОРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ СРЕДАХ

Потеря герметичности уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры – одна из наиболее распространённых причин отказов на трубопроводах. Наиболее нагруженным узлом задвижки выступает клиновой затвор, работающий в жёстких условиях трибологического контакта «клин – седло» при значительных перепадах давления и интенсивной динамике потока. При посадке и начале движения клина локальные напряжения на уплотнительных фасках могут превышать предел текучести материала, вызывая адгезионное схватывание, образование задиров и интенсивный пластический сдвиг поверхностного слоя. Дополнительное воздействие гидродинамических факторов рабочей среды – кавитации и гидроабразивной эрозии – заметно ускоряет разрушение микроструктуры конструкционных сталей и наплавочных материалов.

Своевременное предотвращение отказа узла требует комплексного анализа процессов в зоне контакта, объединяющего численное моделирование с металлографическими исследованиями. Совместное численное моделирование

позволяет с высокой точностью определять расположение зон максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу с учётом физико-механических свойств рабочей среды. Сравнение расчётных зон концентрации напряжений с данными металлографии и профилями микротвёрдости раскрывает физическую природу коррозионно-механического и эрозионного изнашивания. Так, в водной среде преобладают питтинговая коррозия и кавитационное разрушение; высокоскоростные газовые потоки провоцируют интенсивный эрозионный износ; а вязкие нефтепродукты меняют характер распределения смазочного слоя и контактного давления. Формирование износостойких поверхностных слоёв посредством коррозионностойких наплавок и поверхностно-пластического деформирования снижает деструкцию микроструктуры и препятствует зарождению микротрещин. Обоснованный выбор геометрии контактной пары и технологических параметров упрочнения обеспечивает сохранение требуемого класса герметичности затвора по ГОСТ 9544-2015 на протяжении всего нормативного срока службы арматуры.

Ключевые слова: клиновой затвор, трибосопряжение, контактное взаимодействие, напряжённо-деформированное состояние, микроструктура, микротвёрдость, рабочая среда, компьютерное моделирование.

SRSTI 55.22.19

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/119-131

V. N. Kots[1], Z. A. Satbayeva[2], D. A. Askerzhanov[3], R. A. Sovetbaev[4], E. Y. Shayakhmetov[5]

[1,3,4,5]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey;

[2]PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan, Oskemen.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7161-2686

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3706-4087

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083

*e-mail: kotsvladislav@gmail.com

EFFECT OF PLASMA SPRAYING ENERGY INPUT ON APS-SPRAYED YSZ COATINGS

This study investigates the effect of plasma spraying energy input on the microstructure and properties of APS-sprayed ZrO_2-Y_2O_3 (YSZ) coatings deposited on 12Cr18Ni10Ti stainless steel substrates. The coatings were produced under different spraying conditions by varying arc current, arc voltage, plasma gas flow, powder feed rate, and stand-off distance. A specific energy input to powder was used as a comparative parameter to characterize the thermal loading of particles during spraying.

The microstructure of the coatings was examined by scanning electron microscopy, and porosity was evaluated from cross-sectional images using image analysis. Microhardness was measured under HV0.1 and HV0.3 loads, surface roughness was assessed using the Ra, Rz, and Rt parameters, and corrosion behavior was studied by potentiodynamic polarization in a 3.5 wt.% NaCl solution.

The results show that spraying conditions significantly affect coating density, porosity, microhardness, roughness, and electrochemical response. The lowest porosity was obtained for the coating produced under intermediate spraying conditions and amounted to 3.2 $\pm$ 0.5 %, while coatings formed under lower and higher energy input exhibited porosity values of 4.5 $\pm$ 0.3 % and 6.7 $\pm$ 1.6 %, respectively. A decrease in microhardness with increasing porosity was observed, particularly at the HV0.3 load, due to the influence of interlamellar defects on the effective load-bearing area.

The corrosion behavior of the coatings was found to depend not only on total porosity but also on defect morphology and pore connectivity. Overall, the results confirm that plasma spraying energy input strongly influences the structure and performance of APS-sprayed YSZ coatings and can be used to optimize spraying conditions.

Keywords: atmospheric plasma spraying, YSZ coatings, energy input, microstructure, porosity, microhardness, roughness, corrosion behavior.

Introduction

Modern engineering increasingly requires surface materials capable of operating under severe service conditions involving friction, corrosive media, and thermal loading. Under such conditions, the surface degradation of machine components leads to accelerated wear, frequent repair or replacement, and increased operating costs. At the same time, manufacturing an entire part from expensive wear-resistant or heat-resistant materials is often economically unreasonable and technologically inconvenient. A more efficient solution is the deposition of protective coatings that provide the required surface properties while preserving the bulk characteristics and cost-effectiveness of the substrate. Yttria-stabilized zirconia (YSZ) is one of the most widely used ceramic coating materials because of its low thermal conductivity, relatively high thermal expansion compatibility with metallic substrates, and good phase stability at elevated temperatures. Atmospheric plasma spraying remains one of the most attractive methods for depositing YSZ coatings due to its industrial scalability, high deposition rate, and ability to form a characteristic lamellar microstructure.

A general relationship between plasma-sprayed coating microstructure and performance was discussed in the classic paper by Taylor, Brandon, and Morrell, «Microstructure, composition and property relationships of plasma-sprayed thermal barrier coatings» [1].

A large number of studies have shown that the structure and properties of APS-sprayed YSZ coatings are highly sensitive to spraying conditions. In particular, arc power, stand-off distance, powder feed rate, and plasma gas composition affect the thermal and kinetic state of particles in flight, their degree of melting, splat flattening, and the formation of pores and interlamellar defects. Kulkarni in “Processing effects on porosity-property correlations in plasma sprayed yttria-stabilized zirconia coatings” demonstrated that processing conditions strongly control porosity and, consequently, coating properties [2]. Wang in «Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings» showed that pores and interfaces play a decisive role in determining the effective behavior of plasma-sprayed zirconia [3]. These findings clearly indicate that the final coating performance is governed not only by the chemical composition of YSZ, but also by the defect structure formed during spraying.

The practical importance of process optimization was further confirmed in later studies. Karthikeyan, Balasubramanian, and Rajendran in «Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings» reported that input power, stand-off distance, and powder feed rate significantly affect porosity and microhardness, with input power having the strongest influence among the investigated parameters [4]. Mauer, Vaßen, and Stöver in “Atmospheric plasma spraying of yttria-stabilized zirconia coatings with specific porosity” showed that APS conditions can be used to tailor the porosity level of YSZ coatings [5]. In addition, Sobhanverdi and Akbari in «Porosity and microstructural features of plasma sprayed yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings» demonstrated that spray distance markedly changes pore morphology, crack density, and lamellar arrangement, and that an intermediate spray distance can provide a more favorable microstructural condition [6].

The formation of lamellar structures and defect distribution in plasma-sprayed coatings has been extensively studied [7; 8] and is known to depend on particle temperature, velocity, and splat solidification dynamics [9; 10].

Besides porosity and hardness, the functional performance of YSZ coatings is also related to surface roughness and corrosion behavior. In coatings deposited on steel substrates, not only the total porosity but also the morphology and connectivity of defects determine electrolyte penetration and the resulting electrochemical response. This aspect was addressed by Gao in «The tribocorrosion behaviour of YSZ coating deposited on stainless steel substrate in 3.5 wt.% NaCl solution», where the authors showed that YSZ coatings can significantly modify the corrosion-related response of stainless-steel substrates [11]. Therefore, a comprehensive evaluation of APS-sprayed YSZ coatings should include microstructural observations together with porosity, hardness, roughness, and electrochemical characterization.

Despite the substantial amount of published work on APS-sprayed YSZ, the influence of plasma spraying energy input on the combined set of structural and functional properties remains practically relevant, especially for coatings produced under different technological regimes. In the present study, ZrO_2-Y_2O_3 coatings were deposited by APS on 12Cr18Ni10Ti stainless steel under different spraying conditions. The effect of plasma spraying energy input on the microstructure, porosity, microhardness, roughness, and corrosion behavior of the coatings was investigated in order to determine the regime associated with the most favorable combination of properties. 12Cr18Ni10Ti stainless steel was selected as a representative engineering material widely used in corrosion-prone environments and suitable for evaluating the protective performance of ceramic coatings.

Materials and methods

ZrO_2-Y_2O_3 coatings were deposited by atmospheric plasma spraying on 12Cr18Ni10Ti stainless steel substrates. Prior to spraying, the samples were mechanically prepared by sequential grinding with SiC abrasive papers, starting from coarse grit corresponding to 120 and gradually progressing to finer grit up to 600. After grinding, the surfaces were subjected to sandblasting in order to increase surface roughness and improve coating adhesion.

The coatings were produced using an SX-90 atmospheric plasma spraying system equipped with an SG-100 plasma torch. Argon was used as the primary plasma gas, while hydrogen served as a secondary gas to increase the enthalpy of the plasma jet and enhance heat transfer to the powder particles. The spraying parameters for the investigated regimes are summarized in Table 1. To compare the thermal conditions of particle processing during spraying, the specific energy input to the powder was used as a characteristic parameter.

Table 1 – Spraying parameters and calculated specific energy input

Sample	Ar flow (L/h)	H_2 flow (L/h)	Spraying distance (mm)	Arc current (A)	Arc voltage (V)	Powder feed (g/s)	(kJ/g)
LE-80	40	1,5	80	490	45	0,72ұ0,03	30,63
ME-90	45	2,5	90	550	48	0,62ұ0,03	42,58
HE-100	55	2,8	100	610	51	0,5ұ0,03	62,22

Specific energy input to powder

$$E_{sp} = \frac{U \cdot I}{\dot{m}}, \quad (1)$$

where U is the arc voltage, I is the arc current and ṁ is the powder feed rate. The specific energy input was first calculated in J/g and then converted to kJ/g for presentation in Table 1.

For example, for the LE-80 condition:

$$E_{sp} = \frac{45 \cdot 490}{0{,}72} = 30625\ \text{J/g} \approx 30{,}63\ k\text{J/g}$$

The microstructure of the coatings was examined on polished cross-sections using scanning electron microscopy (JEOL, Japan). Prior to SEM analysis, the samples were mounted in epoxy resin, followed by grinding and final polishing using diamond paste with a particle size of 0/1 to obtain a smooth surface suitable for microstructural characterization. The porosity of the coatings was determined from SEM cross-sectional images using ImageJ software with a grayscale thresholding method. Only the coating region was considered in the evaluation, while preparation-induced defects were excluded.

Surface roughness was measured using a contact profilometer HY2300 (Anytester, Hefei, China). The parameters Ra, Rz, and Rt were used to characterize the surface topography of the coatings.

Microhardness measurements were carried out on polished cross-sections using the Vickers method with an HLV-1DT microhardness tester in accordance with GOST R ISO 6507-1 and ASTM E384. Two indentation loads, HV0.1 and HV0.3, were applied with a dwell time of 10 s. The results are reported as mean values with standard deviation.

The corrosion behavior of the coatings was evaluated by potentiodynamic polarization using a CS350M potentiostat (Corrtest, China) in a 3.5 wt.% NaCl solution at a temperature of (25 ± 1) °C. A conventional three-electrode configuration was employed, including an Ag/AgCl reference electrode, a platinum counter electrode, and the sample as the working electrode. The exposed surface area of the working electrode was fixed at 1 cm². Prior to testing, the open circuit potential was allowed to stabilize. Polarization curves were recorded in the range from −0.1 to +0.1 V relative to the open

circuit potential at a scan rate of 0.5 mV/s. The corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (I_{corr}) were determined by Tafel extrapolation.

Results and discussion

Cross-sectional SEM analysis showed that all APS-sprayed YSZ coatings exhibit a typical lamellar structure formed by the successive deposition of flattened splats. Despite the common structural features, noticeable differences in coating density and defect distribution were observed. The ME-90 coating exhibited the most compact microstructure with well-developed interlamellar bonding and a minimal amount of pore-like defects. In contrast, the HE-100 coating was characterized by a higher density of interlamellar discontinuities and pore clusters, indicating structural degradation. The corresponding microstructures for the investigated spraying regimes are presented in Figure 1.

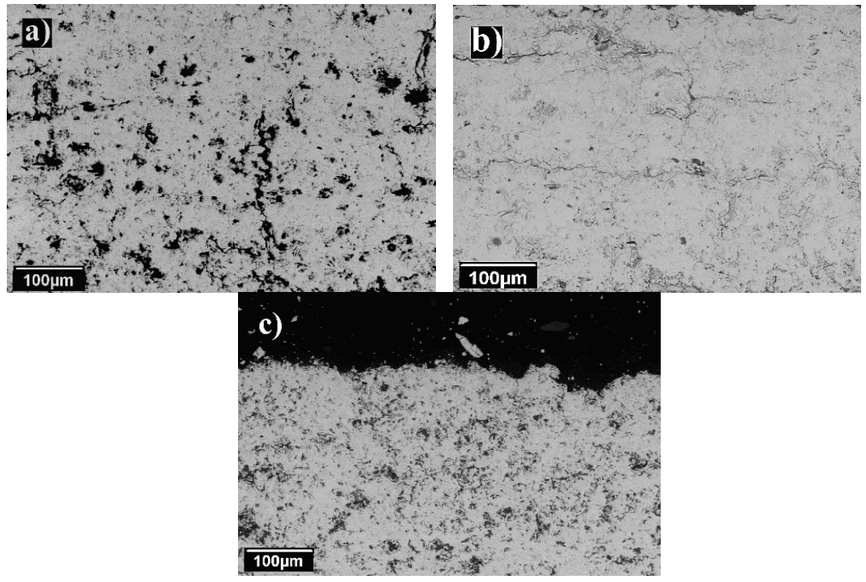


Figure 1 – SEM micrographs of the coatings: a) LE-80; b) ME-90; c) HE-100

The LE-80 coating demonstrated an intermediate microstructural condition with visible splat boundaries and localized defects. These observations suggest that the spraying energy input directly affects particle melting and splat formation, which ultimately governs the coating consolidation process. Similar effects of APS parameters on the structural state of YSZ coatings have been reported previously [2; 3; 6]. The observed lamellar structure with intersplat boundaries is typical for plasma-sprayed ceramic coatings and results from rapid solidification of molten particles upon impact [9; 12].

The influence of the spraying regime on structural density is further reflected in the porosity results shown in Figure 2.

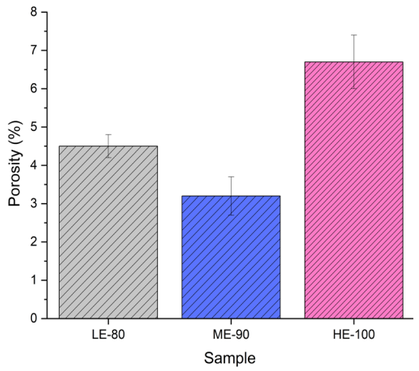


Figure 2 – Porosity of the coatings obtained under different spraying regimes

Porosity was determined from SEM cross-sectional images using ImageJ software by applying a grayscale thresholding method. The same thresholding criteria were consistently applied to all samples to ensure comparability of the results. Only the coating region was considered in the analysis, while preparation-induced defects were excluded.

The lowest porosity was obtained for the ME-90 coating, while higher values were observed for LE-80 and HE-100. This suggests that intermediate spraying conditions provide a more favorable balance between particle heating and splat consolidation. In the case of LE-80, insufficient thermal input likely results in incomplete particle melting and limited splat spreading. Conversely, the higher porosity observed for HE-100 may be associated with excessive thermal loading combined with increased spraying distance, which can promote defect formation and structural discontinuities.

A similar dependence of coating porosity on particle thermal state and deposition conditions has been reported previously [4; 6].

The effect of microstructure on mechanical properties is reflected in the microhardness results shown in Figure 3.

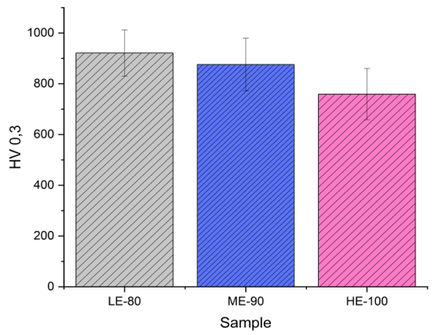


Figure 3 – Microhardness of the coatings

A general decrease in microhardness from LE-80 to HE-100 is observed under the HV0,3 load, which corresponds to the increase in porosity and defect density. This trend indicates that pores and interlamellar discontinuities reduce the effective load-bearing area of the coating and thus weaken its mechanical response. The relationship between defect content and effective mechanical properties is well known for plasma-sprayed zirconia coatings [2; 3; 5].

At the same time, the hardness values measured at HV0,1 are consistently higher than those obtained at HV0,3 for all coatings. This difference is associated with the indentation size effect combined with the heterogeneous lamellar structure of APS coatings. Under lower loads, the indentation is confined to a smaller volume and is therefore more sensitive to locally dense splat regions, resulting in higher apparent hardness. In contrast, at higher loads the indenter interacts with a larger representative volume that includes pores and interlamellar defects, which reduces the measured hardness. This behavior confirms that HV0,1 reflects local hardness variations, whereas HV0,3 provides a more representative measure of the effective hardness of the coating.

The surface topography of the coatings was evaluated using roughness measurements, the results of which are summarized in Table 2.

Table 2 – Surface roughness parameters of the coatings

Sample	Ra	Rz	Rt
LE-80	6,3	31,8	50,1
ME-90	8,8	47,5	48,3
HE-100	7,2	40,6	49,2

The highest roughness values were observed for the ME-90 coating, despite it exhibiting the lowest porosity. It can be assumed that coating densification and surface morphology are governed by different mechanisms. Improved particle melting and splat flattening under intermediate conditions may promote the formation of a more developed surface relief. In contrast, insufficient or excessive thermal input leads to

less stable surface formation. These observations highlight the complex relationship between splat dynamics and surface topography. Thus, the roughness data complement the microstructural observations and highlight the complex relationship between splat formation and surface topography.

The electrochemical behavior of the coatings was evaluated by potentiodynamic polarization, and the corresponding parameters are presented in Table 3.

Table – 3 Corrosion parameters of the coatings

Sample	Ecorr (V)	Icorr (× 10^{-5}A/cm^2)	Corrosion rate (mm/year)
Substrate (12Cr18Ni10Ti)	-0,14552	0,0134	0,0016
LE-80	-0,13226	2,00	0,2348
ME-90	-0,15798	1,69	0,1983
HE-100	-0,17403	0,849	0,0996

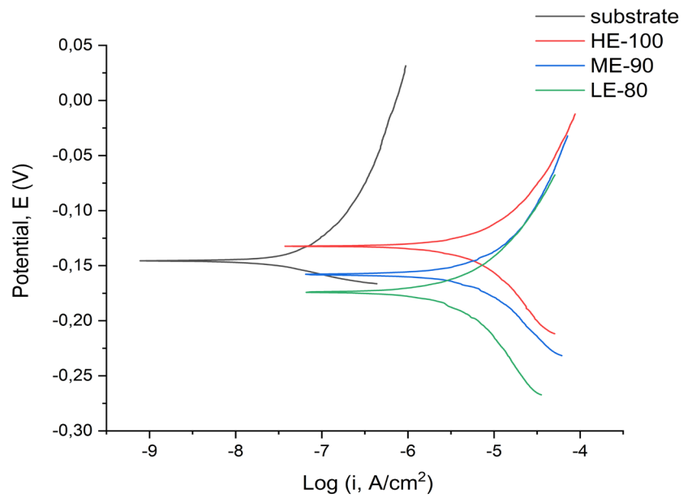


Figure 4 – Potentiodynamic polarization curves of YSZ coatings (LE-80, ME-90, HE-100) and the 12Cr18Ni10Ti substrate in 3.5 wt.% NaCl solution

The uncoated stainless steel substrate exhibited the lowest corrosion current density due to its intrinsic passive behavior. After coating deposition, the corrosion resistance decreased, which is typical for porous ceramic coatings on metallic substrates. Among the coated samples, differences in corrosion response were observed depending on the spraying regime. This indicates that corrosion behavior is not governed solely by total porosity. Instead, it is strongly influenced by defect morphology and connectivity, which control electrolyte penetration through the coating. It should be noted that this conclusion is based on microstructural observations rather than direct quantitative measurement of pore connectivity. Similar effects have been discussed in the literature for APS coatings exposed to chloride environments [7; 8].

It should also be noted that, among the varied parameters, the spraying distance appears to play a significant role, as it directly affects particle temperature and residence time in the plasma jet. However, its influence is coupled with changes in arc power and gas flow, and therefore should be considered as part of a combined effect of processing parameters.

The observed trends should be considered indicative due to the limited number of investigated regimes, but they clearly demonstrate the dominant influence of spraying conditions on coating formation. To further analyze the mechanical response, the microhardness values obtained under different loads were compared in Table 4.

Table 4 – Comparison of microhardness at different loads

Sample	HV 0,3	HV 0,1
LE-80	920,6 ұ 90,8	1185,8 ұ 113,5
ME-90	876,1 ұ 94,3	1070,3 ұ 155,2
HE-100	759,2 ұ 99,4	994,7 ұ 114,4

The microhardness values measured at HV0,1 were higher than those obtained at HV0,3 for all investigated coatings. This difference is attributed to the indentation size effect combined with the heterogeneous lamellar structure of APS-sprayed YSZ coatings. Under the lower load, the indentation volume is smaller and is therefore more sensitive to local dense splat regions, resulting in higher apparent hardness. In contrast, under the HV0.3 load, the indentation involves a larger representative volume of the coating, including pores, interlamellar boundaries, and defected regions, which reduces the effective load-bearing area and leads to lower hardness values. In addition, higher loads may promote local microcracking and interlamellar decohesion around the indentation site, which further decreases the measured hardness.

This behavior reflects the structural heterogeneity typical of APS-deposited coatings. In this respect, HV0,1 characterizes the local hardness of dense splat regions, whereas HV0,3 provides a more representative measure of the effective hardness of the coating.

Financing information

This research was supported by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the grant project № BR24992870.

Conclusions

The present study investigated the effect of plasma spraying energy input on the microstructure and properties of APS-sprayed YSZ coatings deposited on 12Cr18Ni10Ti stainless steel.

All coatings exhibited a typical lamellar structure characteristic of APS processes; however, significant differences in structural density and defect distribution were observed depending on the spraying regime. The most compact structure and lowest porosity were obtained under intermediate spraying conditions, indicating that an optimal balance between particle heating and deposition parameters is required for effective coating densification.

The mechanical properties were strongly influenced by the structural state of the coatings. A decrease in microhardness with increasing porosity was observed, particularly under the HV0.3 load, which reflects the effective hardness of the coating. Higher hardness values measured at HV0.1 are associated with local dense regions and confirm the heterogeneous nature of the lamellar structure.

The surface roughness results demonstrated that the densest coating is not necessarily the smoothest one, which highlights the different mechanisms governing splat formation and surface morphology.

The corrosion behavior of the coatings was found to depend not only on total porosity but also on defect morphology and connectivity, which control electrolyte penetration.

In general, the results demonstrate that plasma spraying energy input significantly influences particle melting, splat formation, and defect structure, which in turn determine the mechanical and electrochemical properties of APS-sprayed YSZ coatings. The established relationships can be used for the optimization of spraying parameters aimed at achieving coatings with improved performance.

REFERENCES

1 **Taylor, R., Brandon, J. R., Morrell, P.** Microstructure, composition and property relationships of plasma-sprayed thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. – 1992. – Vol. 50. – № 2. – P. 141–149. – https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90055-F.

2 **Kulkarni, A. A., Vaidya, A., Goland, A., Sampath, S., Herman, H.** Processing effects on porosity-property correlations in plasma sprayed yttria-stabilized zirconia coatings // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 359. – № 1–2. – P. 100–111. – https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00342-3.

3 **Wang, Z., Kulkarni, A., Deshpande, S., Nakamura, T., Herman, H.** Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51. – № 18. – P. 5319–5334. – https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00390-2.

4 **Karthikeyan, S., Balasubramanian, V., Rajendran, R.** Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40. – № 2. – P. 3171–3183. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.09.125.

5 **Mauer, G., Vaßen, R., Stöver, D.** Atmospheric plasma spraying of yttria-stabilized zirconia coatings with specific porosity // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 204. – № 1–2. – P. 172–179. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.07.017.

6 **Sobhanverdi, R., Akbari, A.** Porosity and microstructural features of plasma sprayed yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41. – № 10. – Part B. – P. 14517–14528. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.102.

7 **Fauchais, P., Vardelle, A.** Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear // Advanced Plasma Spray Applications. – IntechOpen. – 2012. – https://doi.org/10.5772/34448.

8 **Sampath, S., Jiang, X. Y., Matejicek, J., Prchlik, L.** Splat formation and microstructure development during plasma spraying: deposition temperature effects // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – Vol. 304–306. – P. 144–150. – https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01464-7.

9 **Lima, R. S., Marple, B. R.** Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural, Thermal Barrier and Biomedical Applications: A Review // Journal of Thermal Spray Technology. – 2007. – Vol. 16. – № 1. – P. 40–63. – https://doi.org/10.1007/s11666-006-9010-7.

10 **Pawlowski, L.** The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 626 p. – https://doi.org/10.1002/9780470754085.

11 **Gao, Z., Ji, G., Shi, Z., Wang, X.** The tribocorrosion behaviour of YSZ coating deposited on stainless steel substrate in 3.5 wt.% NaCl solution // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – № 15. – P. 21051–21060. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.107.

12 **McPherson, R.** A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings // Surface and Coatings Technology. – 1989. – Vol. 39–40. – Part 1. – P. 173–181. – https://doi.org/10.1016/0257-8972(89)90052-2.

Received 31.03.26.
Received in revised form 20.05.26.
Accepted for publication 22.07.26.

В. Н. Коц[1], З. А. Сатбаева[2], Д. А. Аскержанов[3], Р. А. Советбаев[4], Е. Я. Шаяхметов[5]
[1,3,4,5]Shakarim University, Қазақстан Республикасы, Семей қ.;
[2]PlasmaScience LLP, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
31.03.26 ж. баспаға түсті.
20.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ КЕЗІНДЕГІ ЭНЕРГИЯ ЕНГІЗУДІҢ APS YSZ ЖАБЫНДАРЫНА ӘСЕРІ

Бұл жұмыста атмосфералық плазмалық бүрку әдісімен 12Х18Н10Т маркалы тот баспайтын болат негізінде алынған ZrO_2-Y_2O_3 (YSZ) қаптамаларының микроқұрылымы мен қасиеттеріне энергия енгізудің әсері зерттелді. Қаптамалар бүрку режимдерін өзгерту арқылы алынған, атап айтқанда доға тогы, кернеу, плазма түзуші газдардың шығыны, ұнтақ беру жылдамдығы және бүрку қашықтығы өзгертілді. Процесті сипаттау үшін ұнтаққа түсетін меншікті энергия енгізу параметрі қолданылды.

Қаптамалардың микроқұрылымы сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен зерттелді, ал кеуектілік қима бетінің кескіндерін талдау арқылы анықталды. Микротвёрдылық HV0.1 және HV0.3 жүктемелерінде өлшенді, бет кедір-бұдырлығы Ra, Rz және Rt параметрлері бойынша бағаланды, ал коррозиялық қасиеттері 3,5 мас.% NaCl ерітіндісінде потенциодинамикалық поляризация әдісімен зерттелді.

Зерттеу нәтижелері бүрку режимдерінің қаптама тығыздығына, кеуектілігіне, микротвёрдылығына, бет кедір-бұдырлығына және электрохимиялық мінез-құлқына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Ең төменгі кеуектілік (3,2 ± 0,5%) аралық бүрку режимінде байқалды, ал төмен және жоғары энергия жағдайларында ол сәйкесінше 4,5 ± 0,3% және 6,7 ± 1,6% болды. Кеуектіліктің артуымен микротвёрдылықтың төмендеуі байқалды, әсіресе HV0.3 жүктемесінде, бұл қабаттағы ақаулардың әсерімен түсіндіріледі.

Қаптамалардың коррозиялық мінез-құлқы тек жалпы кеуектілікке ғана емес, сонымен қатар ақаулардың морфологиясы мен кеуектердің байланысына тәуелді екені анықталды. Алынған нәтижелер плазмалық бүрку кезіндегі энергия енгізудің YSZ қаптамаларының құрылымы мен қасиеттерін қалыптастыруда маңызды рөл атқаратынын көрсетеді және технологиялық параметрлерді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: атмосфералық плазмалық бүрку, YSZ қаптамалары, энергия берілу, микроқұрылым, кеуектілік, микротвёрдылық, бет кедір-бұдырлығы, коррозиялық қасиеттер.

В. Н. Коц[1], З. А. Сатбаева[2], Д. А. Аскержанов[3],
Р. А. Советбаев[4], Е. Я. Шаяхметов[5]

[1,3,4,5]Shakarim University, Республика Казахстан, г. Семей;
[2]PlasmaScience LLP, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

Поступило в редакцию 31.03.26.
Поступило с исправлениями 20.05.26.
Принято в печать 22.07.26.

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВЛОЖЕНИЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ НА YSZ-ПОКРЫТИЯ APS

В работе исследовано влияние энерговложения при плазменном напылении на микроструктуру и свойства покрытий ZrO_2-Y_2O_3 (YSZ), нанесённых методом атмосферного плазменного напыления на подложки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Покрытия формировались при различных режимах напыления за счёт изменения тока дуги, напряжения, расхода плазмообразующих газов, скорости подачи порошка и дистанции напыления. В качестве обобщённого параметра использовалось удельное энерговложение в порошок, характеризующее тепловую нагрузку на частицы в процессе напыления.

Микроструктура покрытий исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии, пористость определялась по изображениям

поперечных шлифов с использованием анализа изображений. Микротвёрдость измерялась при нагрузках HV0.1 и HV0.3, шероховатость поверхности оценивалась по параметрам Ra, Rz и Rt, а коррозионные свойства исследовались методом потенциодинамической поляризации в растворе 3,5 мас.% NaCl.

Установлено, что режимы напыления оказывают существенное влияние на плотность покрытия, пористость, микротвёрдость, шероховатость и электрохимическое поведение. Наименьшая пористость (3,2 ± 0,5%) наблюдалась при промежуточных режимах напыления, тогда как при более низких и более высоких энергетических условиях она составляла 4,5 ± 0,3% и 6,7 ± 1,6% соответственно. Выявлено снижение микротвёрдости с увеличением пористости, особенно при нагрузке HV0.3, что связано с влиянием межламеллярных дефектов на эффективную несущую способность покрытия.

Показано, что коррозионное поведение определяется не только общей пористостью, но и морфологией дефектов и связностью пор. Полученные результаты подтверждают, что энерговложение при плазменном напылении оказывает определяющее влияние на формирование структуры и свойств YSZ-покрытий и может быть использовано для оптимизации технологических режимов.

Ключевые слова: атмосферное плазменное напыление, YSZ-покрытия, энерговложение, микроструктура, пористость, микротвёрдость, шероховатость, коррозионное поведение.

ҒТАМР 55.13.29

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/132-150

А. Қадірсізова[1], Қ. К. Елемесов[2],
Д. Ж. *Басқанбаева[3], С. А. Қалмағанбетов[4]
[1,2,3,4]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6144-4816
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6168-2787
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1688-0666
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9248-4086
*e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university

ЖАҚТЫҚ ҰСАТҚЫШ КОРПУСЫНЫҢ БАЛАМА МАТЕРИАЛДАРЫН СӘӘ-МЕН ТАЛДАУ

Бұл мақалада үш түрлі материалдан: сұр шойыннан (SF), полимерлі бетоннан (PB) және FDM басып шығару әдісімен өндірілген ABS пластиктен жасалған жақ ұсатқыш корпусының кешенді ақырлы элементтік талдауы (МСЕ) берілген. Ортада статикалық кернеуді талдау, модальді (жиіліктік) талдау және жылулық талдау жүргізілді SolidWorks Simulation екі жүктеме деңгейінде: 50 кН (жұмсақ жыныс) және 150 кН (гранит). Нәтижелер шойынның қауіпсіздік коэффициентін FOS = 9,7 @ 50КН қамтамасыз ететінін көрсетеді, ал полимерлі бетон мен ABS пластмассасы сәйкесінше FOS = 3,76 және 2,8 береді. 150 кН жүктеме кезінде (гранит) ABS пластикасы бұзылады (FOS = 0,93 < 1,0), ал шойын FOS = 3,2 сақтайды, ал полимерлі бетон FOS = 1,2 жетеді. Модальды талдау полимербетонның меншікті қаттылық қатынасы √(E/ρ) жоғары болғандықтан ең жоғары табиғи жиілікке (1143,5 Гц) ие екенін көрсетті. Термиялық талдау ABS пластмассасының 111,8 °С-қа дейін қызып, әйнектің ауысу температурасынан (80–100 °С) асып, оны термиялық тұрғыдан жарамсыз ететінін анықтады. Шойын өнеркәсіптік ұсатқыштар үшін оңтайлы материал болып табылады; полимерлі бетон зертханалық қондырғылар үшін перспективалы болып табылады; ABS пластмассасы тек демонстрациялық материал ретінде жарамды.

Кілтті сөздер: жақ ұсатқыш; ақырғы элементтерді талдау; полимерлі бетон; сұр шойын; ABS-пластик; SolidWorks Simulation; модальды талдау; жылулық талдау.

Кіріспе

Жақ ұсатқыштар тау-кен өндіру, құрылыс және өңдеу өнеркәсібіндегі материалдарды кішірейтуге арналған ең көп таралған машиналардың бірі болып табылады. Корпус (рама) ұсақтау процесінде күрделі статикалық және динамикалық жүктемелерді қабылдайтын негізгі жүк көтергіш элемент болып табылады. Сұр шойын тарихи түрде жоғары қысу беріктігіне, жақсы өңдеуге қабілеттілігіне және демпферлік қасиеттеріне байланысты ұсатқыш корпустары үшін дәстүрлі материал ретінде қызмет етеді [1, 123–146-б.]. Сонымен қатар, жаңа

материалдардың – полимерлі бетонның және құрылымдық пластмассалардың пайда болуы технологиялық икемділік, коррозияға төзімділік және құрылымдық салмақты азайту тұрғысынан мүмкіндіктер ашады.

Полимерлі бетон (ПБ) - полимерлі байланыстырғышпен (эпоксидті немесе полиэфирлі шайыр) байланыстырылған минералды толтырғыштардан жасалған композициялық материал. Ол 80–120 мПа қысу беріктігін, шойынға қарағанда 6–8 есе жоғары дірілді сөндіруді, коррозияға төзімділікті және жақсы жылу оқшаулау қасиеттерін қамтамасыз етеді [2, 547–553-б., 3, 2–11-б.]. ПБ дірілді бақылау өте маңызды болып табылатын металл кесетін станоктар мен дәлме-дәл жабдықтардың төсектерінде сәтті қолданылды [4, 369–372-б.].

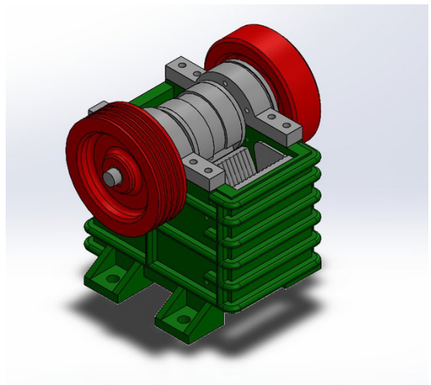
ABS пластмассасы (акрилонитрил бутадиен стиролы), әсіресе аддитивті өндіріс жағдайында (FDM 3D басып шығару) жылдам прототиптеу үшін арзан балама ұсынады. Оның механикалық қасиеттері металдардан айтарлықтай төмен болғанымен, оны оқу-әдістемелік және демонстрациялық мақсаттарда пайдалануға болады. Алдыңғы зерттеулер статикалық жүктеме кезінде FDM басып шығарылған құрамдастарды зерттеді [5, 248–257-б., 6, 219–230-б.], дегенмен, ұсатқыштардың корпустарына қолданылатын дәстүрлі материалдармен болатын кешенді салыстыру әдебиеттерде көрсетілмеген.

Бұл зерттеу жұмысы бұл олқылықты жақ ұсатқыш корпусының бір геометриясында қолданылатын материалдардың үш класын, яғни орта, ПБ және ABS пластиктерін жүйелі түрде СӘӘ (соңғы элементтер әдісі) салыстыру арқылы толтырады. Талдаудың үш түрі орындалды: дәлірек айтқанда, (i) жүктеменің екі деңгейіндегі статикалық құрылымдық талдауы, (ii) тербеліс қауіпсіздігін бағалау үшін модальді жиілікті талдау және (iii) пайдалану кезіндегі жылу режимін бағалау үшін тұрақты күйдегі жылу талдауы.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу мәселесі бойынша геометриялық және ақырғы элементтік модельді қарастырамыз. Жақ ұсатқыш корпусының параметрлік 3D-моделі SolidWorks 2023 бағдарламасымен әзірленген (сурет 1). Корпустың диаметрі 60 мм.лік эксцентрлік білікке және 150 × 250 мм.лі өлшемді ұсатқыштың саңылауларына арналған, бұл 5–11 кВТ шағын және орташа қуатты ұсатқышқа сәйкес келеді. Модельге бүйір қабырғалар, көлденең қатайтқыш тіректері, мойынтіректер және төрт бекіту табаны кіреді. Корпустың жалпы көлемі шамамен $7{,}8 \times 10^{-3}$ $м^3$ құрайды.

Тор үлгісі жаһандық элемент өлшемі 8 мм және кернеу концентрациясы аймақтарында 4 мм-ге дейін жергілікті нақтылаумен (мойынтірек саңылаулары, қабырғалардың түйіспелері, монтаждау табандары) құрастырылған. Тордың үйлесімділігі элементтің өлшеміне қатысты сезімталдығын зерттеумен расталған: яғни, өлшемнің азаюы Мизес бойынша ең жоғары кернеуді 3,5 %-дан кем өзгертеді. Төртбұрышты тетраэдрикалық элементтер (Tet10) пайдаланылды.



1-сурет – Жақ ұсатқыш корпусының 3D-моделі (SolidWorks)

Шекаралық шарттар мен жүктемелерге келетін болсақ, корпус шарттың көмегімен монтаждау табандарының тесіктеріне бекітіледі «Бекітілген геометрия» (барлық үш ось бойынша жылжу нөлге тең). Бұл ұсатқыштың іргетасының жақтауымен бұрандалы қосылысты модельдейді.

Екі сыртқы жүктеме қосылған: мойынтіректердің қондыру тесіктері арқылы басқарылатын үлестірілген күш (күш-1 = 5000 Н), ол тірек жүктемесі ретінде берілген; ішкі бүйір беттеріндегі үлестірілген күш, ол қабықшалардың корпусқа әсерін имитациялайды (күш -2=50000 Н немесе 150 000 Н). Гравитация g = 9,81 м/с² бүкіл модель үшін ескерілген, себебі дене массасы әртүрлі материалдар үшін бірдей ажыратылады (1-кесте).

Ұсақтау күші $F_{ұс.}$ мақсатты материалдың (гранит) сығылу беріктігінің шегінен бағаланды, σ_f = 150 мПа және жанасу аймағының проекциялары $А_к$:

$$F_{ұс.} = \sigma_f \cdot A_к = 150 \times 10^6 \cdot (0{,}02 \times 0{,}05) = 150\ Кн \qquad (1)$$

1-кесте – Зерттелетін материалдардың механикалық және жылуфизикалық қасиеттері

Қасиеттері	Сұр шойын	Полимербетон	ABS-пластик
Серпімділік модулі E, ГПа	110	30	2,3
Пуассон коэффициенті ν	0,26	0,22	0,36
Тығыздығы ρ, кг/м³	7 200	2 300	1 050
Созылу кезіндегі беріктік шегі, мПа	200	10	55
Сығылу кезіндегі беріктік шегі, мПа	700	100	55
Аққыштық шегі $\sigma_т$, мПа	200	80	55
Жылу өткізгіштік λ, Вт/(м·К)	50	1,0	0,17
Меншікті жылу сыйымдылығы c, Дж/(кг·К)	460	1 500	1 400
Шыныға ауысу / балқу температурасы T, °C	> 1200	> 150	80–100
Коэф. жылу тарату. α, ×10⁻⁶/К	10,5	12	90

Жұмсақ жыныстар үшін (әктас, $\sigma_f \approx 50$ мПа) сәйкес күш 50 кН. -ға тең. Жүктеудің осы нұсқалары ұсатқыштың пайдалану диапазонын қамтиды.

Статикалық кернеуді талдау бойынша иілгіш материалдар үшін (шойын, ABS) Мизес критерийі, сынғыш полимерлі бетон үшін максималды негізгі кернеу критерийі қолданылды. Қауіпсіздік маржасының коэффициенті FOS ретінде анықталды:

$$FOS = \frac{\sigma_{рұқ}}{\sigma_{max,VM}} \qquad (2)$$

мұндағы $\sigma_{рұқ}$ – аққыштық шегі (орта, ABS) немесе қысымдағы беріктік шегі (ПБ), және $\sigma_{max,}$VM – СЭӘ есебінен алынған Мизес бойынша максималды кернеу. МЕМСТ 25835 бойынша машиналардың жүк көтергіш элементтері үшін ең төмен рұқсат етілген FOS = 3,0 [7, 12-б.].

Модальді (жиіліктік) талдауға келсек, алғашқы бес табиғи жиілікті табу үшін еркін тербелістерді талдау жүргізілді ω_n меншікті мәндерге жалпыланған есепті шешу арқылы төмендегі формуланы аламыз:

$$[K]\{\varphi\} = \omega_n^2[M]\{\varphi\} \qquad (3)$$

мұндағы [K] – жаһандық қаттылық матрицасы, [M] – массалар матрицасы, {φ} – тербеліс формаларының векторы. Гц-тегі бірінші табиғи жиілік:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \qquad (4)$$

Дірілден қорғау коэффициенті (резонанс бойынша қор):

$$K_{рез} = \frac{f_1}{f_p} \qquad (5)$$

мұндағы f_1 – бірінші меншікті тербеліс жиілігі, f_p – қозғалтқыштың (немен қозу көзінің) жұмыс жиілігі. $K_{рез} > 1$ болғанда резонанс режимінен аулақ болу шарты қанағаттандырылады. Бір массалық жуықтауда меншікті жиілік меншікті қаттылықпен масштабталады:

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \qquad (6)$$

мұндағы f_1, f_2 – бастапқы және өзгертілген қаттылыққа сәйкес келетін меншікті жиіліктер, k_1, k_2 – конструкцияның сәйкес қаттылық мәндері, ал келтірілген масса m тұрақты деп қабылданады.

Жылулық талдау (тұрақты күй) бойынша, мойынтірек қондырғыларындағы үйкелістен жылу ағыны формула бойынша бағаланады:

$$q = \frac{\mu \cdot N \cdot v}{A_к} \quad (7)$$

мұндағы μ – үйкеліс коэффициенті, N – мойынтіректің қалыпты жүктемесі, v – сырғанау жылдамдығы, $A_к$ – жанасу ауданы. Беттің беткейлерінде 1000 Вт/м² жылу ағыны орнатылған. Барлық сыртқы беттерде – h = 12 Вт/(м² · К) коэффициентімен конвективті салқындату, ауа температурасы T∞ = 25 °C.

Тұрақты күйдегі жылу өткізгіштік теңдеуі:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (8)$$

яғни, жылу көзі болмаған және жылуөткізгіштік коэффициенті k тұрақты болған жағдайда тұрақты күй режимі Лаплас теңдеуіне келтіріледі. Қалыңдығы δ жазық қабырға үшін аналитикалық шешім (Фурье заңы):

$$q = \frac{k(T_1 - T_2)}{\delta} \quad (9)$$

мұндағы k – материалдың жылу өткізгіштік коэффициенті, T_1 және T_2 – қабырғаның сырт және ішкі беттеріндегі температуралар, δ – қабырғаның қалыңдығы.

Нәтижелер және талқылау

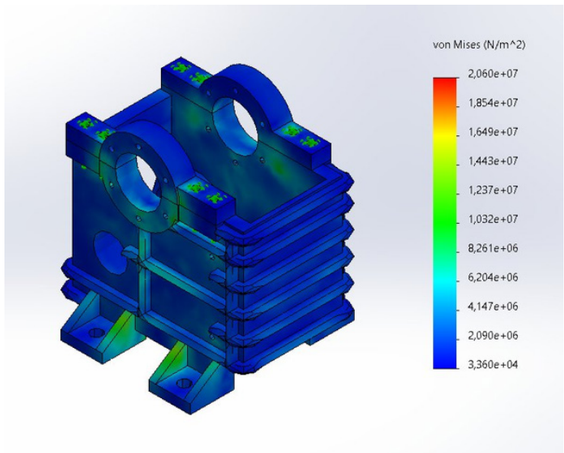
Статикалық кернеуді талдау 2- ші кестеде көрсетілген екі жүктемелі сценарий бойынша тағайындалған, ал тағайындалған үш материал үшін кернеулер мен қауіпсіздік коэффициенттеріне қатысты есептеу СЭӘ – нің нәтижелеріне қатысты жинақталды. Мизес бойынша кернеудің таралуы 2-4 суреттерде келтірілген.

Негізгі бақылау: Мизес бойынша максималды кернеулер барлық үш материал үшін іс жүзінде бірдей (50 кН-да 18-21 мПа және 150 кН-да 54-64 мПа). Бұл физикалық тұрғыдан қарағанда заңды, яғни берілген геометрия мен жүктеме кезінде кернеу өрісі материалдың қаттылығымен емес, барлық материалдардың сызықтық-серпімді әрекетін ескере отырып шекаралық және тепе–теңдік шарттарымен анықталады [8, 54–65-бб.].

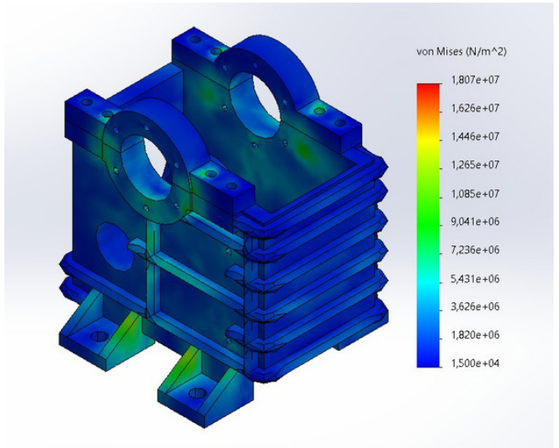
2-кесте – Статикалық СЭӘ -талдау нәтижелері

Параметр	Сұр шойын	Полимербетон	ABS-пластик
σ_{max} 50 кН, мПа кезінде	20,6	21,31	18,07
σ_{max} 150 кН, мПа кезінде	63,8	64,0	54,1
$\Sigma_{кос}$, мПа	200	80	55
FOS 50 кН кезінде	9,7	3,76	2,8
FOS 150 кН кезінде	3,2	1,2	0,93
Корпустың салмағы, кг	~180	~65	~28
50 кН кезінде бағалау	Өте жақсы	Жақсы	Шекаралық
150 кН кезінде бағалау	Норма	Критикалық	Қирау

Сондықтан анықтаушы параметр кернеудің шамасы емес, бұзылуға жақындығын көрсететін FOS қауіпсіздік шегі болып табылады. 150 кН жүктеме кезінде ABS пластмассасы FOS = 0,93 береді, бұл критикалық аймақтардағы максималды кернеудің (54,1 мПа) кірістілік шегінен (55 мПа) асып кетуін білдіреді. Бұзылу аймағы мойынтірек тірегінің бүйір қабырғамен түйіскен жерінде локализацияланған, бұл геометриялық біркелкі еместіктердегі кернеулердің концентрациясына сәйкес келеді [9, 1-5-бб.]. Бұл ABS пластиктен жасалған корпус гранитті ұсақтау кезінде пластикалық деформацияларға немесе сынуға ұшырайтынын білдіреді.



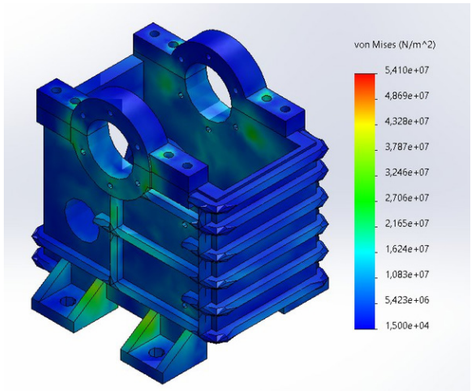
2-сурет – Мизес бойынша кернеудің таралуы – сұр шойын, F = 50 кН



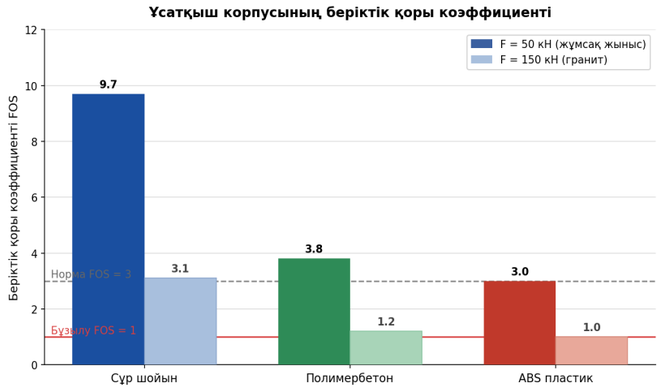
3-сурет – Кернеудің Мизес бойынша таралуы – ABS-пластик, F = 50 кН

Полимербетон 50 кН кезінде норма талаптарын қанағаттандыратын FOS = 3,76 қамтамасыз етеді (МЕМСТ 25835 бойынша FOS ≥ 3,0). 150 кН температурада FOS 1,2 шегіне дейін төмендейді жағдайы. Бұл ПБ-ның жұмсақ жыныстарды ұсақтауға жарамдылығын көрсетеді, бірақ қатты жыныстармен жұмыс істегенде топологиялық оңтайландыру немесе геометриялық күшейту қажет.

Сұр шойын сәйкесінше 50 кН және 150 кН температурада FOS = 9,7 және 3,2 көрсетеді, бұл оның ауыр ұсақтау қолданбалары үшін қолайлы материал ретіндегі мәртебесін растайды. Кернеулердің максималды концентрациясы монтаждау табандарының филе аймақтарында байқалады, бұл нәтижелерге сәйкес келеді [10, 76–78-бб., 11, 132–135-бб.].

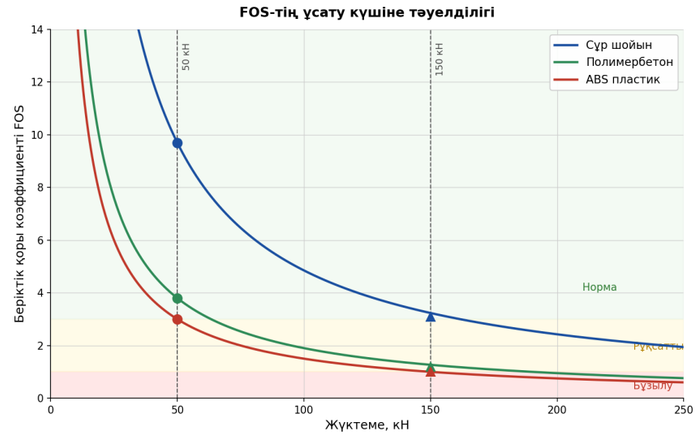


4-сурет – Кернеудің Мизес бойынша таралуы – ABS-пластик, F = 150 кН (бұзылу)



5-сурет – Екі жүктеме деңгейіндегі үш материалдың қауіпсіздік FOS коэффициенті

Модальді талдауға келетін болсақ, 3-кестеден көретініміз әрбір материал үшін алғашқы бес меншікті жиілік келтірілген. Ал, 7–8-суреттерде шойын мен ABS-пластик үшін тербелістің бірінші модасының пішіндері көрсетілген. Барлық жағдайда да бұл қабырғасының қырлы бүйір бөлігінің иілуі болып табылады, яғни, бұл келесі тұжырымды растайды: моданың пішінін геометрия анықтайды, ал оның жиілігін материал анықтайды.



6-сурет – FOS-тың ұсақтау күшіне тәуелділігі (аналитикалық қисықтар мен нүктелер SolidWorks)

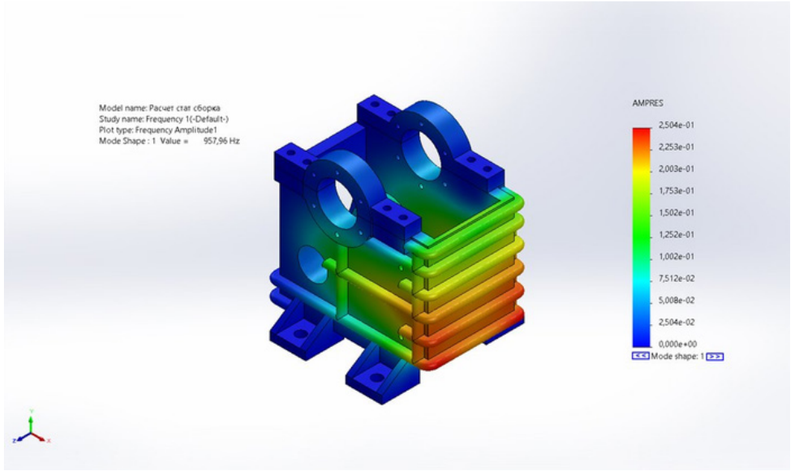
3-кесте – Үш материалға арналған ұсатқыш корпусының табиғи жиіліктері (Гц)

Мода	Сұр шойын	Полимербетон	ABS-пластик
1	957,96	1 143,5	443,27
2	1 045,7	1 240,8	491,99
3	1 134,0	1 348,6	530,43
4	1 398,1	1 667,6	647,58
5	1 511,1	1 798,7	702,91
Қоры R = f_1/ f жұм	192×	229×	89×

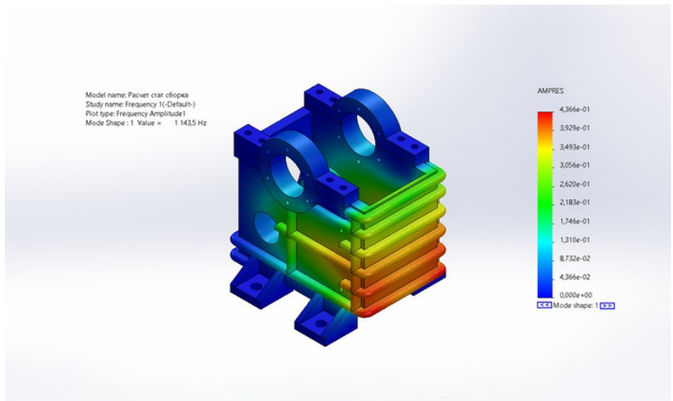
Барлық үш материалдың резонанстық шегі R ≥ 89, бұл жұмыс жиілігінен бірнеше есе көп болып есептеледі (жұм$_c$ = 5 Гц).

Табиғи жиіліктердің рейтингі күтпеген: ПБ (1143,5 Гц) төменгі серпімділік модулінде орташа жиіліктен (957,96 Гц) асып түседі. Бұл меншікті қаттылыққа байланысты:

$$\sqrt{\frac{E_{сш}}{\rho_{сш}}} = \sqrt{\frac{110 \times 10^9}{7200}} = 3\,909 \frac{м}{с} \qquad (10)$$



7-сурет – 1-ші тербеліс режиміне $Q_в$ ішіні сұр шойын, f_1 = 957,96 Гц

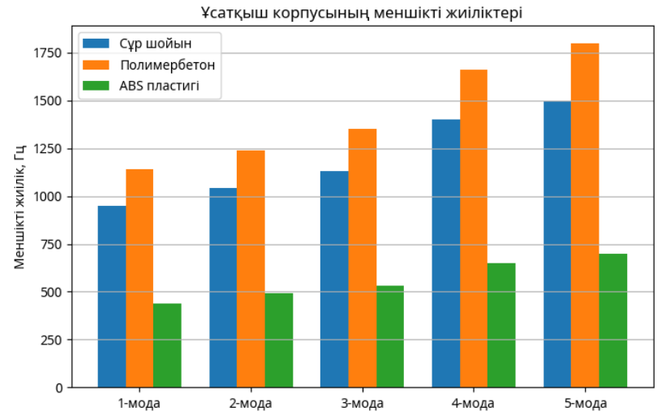


8-сурет – 1-ші тербеліс режимінің пішіні – ABS-пластик, f♯ = 443,27 Гц

$$\sqrt{\frac{E_{пб}}{\rho_{пб}}} = \sqrt{\frac{30 \times 10^9}{2300}} = 3\,611 \frac{м}{с} \quad (11)$$

$$\sqrt{\frac{E_{ABS}}{\rho_{ABS}}} = \sqrt{\frac{2{,}3 \times 10^9}{1050}} = 1480 \frac{м}{с} \quad (12)$$

Меншікті қаттылық ПБ (3611 м/с) орташа мәннен (3909 м/с) 7,6 %-ға ғана төмен, ал оның массасы 64 %-ға аз. Жылы бір массалық модельдің төменгі массасы бірдей қаттылық үшін табиғи жиілікті тікелей арттырады [12, 52–55-бб.]. Бұл дірілді бәсеңдету құрылыстың басымдығы болып табылатын РВ-ны тартымды балама етеді [13, 3061–3068-бб.].



9-сурет – Үш материалға арналған корпустың табиғи жиіліктері (5 мод)

ABS пластмассасының серпімділік модулі өте төмен болғандықтан (E = 2,3 ГПа) ең төменгі табиғи жиіліктерге (f♯ = 443 Гц) ие. R = 89 қоры пайдалану қауіпсіздігі үшін жеткілікті, алайда тербеліс амплитудасы орташа мәннен 2,8 есе артық, бұл ұзақ мерзімді жұмыс кезінде шаршаудың бұзылу қаупін арттырады [14, 221–244-бб.].

Төменде келтірілген 4-кестеде стационарлық жылулық талдаудың нәтижелері жинақталған. Ол жөнінде 10–12 суреттерде SolidWorks бағдарламасы бойынша жасалған температураның таралуын көре аламыз.

Сұр шойын жоғары жылу өткізгіштігінің арқасында жылуды тиімді таратады (λ = 50 Вт/(м·К)), бұл біркелкі температуралық өріске әкеледі (ΔT = 13,3°C) және T_{max} = 55,75°C – кез келген шекті мәннен бірнеше есе төмен. Қалыңдығы 25 мм қабырға үшін аналитикалық бағалау төменде келтірілген:

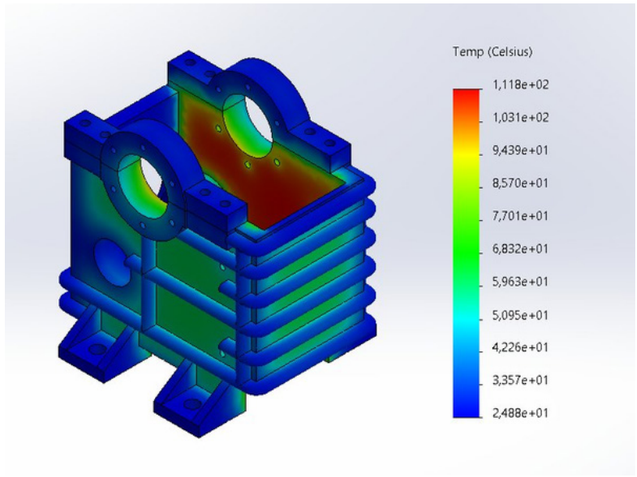
$$\Delta T_{СШ} = \frac{q \cdot \delta}{\lambda} = \frac{1000 \cdot 0{,}025}{50} = 0{,}5\ °C \quad (13)$$

4-кесте – Стационарлық жылулық талдаудың нәтижелері

Параметр	Сұр шойын	Полимербетон	ABS-пластик
T_max, °C	55,75	89,19	111,8
T_min, °C	42,41	25,64	24,88
Айырма ΔT, °C	13,34	63,55	86,92
λ, Вт/(м·К)	50	1,0	0,17
Материалдың шекті Т, °C	> 1 200	> 150	80–100
Жылулық күй	Норма	Шекаралық	Бас тарту

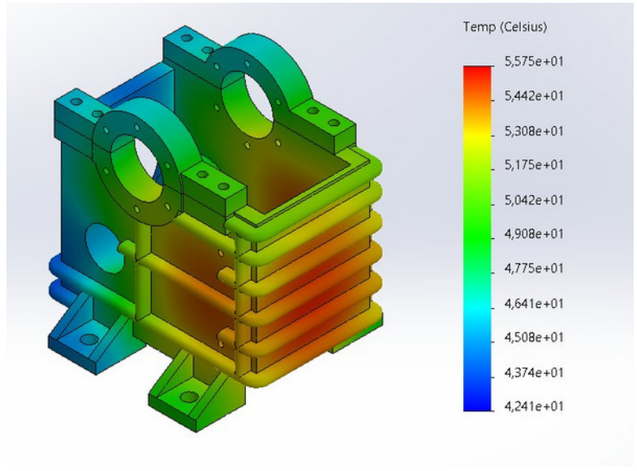
ABS-пластик λ = 0,17 Вт/(кезіндем·К) температураның теориялық айырмашылығын тудырады:

$$\Delta T_{ABS} = \frac{q \cdot \delta}{\lambda} = \frac{1000 \cdot 0{,}025}{0{,}17} \approx 147\ °C \quad (14)$$

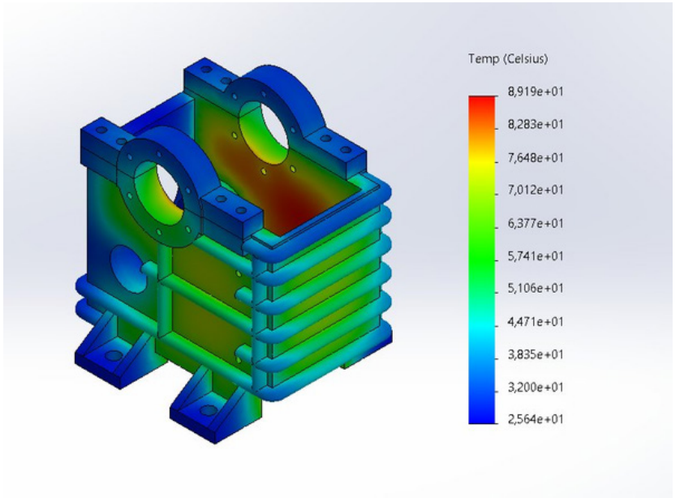


10-сурет – Корпустың жылу өрісі – сұр шойын, T_{max} = 55,75 °C

СЭӘ нәтижесі (ΔT = 86,9 °C) конвективті салқындау есебінен аналитикақ мәннен сәл төмен болды. Алайда $T_{макс}$ = 111,8 °C АБС-тің шыны ауысу температурысынан асады (T_g = 95–105 °C) [15, 425–428-бб.], бұл пішін мен көтергіштіктің үдемелі жоғалуына әкеледі.

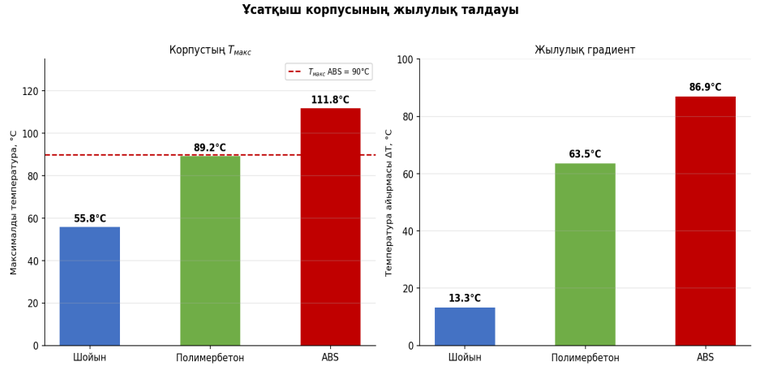


11-сурет – Корпустың жылу өрісі – ABS-пластик, Tmax = 111,8 °C

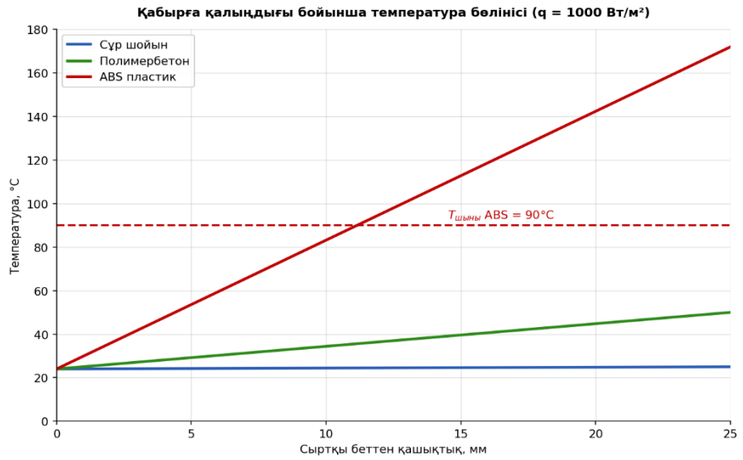


12-сурет – Корпустың жылу өрісі – полимербетон, T_{max} = 89,19 °C

Полимербетон T_{max} = 89,19 °C-ге жетеді, бұл эпоксидті матрицаның T_g = 100–120 °C мәнінің 0,75–0,89 бөлігіне сәйкес келеді [17; 74–80-бб.]. Ұзақ мерзімді жылулық жүктеме беріктікті 25%-ға дейін төменедетеді [18, 3–7-бб.], сол себепті ПБ корпусы салқындатуды немесе $T_g \geq 150$ °C байланыстырғышты қажет етеді.



13-сурет – Үш материал үшін T_{max} және ΔT термиялық градиентті салыстыру көрсеткіші



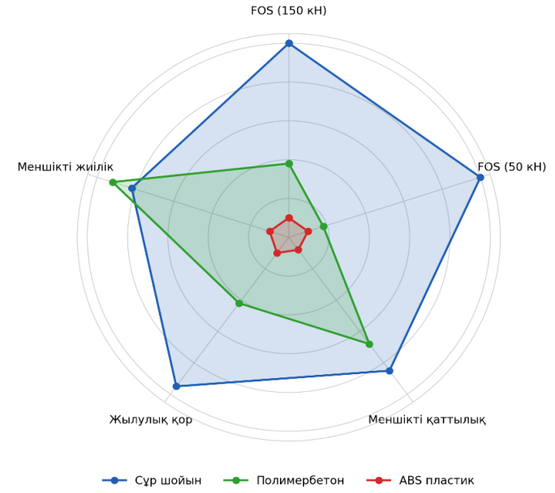
14-сурет – Температураның қабырға қалыңдығы бойынша аналитикалық таралуы (Фурье заңы, q = 1000 Вт/м²)

5-кестеде барлық нәтижелердің нормаланған салыстыруы, ал, 15-ші суретте радарлық диаграмма бес өлшем бойынша әрбір материалдың «сипаттамалар конверті» бейнеленді.

Нәтижелер құрылымдық және жылулық сипаттамаларының жиынтығы бойынша нақты иерархияларды көрсетеді: САН > ТБ >> ABS. Сонымен бірге, ПБ-ның салыстырмалы артықшылықтары екіұшты: ол табиғи жиіліктегі орташа мәннен асып түседі және қалыптың салыстырмалы түрде өңделуімен (қалыпқа құю) массаның 64% төмендеуін қамтамасыз етеді.

5-кесте – Корпус материалдарын қорытынды көп өлшемді салыстыру

Өлшем шарт	Сұр шойын	Полимербетон	ABS-пластик
σ_{max} 50 кН, мПа кезінде	20,6	21,31	18,07
σ_{max} 150 кН, мПа кезінде	63,8	64,0	54,1
FOS 50 кН кезінде	9,7 ✓✓	3,76 ✓	2,8 ~
FOS 150 кН кезінде	3,2 ✓	1,2 ~	0,93 ✗
1-ші меншік. жиілігі, Гц	957,96	1 143,5	443,27
Резонанс бойынша қор R	192×	229×	89×
T_{max}, °C	55,75	89,19	111,8
Айырма ΔT, °C	13,3	63,5	86,9
√(E/ρ), меншікті қаттылық, м/с	3 909	3 611	1 480
Корпустың салмағы, кг	~180	~65	~28
Қорытынды баға	Өте жақсы	Жақсы	Жарамсыз



15-сурет – Материалдарды бес критерий бойынша қорытынды салыстырудың радарлық диаграммасы

Бұл ПБ-ды зертханалық ұсатқыштар, жылжымалы қондырғылар, толтырғыштардың дәлме-дәл өндірісі үшін жеңіл және дірілді сезімтал қолдану барысындағы перспективті екенін көрсетеді [19; 15-17 бб.].

6-кесте – СЭӘ бойынша талдаудың барлық нәтижелерінің жиынтық кестесі

Критерий	Сұр шойын	Полимербетон	ABS пластик
σ_{max} (50 кН кезінде), МПа	20.6	21.31	18.07
σ_{max} (150 кН кезінде), МПа	63.8	64.0	54.1
FOS (50 кН кезінде)	9.7	3.76	2.8
FOS (150 кН кезінде)	3.2	1.2	0.93
1-ші меншікті жиілік, Гц	958	1144	443
Резонанс бойынша қор	192×	229×	89×
T_{max}, °C	55.8	89.2	111.8
ΔT айырмасы, °C	13.3	63.6	86.9
Қорытынды баға	Өте жақсы	Жақсы	Жарамсыз

Қорытынды

Осылайша, жоғарыда айтылғандардың негізінде кешенді СЭӘ-зерттеу нәтижелері төмендегідей нәтижелер берді:

Статикалық талдау. Үш материал да іс жүзінде Мизес бойынша бірдей кернеу өрісін көрсетті (50 кН кезінде 18–21 МПа), яғни кернеу, материалды емес, геометрия мен жүктемені анықтайтынын көрсетті. Шойын екі жүктемеге де (50 және 150 кН кезінде FOS = 9,7 және 3,2) төтеп береді. Полимербетон

50 кН (FOS = 3,76) кезінде ғана нормаға сәйкес келеді, ал АБС-пластик гранитке металдандырылады (FOS = 0,93 <1,0).

Модальды талдау. Полимербетон E/ ρ жоғары қатынас санағышқа қатысты өзінің ең үлкен (1143,5 Гц, R = 229 ×) жиілігін береді . Барлық үш материал резонанс бойынша жеткілікті қорды сақтайды (R> 85).

3 Жылулық талдау. АБС пластиктің температурасы 111,8 °C жетеді, яғни екінші тәуелсіз ауытқу механизімін қалыптастыратын шынылану температурасынан асып түседі. Ал, полимербетон 89,2 °C температураға жете отырып, эпоксидті матрицаның шегіне сәйкес келеді, бұл жағдайда қатты жыныстарды ұсақтау жеткілікті салқындатуды талап етеді.

4 Практикалық ұсынымдар. Сұр шойын қатты жыныстарды ұсақтау кезінде өнеркәсіптік жақ ұсатқыштар үшін оңтайлы таңдау болып қала береді.

Ағымдағы зерттеулердің перспективаларын атап кететін болсақ: физикалық үлгілердегі тензометрия әдісімен СЭӘ нәтижелерін тәжірибеде тексеру; циклдік жүктеу кезіндегі белгісіздік болжамын нақтылай отырып, гибридті ПБ-болат композиттік корпустарды оңтайлы құрылымдық шешім ретінде зерттеу болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Wills B. A., Finch J. A.** Wills' Mineral Processing Technology. – 8th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2016. – 512 p.

2 **Demirel B.** Mechanical and physical performance of polymer concrete containing different silica fume and styrene butadiene latex proportions // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 44. – P. 547–553.

3 **Czarnecki L., Vaysburd A. M.** Polymer concrete – past, present, and future // Journal of Materials in Civil Engineering. – 1999. – Vol. 11. – № 1. – P. 2–11.

4 **Schulz H., Wurmus H.** Polymer concrete for precision machine tool bases // Annals of the CIRP. – 1992. – Vol. 41. – № 1. – P. 369–372.

5 **Ahn S. H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K.** Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // Rapid Prototyping Journal. – 2002. – Vol. 8. – № 4. – P. 248–257.

6 **Rodríguez J. F., Thomas J. P., Renaud J. E.** Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials // Rapid Prototyping Journal. – 2003. – Vol. 9. – № 4. – P. 219–230.

7 МЕМСТ 25835-83. Жүк көтергіш крандар. Болат конструкцияларының элементтерін есептеу нормалары. – М. : Стандарттар баспасы, 1983.

8 **Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. – М. : Наука, 1975. – 576 с.

9 **Pilkey W. D.** Peterson's Stress Concentration Factors. – 2nd ed. – New York : Wiley, 1997. – 544 p.

10 **Bhandari V. B.** Design of Machine Elements. – 4th ed. – New Delhi : Tata McGraw-Hill, 2017. – 768 p.

11 **Vijayarangan S., Senthilkumar M., Jenarthanan M. P.** Finite element analysis of a jaw crusher // Journal of Scientific and Industrial Research. – 2008. – Vol. 67. – P. 132–135.

12 **Рао С. С.** Механические колебания: пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 544 с.

13 **Haddad H., Al Kobaisi M.** Optimization of the polymer concrete used for manufacturing bases for precision machine tools // Composites Part B: Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 3061–3068.

14 Suresh S. Fatigue of Materials. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1998. – 679 p.

15 **Brydson J. A.** Plastics Materials. – 7th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 1999. – P. 425–428.

16 **Ellis B.** The Kinetics of Cure and Network Formation // Chemistry and Technology of Epoxy Resins / Ed. B. Ellis. – Dordrecht : Springer, 1993. – P. 74–80.

17 **Zavatta N., Rondina F., Falaschetti M. P., Donati L.** Effect of thermal ageing on the mechanical strength of carbon fibre reinforced epoxy composites // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – № 12. – Art. 2006. – https://doi.org/10.3390/polym13122006

18 **Rebeiz K. S., Craft A. P., Fowler D. W.** Polymer concrete using coal fly ash // Journal of Energy Engineering. – 1993. – Vol. 119. – № 3. – P. 166–177.

19 **Dunaj P., Berczyński S., Chodźko M., Niesterowicz B.** Finite element modeling of the dynamic properties of composite steel–polymer concrete beams // Materials. – 2020. – Vol. 13. – № 7. – Art. 1630. – https://doi.org/10.3390/ma13071630

REFERENCES

1 **Wills B. A., Finch J. A.** Wills' Mineral Processing Technology. – 8th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2016. – 512 p.

2 **Demirel B.** Mechanical and physical performance of polymer concrete containing different silica fume and styrene butadiene latex proportions // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 44. – P. 547–553.

3 **Czarnecki L., Vaysburd A. M.** Polymer concrete – past, present, and future // Journal of Materials in Civil Engineering. – 1999. – Vol. 11. – № 1. – P. 2–11.

4 **Schulz H., Wurmus H.** Polymer concrete for precision machine tool bases // Annals of the CIRP. – 1992. – Vol. 41. – № 1. – P. 369–372.

5 **Ahn S. H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K.** Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // Rapid Prototyping Journal. – 2002. – Vol. 8. – № 4. – P. 248–257.

6 **Rodríguez J. F., Thomas J. P., Renaud J. E.** Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials // Rapid Prototyping Journal. – 2003. – Vol. 9. – № 4. – P. 219–230.

7 MEMST 25835-83. Zhük kötergish krandar. Bolat konstrukcziyalarynyń elementterin esepteu normalary [GOST 25835-83. Load-lifting cranes. Design norms for steel structure elements]. – Moscow : Standarttar baspasy, 1983. (in Kazakh)

8 Timoshenko S.P., Gud`er Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of Elasticity]. – Moscow : Nauka, 1975. – 576 p. (in Russian)

9 **Pilkey W. D.** Peterson's Stress Concentration Factors. – 2nd ed. – New York : Wiley, 1997. – 544 p.

10 **Bhandari V. B.** Design of Machine Elements. – 4th ed. – New Delhi : Tata McGraw-Hill, 2017. – 768 p.

11 **Vijayarangan S., Senthilkumar M., Jenarthanan M. P.** Finite element analysis of a jaw crusher // Journal of Scientific and Industrial Research. – 2008. – Vol. 67. – P. 132–135.

12 **Pao C. C.** Механические колебания: пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 544 с.

13 **Haddad H., Al Kobaisi M.** Optimization of the polymer concrete used for manufacturing bases for precision machine tools // Composites Part B: Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 3061–3068.

14 Suresh S. Fatigue of Materials. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1998. – 679 p.

15 **Brydson J. A.** Plastics Materials. – 7th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 1999. – P. 425–428.

16 **Ellis B.** The Kinetics of Cure and Network Formation // Chemistry and Technology of Epoxy Resins / Ed. B. Ellis. – Dordrecht : Springer, 1993. – P. 74–80.

17 **Zavatta N., Rondina F., Falaschetti M. P., Donati L.** Effect of thermal ageing on the mechanical strength of carbon fibre reinforced epoxy composites // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – № 12. – Art. 2006. – https://doi.org/10.3390/polym13122006

18 **Rebeiz K. S., Craft A. P., Fowler D. W.** Polymer concrete using coal fly ash // Journal of Energy Engineering. – 1993. – Vol. 119. – № 3. – P. 166–177.

19 **Dunaj P., Berczyński S., Chodźko M., Niesterowicz B.** Finite element modeling of the dynamic properties of composite steel–polymer concrete beams // Materials. – 2020. – Vol. 13. – № 7. – Art. 1630. – https://doi.org/10.3390/ma13071630

11.06.26 ж. баспаға түсті.
17.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
18.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. Кадирсизова[1], К. К. Елемесов[2], *Д. Д. Басканбаева[3], С. А. Калмаганбетов[4]
[1,2,3,4]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 11.06.26.
Поступило с исправлениями 17.06.26.
Принято в печать 18.08.26.

АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСА БОКОВОГО ДРОБИЛКИ С МКЭ

В данной статье представлен комплексный конечный элементный анализ (МСЕ) корпуса дробилки из трех видов материалов: серого чугуна (SF), полимерного бетона (PB) и пластика ABS, изготовленного методом печати FDM. Проведен анализ статического напряжения в среде, модальный (частотный) анализ и тепловой анализ SolidWorks Simulation на уровне двух нагрузок: 50 кН (мягкая порода) и 150 кН (гранит). Результаты показывают, что чугун обеспечивает коэффициент безопасности FOS = 9,7 @ 50КН, а полимерный бетон и пластмасса ABS дают FOS = 3,76 и 2,8 соответственно. При нагрузке 150 кН (гранит) ABS пластик разрушается (FOS = 0,93 <1,0), а чугун хранит FOS = 3,2, а полимерный бетон достигает FOS = 1,2. Модальный анализ показал, что полимербетон обладает самой высокой естественной частотой (1143,5 Гц), так как удельное соотношение жесткости является √ (E/ ρ). Термический анализ показал, что пластмасса ABS нагревается до 111,8 °C и превышает температуру перемещения стекла (80-100 °C), что делает ее термически непригодной для использования. Чугун является оптимальным материалом для промышленных дробилок; полимерный бетон является перспективным для лабораторных установок; Пластмасса ABS пригодна только в качестве демонстрационного материала.

Ключевые слова: боковой дробилка; анализ конечных элементов; полимерный бетон; серый чугун; ABS-пластик; SolidWorks Simulation; модальный анализ; тепловой анализ.

A. Kadirsizova[1], K. K. Yelemessov[2], *D. Zh. Baskanbayeva[3], S. Kalmaganbetov[4]
[1,2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 11.06.26.
Received in revised form 17.06.26.
Accepted for publication 18.08.26.

FEA SIDE CRUSHER SHELL EQUIVALENT MATERIAL ANALYSIS

This article presents a comprehensive finite element analysis (MCE) of the crusher body from three types of materials: gray cast iron (SF), polymer concrete (PB) and ABS plastic made by FDM printing. A fluid static stress analysis, a modal (frequency) analysis, and a SolidWorks Simulation thermal analysis were performed on two loads, 50 kN (soft rock) and 150 kN (granite). The results show that cast iron provides a safety factor of FOS = 9.7 @ 50KN, and polymer concrete and ABS plastic give FOS = 3.76 and 2.8, respectively. At a load of 150 kN (granite) ABS,

the plastic is destroyed (FOS = 0.93 <1.0), and cast iron stores FOS = 3.2, and polymer concrete reaches FOS = 1.2. Modal analysis showed that polymer concrete has the highest natural frequency (1143.5 Hz), since the specific stiffness ratio is √ (E/ ρ). Thermal analysis showed that ABS plastic heats up to 111.8 °C and exceeds the glass transfer temperature (80–100 °C), making it thermally unusable. Cast iron is the optimal material for industrial crushers; polymer concrete is promising for laboratory installations; ABS plastic is suitable only as a demonstration material.

Keywords: side crusher; finite element analysis; polymer concrete; grey cast iron; ABS plastic; SolidWorks Simulation; modal analysis; thermal analysis.

МРНТИ 55.27.15

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/151-162

Б. Манарбеккызы[1], *Д. Е. Елемес[2], М. У. Ходжабеков[3]

[1,2]Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л. Б. Гончарова, Республика Казахстан, г. Алматы;

[3]Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени Мирзо Улугбека, Республика Узбекистан, г. Самарканд.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8492-0708

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5645-1481

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3771-7091

*e-mail: techmashkz@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АДАПТИВНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА С НЕЛИНЕЙНЫМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В данной статье представлены результаты теоретического исследования динамических характеристик адаптивного вибрационного грохота, предназначенного для сортировки сыпучих материалов в условиях переменной динамической нагрузки. Разработана математическая модель двухмассовой колебательной системы, в которой традиционная линейная связь между несущей рамой и просеивающей поверхностью заменена на управляемую нелинейную упругую связь посредством геометрически нелинейных S-образных элементов. Аналитически, с использованием энергетического подхода и метода Рэлея-Ритца, выведена зависимость эффективной жёсткости системы от прогиба упругого элемента: $k_{eff}(\delta)=k_1+3\cdot k_3\cdot\delta^2$, где коэффициенты k_1, k_3 определяются геометрическими параметрами и механическими свойствами материала. Проведён параметрический анализ амплитудно-частотных характеристик методом численного интегрирования уравнений движения алгоритмом Рунге-Кутты 4-го порядка при изменении массы материала в диапазоне $m_{пот}...1{,}4\cdot m_{пот}$. Показано, что применение S-образных элементов обеспечивает автоматическую стабилизацию амплитуды колебаний в диапазоне ±8 % при изменении массы материала на ±40%, а также снижение пиковых динамических напряжений в раме сита на 20–22 % по сравнению с линейными аналогами. Расчётная оценка демонстрирует возможность снижения металлоёмкости конструкции на 12–18 % за счёт адаптивного перераспределения нагрузок. Результаты подтверждают перспективность применения предложенной конструкции в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности в условиях переменной загрузки без увеличения металлоёмкости и без изменения параметров вибровозбудителя.

Ключевые слова: вибрационный грохот, адаптивная жёсткость, нелинейная упругость, математическое моделирование, динамическая нагрузка, геометрическая нелинейность, колебательный режим.

Введение

Вибрационные грохоты широко применяются в горнодобывающей, строительной и перерабатывающей промышленности для механической сортировки сыпучих материалов [1; 2]. Эффективность процесса грохочения напрямую зависит от стабильности колебательного режима просеивающей поверхности. Однако при эксплуатации оборудования возникают существенные изменения массы материала на сите, обусловленные колебаниями влажности, гранулометрического состава и неравномерностью подачи [3; 4].

Известные технические решения, включая патенты и публикации [5; 6; 7], предусматривают различные способы регулирования параметров вибрации. Однако в указанных конструкциях несущая рама остаётся линейно-упругой системой с постоянной жёсткостью, что не обеспечивает адаптацию к переменной динамической нагрузке.

Противоречие между переменной нагрузкой и постоянной жёсткостью рамы приводит к отклонению режима колебаний от расчётного, росту динамических напряжений и ускоренному износу элементов конструкции [8; 9].

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование работоспособности и оценка динамических преимуществ конструкции адаптивного вибрационного грохота, в котором изменение эффективной жёсткости системы осуществляется автоматически за счёт геометрически нелинейных упругих элементов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

– впервые предложена и математически описана схема соединения колеблющейся рамы и рамы сита посредством пары встречно ориентированных S-образных элементов с переменной кривизной, работающих совместно с упругими беззазорными прижимами;

– аналитически выведена зависимость эффективной жёсткости $k_{eff}(\delta)=k_1+3 \cdot k_3 \cdot \delta^2$ для двухмассовой вибрационной системы грохота, где нелинейность обусловлена именно геометрией упругих элементов, а не материалами или внешним управлением;

– показано, что пассивная адаптация жёсткости через геометрическую нелинейность обеспечивает стабилизацию режима без энергозатрат на активное управление, что отличает предложенное решение от известных адаптивных систем с пневмоподвеской или магнитореологическими демпферами.

Задачи исследования:

– разработать математическую модель двухмассовой колебательной системы с переменной жёсткостью;

– аналитически вывести зависимость эффективной жёсткости от прогиба упругого элемента;

– провести параметрический анализ амплитудно-частотных характеристик при изменении динамической нагрузки;

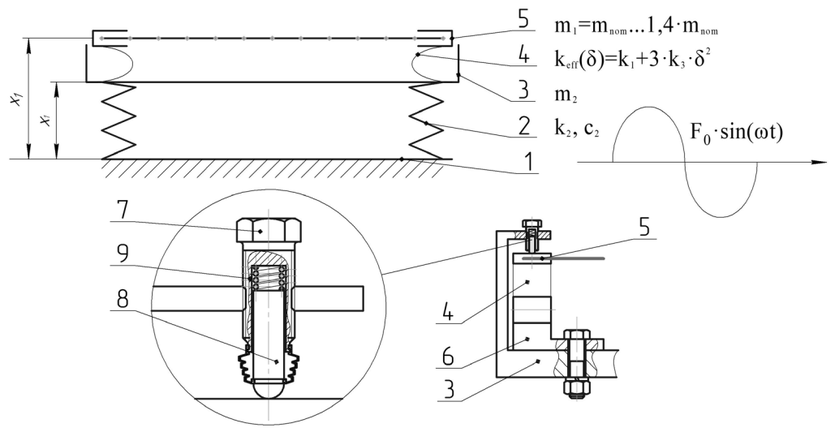
– оценить снижение динамических напряжений и металлоёмкости конструкции относительно линейного прототипа.

Конструктивная архитектура и физический принцип адаптации. Адаптивный вибрационный грохот представляет собой двухмассовую колебательную систему, в которой традиционная жёсткая связь между несущим коробом и просеивающей поверхностью заменена на управляемую нелинейную упругую связь. Конструктивно устройство состоит из основания, на котором через стандартные упругие опоры закреплена колеблющаяся рама с вибровозбудителем. Над ней установлена независимая рама сита, соединённая с несущей рамой посредством системы S-образных упругих элементов.

Ключевым конструктивным решением является применение S-образных упругих элементов с геометрически обусловленной нелинейной характеристикой жёсткости. Элементы расположены симметрично вдоль продольной оси грохота и работают преимущественно на изгиб в вертикальной плоскости. Один конец элемента шарнирно связан с колеблющейся рамой, а противоположный опирается через направляющий узел, обеспечивающий свободное вертикальное перемещение при деформации. Верхняя дуга S-образного профиля непосредственно передаёт колебания на нижнюю поверхность рамы сита. Нелинейность деформационной характеристики обеспечивается за счёт переменной кривизны профиля и изменения эффективного плеча приложения нагрузки в процессе прогиба.

Для обеспечения непрерывной передачи вибрационных усилий и исключения ударных взаимодействий при изменении зазоров применяется система упругих беззазорных прижимов. Каждый прижимной узел содержит предварительно сжатую пружину сжатия и подвижный плунжер со сферическим опорным торцом. Сферическая форма контакта компенсирует малые угловые отклонения рамы сита при колебательном движении, а пружина создаёт постоянное усилие прижатия, достаточное для удержания контакта в номинальном режиме.

Принцип работы устройства основан на автоматической адаптации эффективной жёсткости колебательной системы к переменной динамической нагрузке. В условиях номинальной загрузки деформация S-образных элементов незначительна, и система функционирует в квазижёстком режиме, эффективно передавая энергию от вибровозбудителя к просеивающей поверхности. При увеличении массы материала на сите, а также при изменении его влажности или гранулометрического состава, возрастают инерционные силы, действующие на раму сита. Под их действием S-образные элементы испытывают дополнительный прогиб, что приводит к изменению их текущей кривизны и, как следствие, к нелинейному росту эффективной жёсткости связи. Одновременно с этим происходит осевое перемещение плунжеров прижимных узлов, сжимающих пружины и компенсирующих относительное смещение рам. Таким образом, без изменения параметров вибровозбудителя и без утяжеления несущей конструкции достигается автоматическая стабилизация амплитудно-частотных характеристик и снижение пиковых динамических напряжений в раме сита.



1 – основание (неподвижное); 2 – основные упругие опоры (k_2, c_2);
3 – колеблющаяся рама с вибровозбудителем (m_2); 4 – адаптивная связь
($k_{eff}(\delta)=k_1+3\cdot k_3\cdot\delta^2$); 5 – рама сита с материалом (m_1, переменная);
6 – кронштейн крепления; 7 – прижимной элемент;
8 – плунжер; 9 – пружина; x_1, x_2 – обобщённые координаты;
$F_0\cdot\sin(\omega t)$ – вынуждающая сила вибровозбудителя
Рисунок 1 – Конструктивная схема адаптивного вибрационного грохота

Описанная физическая архитектура позволяет сформировать математическую модель, в которой эффективная жёсткость системы явно зависит от текущей деформации упругих элементов, что отражено в уравнениях движения, приведённых ниже.

Материалы и методы

Физическая основа предлагаемого решения отражена в расчётной схеме двухмассовой колебательной системы (рис. 1). В отличие от серийных грохотов, где связь между рамами принимается линейной, мы заменили её на адаптивный узел, базирующийся на паре встречно ориентированных S-образных упругих элементов.

Математическая модель строится на базе системы дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих движение масс m_1 и m_2:

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{eff}(\delta)\cdot\delta = 0 \\ m_2\ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{eff}(\delta)\cdot(x_2 - x_1) + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 = F_0\sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

где x_1, x_2 – обобщённые координаты (вертикальные перемещения масс);
$\delta=x_1-x_2$ – относительный прогиб упругих элементов;
$k_{eff}(\delta)$ – эффективная жёсткость адаптивной связи (нелинейная функция);
c – коэффициент вязкого демпфирования в адаптивной связи;
k_2, c_2 – жёсткость и демпфирование основных упругих опор;
F_0, ω – амплитуда и круговая частота вынуждающей силы от вибровозбудителя.

Ключевой параметр системы – эффективная жёсткость $k_{eff(\delta)}$, нелинейность которой обусловлена исключительно геометрией упругих элементов. Для её аналитического получения мы использовали энергетический подход. Потенциальная энергия деформации элемента записывается через интеграл по длине:

$$U = \int_0^L \frac{M^2(x)}{2EI(x)}dx \quad (2)$$

где M(x) – изгибающий момент, зависящий от текущей кривизны $\rho(\delta)$;
E – модуль упругости материала;
I(x) – момент инерции поперечного сечения.

Поскольку профиль элемента имеет переменную кривизну, радиус аппроксимировали функцией:

$$\rho(\xi) = \rho_0\cdot[1 + \alpha\cdot\xi\cdot(1-\xi)] \quad (3)$$

где α – коэффициент нелинейности, характеризующий степень изменения кривизны по длине элемента;
$\xi = x/L$ – безразмерная координата.

Коэффициент α характеризует степень изменения кривизны по длине дуги. Подстановка (3) в (2) и последующее дифференцирование потенциальной энергии по обобщённой координате δ даёт нелинейную силовую характеристику:

$$F(\delta) = k_1\cdot\delta + k_3\cdot\delta^3 \quad (4)$$

Соответственно, мгновенная жёсткость связи определяется как производная:

$$k_{eff}(\delta) = \frac{dF}{d\delta} = k_1 + 3k_3\cdot\delta^2 \quad (5)$$

При моделировании задавались параметры, соответствующие реальным условиям эксплуатации грохотов средней производительности (табл. 1). Значения $k_1=1{,}0\cdot10^6$ Н/м и $k_3=2{,}0\cdot10^8$ Н/м³ рассчитаны для элемента из стали 60С2А ($E=2{,}06\cdot10^{11}$ Па) с длиной L=0,3 м, толщиной h=8 мм и переменной кривизной, соответствующей патентной документации.

Таблица 1 – Исходные параметры математической модели

Параметр	Обозначение	Значение	Источник/обоснование
Масса рамы сита (ном.)	$m_{1\,nom}$	450 кг	Каталоги серийных грохотов
Масса колеблющейся рамы	m_2	320 кг	Конструкторский расчёт
Диапазон изменения массы материала	Δm	0...+40%	Эксплуатационные данные
Линейная составляющая жёсткости	k_1	1,0·10□ Н/м	Расчёт S-элемента

Нелинейный коэффициент	k_3	2,0 ·10 Н/м³	Параметрический анализ геометрии
Демпфирование в адаптивной связи	c	0,08 c_{cr}	Норм. диапазон для шарниров
Частота возбуждения	ω	15...25 Гц	Рабочий диапазон вибровозбудителя
Амплитуда силы	F_0	5000 Н	Номинальный режим

На основании параметрического анализа геометрических конфигураций был принят коэффициент нелинейности α=0,3. Коэффициент вязкого демпфирования c=0,08 · c_{cr} из диапазона значений, присущего вибрационным машинам с сухим трением в шарнирах [10; 11]. Чувствительность результатов к изменению входных параметров (±10 % по k_1, k_3, c) составила ±3–5 % по амплитуде колебаний, что говорит о надежности данных зависимостей.

Коэффициенты k_1, k_3 могут быть представлены в виде функций геометрических параметров (радиусы кривизны, длину, толщину), механические характеристики материала (E) а также условий их закрепления.

Условие беззазорного контактного взаимодействия рамы сита и колеблющейся рамы может быть обеспечено пружинными прижимными элементами сжимающего типа:

$$F_{clamp} = k_{spr} \cdot (x_0 - \Delta x) \geq F_{dyn}^{max} \quad (6)$$

где k_{spr} – жёсткость пружины прижима; x_0 – предварительное сжатие;
F_{dyn}^{max} – максимальная динамическая сила, Н;
Δx – текущее перемещение плунжера. Данное условие гарантирует передачу колебаний при номинальной нагрузке и компенсацию относительных перемещений при адаптации системы.

Численное интегрирование системы (1) выполнялось алгоритмом Рунге-Кутта 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Корректность модели проверяли двумя способами: контролем сходимости при дроблении шага интегрирования и сопоставлением предельного случая δ→0 с аналитическим решением классической линейной теории колебаний. Отклонение результатов не превысило 2,1 %.

Результаты и обсуждение

Зависимость эффективной жёсткости $k_{eff}(\delta)$, рассчитанная по формуле (5), демонстрирует два качественно разных режима работы (рис. 2). При малых прогибах (δ<10 мм) система функционирует в квазилинейной зоне, где k_{eff}≈k1=1,0 МН/м. Это гарантирует стабильную передачу колебаний в штатном режиме. При увеличении динамической нагрузки прогиб превышает пороговое значение δ_0≈20 мм, и включается геометрическое упрочнение. Жёсткость возрастает на 38 % при прогибе 25 мм и может достигать 150 % при δ=50 мм. Инженерный смысл данного эффекта заключается в том, что увеличение массы материала автоматически «поджимает» систему, смещая резонансную зону вправо и не давая амплитуде колебаний расти бесконтрольно.

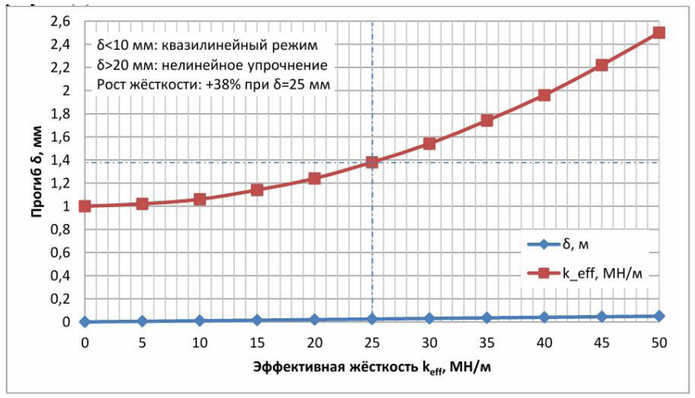


Рисунок 2 – Зависимость эффективной жёсткости keff от прогиба δ S-образного упругого элемента при k_1=1,0 · 10^6 Н/м, k_3=2,0 · 10^8 Н/м³

Амплитудно-частотные характеристики (рис. 3, табл. 2) наглядно показывают преимущество адаптивной схемы. В линейном прототипе (k_{lin}=4,0 ·10^7 Н/м) рост массы на 40 % сдвигает резонанс на 2,4 Гц (с 19,2 до 16,8 Гц), что часто выводит оборудование из рабочего диапазона. В предложенной конструкции смещение составляет всего 0,6 Гц. Отклонение рабочей амплитуды сокращается с ±22 % до ±8%, а коэффициент динамической перегрузки падает с 2,8 до 2,1. Снижение пиковых напряжений в раме сита на 22 % (с 185 до 144 МПа) напрямую открывает возможности для облегчения конструкции.

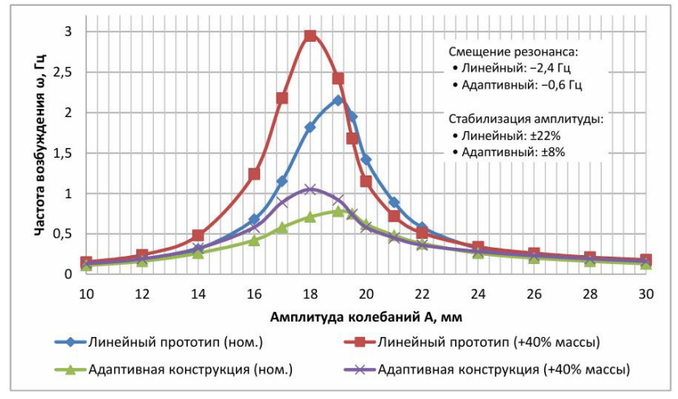


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики вибрационного грохота при номинальной нагрузке и увеличении массы материала на 40 %

Таблица 2 – Сравнительные динамические характеристики

Параметр	Прототип (линейная жёсткость)	Адаптивная конструкция	Изменение
Отклонение амплитуды при Δm=40%, %	ұ22	ұ8	↓ 64
Пиковые динамические напряжения в раме сита, МПа	185	144	↓ 22
Резонансная частота, Гц	19,2→16,8	19,5→18,9	Стабильнее в 4 раза
Коэффициент динамической перегрузки	2,8	2,1	↓ 25

Оценка пиковых динамических напряжений выполнена по упрощённой расчётной схеме: рама сита моделировалась как балка на упругом основании, нагруженная инерционными силами $F_{dyn}=m\cdot a_{max}$, где a_{max} – максимальное ускорение, полученное из численного решения системы (1). Изгибающий момент определялся как $M=F_{dyn}\cdot L_{eff}$, напряжения рассчитывались по формуле $\sigma=M/W$, где W - момент сопротивления характерного сечения рамы, принятый идентичным для обеих сравниваемых конструкций. Приведённые значения (185 и 144 МПа) являются относительными оценками для сравнительного анализа и не заменяют детального прочностного расчёта с учётом реальной геометрии сечений.

Под «адаптивным перераспределением нагрузок» в данном контексте понимается автоматическое изменение эффективной жёсткости упругой связи при росте динамической нагрузки, что приводит к снижению амплитуды вынужденных колебаний и, как следствие, к уменьшению инерционных сил, действующих на раму сита. Ориентировочная оценка снижения металлоёмкости выполнена на основе условия прочности при изгибе $\sigma=M/W\leq[\sigma]$. Снижение пиковых динамических напряжений на 22 % позволяет уменьшить требуемый момент сопротивления сечения W, что при сохранении геометрии профиля соответствует уменьшению толщины стенок на 10–15 %. В совокупности с возможностью отказа от дополнительных рёбер жёсткости это даёт оценочную экономию металла 12–18 % при сохранении коэффициента запаса прочности $n\geq1,5$. Указанная оценка является предварительной и подлежит уточнению при конструкторской проработке опытного образца.

Учитывая ориентацию разработки на самоходные сортировочные машины, нами дополнительно оценён переходный режим «транспорт→работа». Введённая в модель импульсная нагрузка, имитирующая контакт выдвижных опор с грунтом, показала, что нелинейное демпфирование сокращает время выхода на стационарные колебания с 8,2±1,1 с (линейный прототип) до 6,5±0,8 с. При предварительном поджатии опор время стабилизации уменьшается до 5,1±0,6 с, что критически важно для мобильной техники, часто меняющей позицию на площадке.

Анализ переходных режимов проводился численно путём моделирования реакции системы на ступенчатое импульсное воздействие, имитирующее установку опор на рабочее положение. Критерием выхода на стационарный режим принималось условие $|A(t)-Aст|/Aст<0,05$. Полученные значения времени стабилизации являются результатом математического моделирования

и подтверждают тенденцию к ускоренному затуханию переходных процессов в нелинейной системе. Экспериментальное подтверждение данных оценок запланировано на этапе испытаний натурного образца.

Текущая модель носит теоретический характер. В расчётах не учитывались сухое трение в направляющих, микролюфты соединений и температурные деформации. Тем не менее, полученные зависимости верифицированы численно и подтверждают принципиальную работоспособность концепции. Следующий этап исследования предусматривает изготовление лабораторного образца и сопоставление расчётных АЧХ с экспериментальными данными.

Выводы

1 Разработана математическая модель двухмассовой колебательной системы с геометрически нелинейной адаптивной связью. В отличие от классических подходов, жёсткость узла определяется не свойствами материала, а переменной кривизной S-образного профиля, что позволяет автоматически подстраивать динамику под переменную нагрузку.

2 Аналитически получена зависимость $k_{eff}(\delta)=k_1+3\cdot k_3\cdot\delta^2$. Численный анализ показал, что при росте нагрузки на 40 % эффективная жёсткость увеличивается на 18–38 % в зависимости от прогиба, что смещает резонансную зону всего на 0,6 Гц вместо 2,4 Гц у линейных аналогов.

3 Параметрическое моделирование амплитудно-частотных характеристик подтвердило стабилизацию рабочего режима: отклонение амплитуды колебаний не превышает ±8 %, пиковые динамические напряжения в раме снижаются на 20–22 %.

4 Снижение динамических нагрузок обосновывает возможность облегчения конструкции. Отказ от избыточных рёбер жёсткости и оптимизация сечений обеспечивают экономию металла 12–18 % без потери запаса прочности и усталостного ресурса.

5 Адаптивная система демонстрирует эффективность и в переходных режимах мобильной эксплуатации: время стабилизации колебаний после расстановки опор сокращается на 21–38 %. Результаты подтверждают целесообразность перехода к изготовлению опытного образца и натурным испытаниям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Lyman, G. J.** Principles of mineral processing / G. J. Lyman. – Littleton : Society for Mining, Metallurgy & Exploration. – 2016. – 412 p.

2 **Wills, B. A.** Wills' mineral processing technology / B. A. Wills, J. A. Finch. – 8th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann. – 2016. – 448 p.

3 **Deng, Z.** Numerical investigation of screening performance of vibrating screens / Z. Deng, Y. Zhao, C. Liu // Powder Technology. – 2020. – Vol. 360. – P. 1202–1214.

4 **Moraes, M.** A review of process models for wet fine classification with high frequency screens / M. Moraes, R. Galéry, D. Mazzinghy // Powder Technology. – 2021. – Vol. 394. – P. 525–532. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.078

5 **Yelemes, D. Y.** Studying grading of non-metallic materials on the spiral screen / D. Y. Yelemes, A. D. Kalieva // Key Engineering Materials. – 2012. – Vol. 531–532. – P. 346–350. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.531-532.346

6 **Yelemes, D.** Innovative spiral vibrating screen for high-quality cubical crushed stone : Design and validation / D. Yelemes, D. Yessentay, I. Rustemov [et al.] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – № 19. – Art. 10339. – https://doi.org/10.3390/app151910339

7 **Makinde, O. A.** Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries / O. A. Makinde, B. I. Ramatsetse, K. Mpofu // International Journal of Mineral Processing. – 2015. – Vol. 145. – P. 17–22. – https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.11.001

8 **Huang, X.** Effect of vibration parameters on screening performance of a circular vibrating screen / X. Huang, Y. Zhao, C. Liu // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2018. – Vol. 32. – № 12. – P. 5757–5766.

9 **Wang, G.** Experimental and numerical study on vibration characteristics of mining screens / G. Wang, J. Li, X. Tong // Shock and Vibration. – 2019. – Vol. 2019. – Art. 3241765.

10 **Kovacic, I.** The Duffing Equation : Nonlinear Oscillators and their Behaviour / I. Kovacic, M. J. Brennan. – Chichester : Wiley, 2011. – 368 p.

11 **Ibrahim, R. A.** Recent advances in nonlinear passive vibration isolators / R. A. Ibrahim // Journal of Sound and Vibration. – 2008. – Vol. 314. – № 3–5. – P. 371–452. – https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.01.014

12 **Bozhyk, D.** Determining the rational operating parameters for granite crushing to obtain cubiform crushed stone / D. Bozhyk, M. Sokur, V. Biletskyi // Minerals and Mineral Deposits. – 2022. – Vol. 16. – № 3. – P. 18–24. – https://doi.org/10.33271/mining16.03.018

13 **Govender, I.** A DEM-based approach for modeling vibrating screens / I. Govender, A. N. Mainza, M. S. Powell // Minerals Engineering. – 2012. – Vol. 31. – P. 28–36.

14 **Przemieniecki, J. S.** Theory of matrix structural analysis / J.S. Przemieniecki. – 2nd ed. – New York : Dover Publications. – 2021. – 384 p.

15 **Szymański, T.** Modeling of screening processes using DEM simulations / T. Szymański, P. Stefaniak // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2017. – Vol. 53. – № 2. – P. 597–609.

16 **Alabuzhev, P. M.** Vibro-protective systems with quasi-zero stiffness / P. M. Alabuzhev, A. A. Gritchin // Journal of Sound and Vibration. – 1989. – Vol. 129. – № 1. – P. 1–14.

17 **Carrella, A.** Static analysis of a passive vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic / A. Carrella, M. J. Brennan, T. P. Waters // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 301. – № 3–5. – P. 678–689. – https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.10.011

18 **Liu, C.** A review of vibration isolation techniques: From passive to active and semi-active control / C. Liu, X. Jing, S. Daley // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 70–71. – P. 1–25.

19 **Brennan, M. J.** Some recent developments in adaptive passive vibration isolation / M. J. Brennan, I. Kovacic, A. Carrella // Shock and Vibration Digest. – 2008. – Vol. 40. – № 4. – P. 281–293.

20 **Xu, D.** Design and experimental study of a quasi-zero-stiffness vibration isolator incorporating geometrically nonlinear springs / D. Xu, Q. Yu, J. Xu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 37. – № 1–2. – P. 339–351.

Поступило в редакцию 08.04.26.
Поступило с исправлениями 08.04.26.
Принято в печать 22.07.26.

Б. Манарбекқызы[1], *Д. Е. Елемес[2], М. У. Ходжабеков[3]
[1,2]Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Мирзо Улугбек атындағы Самарқанд мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті,
Өзбекістан Республикасы, Самарканд қ.
08.04.26 ж. баспаға түсті.
08.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕОРИЯЛЫҚ АДАПТИВТІ ДІРІЛДІ ЕЛЕУІШ ДИНАМИКАСЫН ЗЕРТТЕУ

Ұсынылған мақалада айнымалы динамикалық жүктемелер кезінде сусымалы материалдарды сұрыптауға арналған адаптивті тербелмелі экранның динамикалық сипаттамаларын теориялық зерттеу нәтижелері берілген. Екі массалық тербеліс жүйесінің математикалық моделі әзірленді, онда тірек жақтау мен скрининг беті арасындағы дәстүрлі сызықтық байланыс геометриялық сызықты емес S-тәрізді элементтерді пайдалана отырып, басқарылатын сызықты емес серпімді байланыспен ауыстырылады. Аналитикалық түрде энергетикалық тәсілді және Рэлея-Ритц әдісін қолдана отырып, жүйенің тиімді қаттылығының серпімді элементтің ауытқуына тәуелділігі шығарылды: $k_{eff}(\delta)=k_1+3\cdot k_3\cdot\delta^2$, мұндағы k_1, k_3 коэффициенттері материалдың геометриялық параметрлері мен механикалық қасиеттерімен анықталады. Амплитудалық-жиілік сипаттамаларының параметрлік талдауы 4-ші ретті Рунге-Кутты алгоритмімен қозғалыс теңдеулерінің сандық интегралдау әдісімен $m_{пот}$...$1{,}4\cdot m_{пот}$ диапазонында материалдық массалардың ауытқуларымен орындалды. S-тәрізді элементтерді пайдалану материал массасының ±40 % ауытқуымен тербеліс амплитудасын ±8 % диапазонында автоматты тұрақтандыруды қамтамасыз ететіні, сонымен қатар сызықтық аналогтармен салыстырғанда экран жақтауындағы динамикалық кернеулердің шыңының 20–22 %-ға төмендеуін

қамтамасыз ететіні көрсетілді. Есептелген бағалау бейімделгіш жүктемені қайта бөлу арқылы құрылымның металды тұтынуын 12–18 % ға азайту мүмкіндігін көрсетеді. Нәтижелер металл шығынын арттырмай немесе діріл қоздырғыштарының параметрлерін өзгертпей, ауыспалы жүктеме жағдайында тау-кен өндіру және өңдеу өнеркәсібінде пайдалану үшін ұсынылған жобаның әлеуетін растайды.

Кілтті сөздер: вибрациялық елеуіш, адаптивті қатаңдық, сызықтық емес серпімділік, математикалық модельдеу, динамикалық жүктеме, геометриялық сызықтық еместік, тербелмелі режим.

B. Manarbekkyzy[1], *D. Y. Yelemes[2], M. U. Khodjabekov[3]
[1,2]L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Mirzo Ulugbek Samarkand State University
of Architecture and Construction, Republic of Uzbekistan, Samarkand.
Received 08.04.26.
Received in revised form 08.04.26.
Accepted for publication 22.07.26.

THEORETICAL STUDY OF THE DYNAMICS OF AN ADAPTIVE VIBRATING SCREEN

This article presents the results of a theoretical study of the dynamic characteristics of an adaptive vibrating screen designed for sorting bulk materials under variable dynamic loading. A mathematical model of a two-mass oscillatory system has been developed, in which the traditional linear connection between the supporting frame and the screening surface is replaced by a controlled nonlinear elastic connection via geometrically nonlinear S-shaped elastic elements. Using an energy approach and the Rayleigh–Ritz method, the dependence of the system's effective stiffness on the deflection of the elastic element was analytically derived: $k_{eff}(\delta)=k_1+3\cdot k_3\cdot\delta^2$, where the coefficients k_1, k_3 are determined by the geometric parameters and mechanical properties of the material. A parametric analysis of amplitude-frequency characteristics was performed by numerical integration of the equations of motion using the 4th-order Runge–Kutta method, with material mass varying in the range $m_{nom}...1,4\cdot m_{nom}$. The results demonstrate that the use of S-shaped elements provides automatic stabilization of vibration amplitude within ±8 % when material mass varies by ±40 %, as well as a 20–22 % reduction in peak dynamic stresses in the screen frame compared to linear analogues. A computational assessment indicates the potential to reduce the metal consumption of the structure by 12–18 % through adaptive load redistribution. The findings confirm the prospects of applying the proposed adaptive screen design in mining and processing industries under variable loading conditions, without increasing metal consumption or modifying the parameters of the vibration exciter.

Keywords: vibrating screen, adaptive stiffness, nonlinear elasticity, mathematical modeling, dynamic load, geometric nonlinearity, oscillatory regime.

МРНТИ 55.57.43
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/163-181

****Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], А. Ю. Коноплин[3], Г. А. Оразбаев[4], А. Ж. Байгунусов[5]***
[1,2]ТОО «Европлюс Восток», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, г. Москва;
[4,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2977-693X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3639-5590
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5985-0200
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8607-4986
*e-mail: bek_m78@mail.ru

РАЗРАБОТКА НОВОГО ТИПА МЕЛЬНИЦЫ С КИНЕМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ПОМОЛА ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

Совершенствование энергоемких процессов тонкого измельчения материалов является важной промышленной проблемой. В настоящее время в промышленности измельчается более миллиарда тонн порошков, причем энергозатраты на их производство превышают 20 % производства электроэнергии. К тому же в результате износа рабочих органов измельчителей теряется несколько миллионов тонн высококачественных сталей ежегодно. Качество продукции ряда отраслей промышленности, прежде всего строительной, промышленности строительных материалов, дорожного строительства, горной, электронной, сельскохозяйственной, химической и др. во многом зависит от качества исходного сырья – крупности, чистоты, формы зерен и т.д. Особенно большое внимание в последнее время уделяется вопросу крупности исходного сырья. Это связано с тем, что скорость процессов с участием веществ в твердом состоянии пропорциональна величине поверхности частиц и поэтому резко возрастает с повышением дисперсности порошков. Объектом исследования является оборудование для измельчения отходов производства.

Цель работы – повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения отходов производства и растениеводства. В результате исследований разработана и изготовлена мельница одномодульная с кинематическим измельчающим устройством, которая реализует рабочий процесс опытно-промышленного образца 3-х модульной мельницы путем измельчения при производстве известнякового щебня на 3 стадии отходов дробильно-сортировочной фабрике. Модульное исполнение мельницы позволило опробовать 3 режима ее работы. Результаты исследований реализованы

в серии заявок на изобретения, часть из которых ранее была признана изобретениями.

Ключевые слова: износ, барабана мельницы, энергонапряженность, рабочая камера, корпус, загрузочный лоток.

Введение

Значение процесса тонкого измельчения материалов возрастает также в связи с проблемой переработки и утилизации промышленных отходов и отходов растениеводства и создания безотходных производств. С увеличением дисперсности конечных продуктов производительность процессов тонкого измельчения быстро снижается при одновременном резком повышении энергозатрат, а начиная с некоторой предельной для данного материала и способа разрушения его частиц, дисперсности, обычно, при крупности частиц менее 10–15 мкм, дальнейшее измельчение становится невозможным. Применяемые в настоящее время мельницы для тонкого измельчения – шаровые, бисерные, струйные, вибрационные и др. имеют ряд недостатков, это высокая энергоемкость процесса, невысокая удельная производительность, быстрый износ мелющих тел, засорение продукта материалами футеровок, измельчающих тел и т.д.

В связи с вышеизложенным, совершенствование помольного оборудования, применение более эффективных и экономичных способов измельчения в настоящее время является актуальной научной и хозяйственной проблемой. Как показали предыдущие исследования, одним из наиболее перспективных направлений решения поставленной задачи по снижению энергоемкости процесса тонкого измельчения материалов и повышению его эффективности является применение для тонкого измельчения способа разрушения частиц знакопеременными истирающе-раздавливающими воздействиями в поле центробежных сил [1 с. 10–16,], [2, с. 107–116], [3, с. 3–11].

Материалы и методы

Согласно современным представлениям процесс измельчения классифицируется по стадиям, в зависимости от крупности конечного продукта [4, с. 33], [5, с. 169–176]. Основные стадии процесса измельчения и их энергоемкость приведены в таблице 1, из которой следует, что тонкое и сверхтонкое измельчение характеризуется высокими энергетическими затратами.

Таблица 1 – Основные стадии процесса измельчения и их энергоемкость

№	Стадии измельчения		Крупность готового продукта	Расход энергии, $\frac{Дж}{кг} \cdot 10^{-3}$
1	Дробление	Крупное	0,1 – 0,35	10,8 – 14,4
2		Среднее	0,04 – 0,1	14,4 – 18,0
3		Мелкое	(0,05-4) ·	18,0 – 21,6
4	Помол	Грубый	(5-0,1) ·	72,0 – 108,0
5		Тонкий	(100-50) ·	360 - 3600
6		Сверхтонкий	менее 5 ·	Более 3600

Основными способами разрушения частиц материала в процессе его измельчения являются удар, раздавливание, истирание и их комбинации (таблица 2) [6 с. 185–196].

В машинах ударного действия измельчение материала производится вследствие ударных нагрузок. Эти нагрузки возникают при падении измельчающих тел на материал, столкновения летящего материала с неподвижной поверхностью, столкновения материала и измельчающих тел в полете, столкновения в полете самих измельчающихся частиц друг с другом.

В машинах истирающе-раздавливающего типа измельчение материала происходит комбинированным действием прямого раздавливания с истиранием. В нашем случае истирание материала предусмотрено в самой конструкции измельчителя и в процессе измельчения оно играет положительную роль.

Таблица 2 – Основные способы тонкого измельчения и их конструктивная реализация

№	Способы тонкого измельчения	Машины для тонкого измельчения
1	Раздавливание	Гладковальцовые, ролико-кольцевые
2	Раздавливание и истирание	Бегуны, шаро-кольцевые, катково-тарельчатые, жерновые, бисерные, дисковые
3	Разрушение ударом	Дезинтеграторы и дисмембраторы, бильные, центробежные
4	Разрушение ударом и истиранием	Вибрационные, центробежно-планетарные и эпициклические, шаровые, гироскопические, конусные, электромагнитные, вихревые, струйные

Для получения истирающего эффекта поверхности, раздавливающие материал, должны в соответствующих точках иметь разность линейных скоростей движения. Это и предусмотрено во всех конструкциях измельчителей истирающе-раздавливающего действия. К ним относятся жернова, бегуны, катково-тарельчатые, шаро-кольцевые, вальцовые, бисерные мельницы и др.

Конструкции машин для тонкого измельчения материалов отличаются большим разнообразием. Учитывая задачи, решаемые в данной работе, нами был проведен сравнительный анализ эффективности существующего помольного оборудования, применяемого для получения порошков, дисперсность которых равна 5 – 10 мкм. Эффективность работы измельчителей оценивалась в первую очередь по общепринятому показателю энергоемкости, характеризующему затраты энергии при получении единицы готового продукта:

$$N_{ud} = \frac{N}{P} \quad (1)$$

где N – мощность привода мельницы, кВт;

P – производительность мельницы по готовому продукту, т/ч.

Применялись также следующие оценки эффективности [6]:

$$G_{ud} = \frac{G}{P}; \quad (2)$$

$$P_{NG} = \frac{N_{ud}}{P_{ud}} \quad (3)$$

где G – металлоемкость мельницы; т · ч/т;

P_{NG} – обобщенный показатель энерго- и металлоемкости, кВт · $ч^2$/т.

Кроме этого, в соответствии с рекомендациями оценивалась интенсивность процесса измельчения в помольной камере мельницы:

$$J_k = \frac{N}{V_k \cdot \omega_k} \quad (4)$$

где, N – мощность, рассеиваемая в загрузке, Вт;

V_k – объем перерабатываемого материала, $м^3$;

ω_k – частота колебаний (угловая частота), $с^{-1}$.

Из проведенного анализа следует, что наиболее эффективными измельчителями являются планетарные мельницы, а наиболее перспективными из известных видов помольного оборудования являются мельницы с мелющими телами (таблица 3).

Измельчение в шаровых мельницах происходит во вращающемся барабане с помощью загруженных в него мелющих тел ударом и истиранием частиц материала мелющими телами [7, с. 1015–1033], [8, с. 65–72]. Эффективность процесса измельчения зависит от массы, размеров, материала и скорости соударения мелющих тел, а также от вероятности попадания частицы материала в активную зону между двумя шарами и вероятности протекания одного из процессов разрушения в активной зоне. Износ шаров и барабана мельницы зависит от количества измельчаемого материала и достигает максимума, когда заполнена одна десятая пространства между шарами, а затем он резко снижается. Кроме того, отмечается, что износ шаров зависит от соотношения действительной твердости шара и частицы. Шары из сравнительно нетвердого материала, на которых скапливаются более твердые частицы, могут изнашиваться медленнее (процесс самофутеровки), чем шары из более твердого материала.

Исследования процесса помола с мелющими телами различной формы: шары, кубы, цилиндры, диски, набор шаров различного диаметра, шары с плоскими круглыми гранями, кубы со срезанными углами – показали преимущество сферической формы мелющих тел в производительности мельниц, в расходе энергии на единицу измельчаемого материала, в среднем износе мелющих тел. Производительность зависит от количества материала, заключенного в пространстве между шарами, она бывает максимальна, когда это пространство практически заполнено. Скорость помола возрастает на 40 %, когда уменьшается диаметр мелющих тел, увеличивается их масса по сравнению с массой материала, возрастает скорость вращения мельницы. Основным недостатком барабанных мельниц является то обстоятельство, что скорость их вращения

должна быть меньше некоторой критической скорости, при которой загрузка вследствие больших центробежных сил покрывает равномерным слоем внутреннюю поверхность барабана и не отрывается от него (процесс измельчения при этом прекращается).

Анализ работы трубных мельниц показывает, что принципиально невозможно повысить их эффективность даже при возможном значительном повышении их энергонапряженности. Действительно, материал в шаровой мельнице нагружается преимущественно ударом и трением. При этом во время вращения мельницы лишь сравнительно небольшая часть частичек измельчаемого материала благоприятно попадает под действие измельчающих шаров. Нагружающий измельчающий шар ударяет или давит на группу зерен, гранулометрический состав которых оказывает решающее влияние на то, какие силы будут воздействовать на отдельное зерно и как распределится энергия. Воздействие в самом неблагоприятном смысле происходит тогда, когда энергия, образующаяся при падении шара, недостаточна для того, чтобы измельчить встретившуюся частичку и тогда, когда эта энергия намного превосходит оптимальный расход энергии. Лишь в пределах узкого диапазона относительной степени измельчения имеется возможность создать благоприятные условия измельчения. В итоге можно сказать, что трубная мельница не дает возможность путем увеличения скоростей нагружения (энергонапряженности мельницы) улучшить результаты измельчения ударным способом разрушения частиц. Таким образом, при работе шаровой мельницы на сверхкритических скоростях, когда контур дробящей загрузки приближается к окружности, подразумевается, что процесс измельчения в этом случае прекращается.

В обычных мельницах с падающими телами при критической скорости шар или стержень может перемещаться под действием центробежной силы только тогда, когда отсутствует скольжение. Именно к этому обычно стремятся в шаровых мельницах. Для того, чтобы избежать скольжения, поверхности футеровки придают различную форму с более или менее выраженным рельефом. Одновременно снижается износ футеровки.

В противоположность этому стремлению избежать скольжения, в машинах, работающих на сверхкритических скоростях, пытаются заставить мелющие тела скользить по поверхности футеровки. Отсюда следует, что в последнем случае поверхность футеровки должна быть гладкой. За счет возникновения разницы в скоростях наружного слоя мелющих тел и поверхности футеровки создается эффективная, новая по сравнению с современной практикой, зона измельчения. Когда скорость переходит в область сверхкритических, в общем объеме измельчения резко возрастает доля измельчения истиранием.

Интенсивное тонкое измельчение материала истиранием происходит между футеровкой и наружным слоем шаров, имеющих различные линейные скорости. Чем тоньше должен измельчаться материал, тем выше должна быть скорость вращения мельницы. В мельнице, наполовину заполненной мелющими телами, скольжение между наружным слоем мелющих тел и гладкой футеровкой существовать не может. Было установлено, что количество измельченного

материала, также, как и необходимая мощность, возрастает линейно с увеличением скорости вращения мельницы. При шаровой загрузке, занимающей 14 % объема мельницы и производительности 2 т/ч по готовому продукту крупностью 60 – 70 мкм, расход энергии составил 6,15 кВт·ч/т, что в несколько раз ниже энергоемкости процесса помола в обычных шаровых мельницах.

Трубные мельницы самоизмельчения выгодно отличаются от шаровых трубных мельниц тем, что в качестве мелющих тел в них используются крупные куски самого измельчаемого материала [9, с. 1167–1180], [10].

На основе анализа процесса тонкого и сверхтонкого помола в струйных мельницах можно сделать вывод относительно одного из возможных направлений повышения эффективности процесса тонкого измельчения, который заключается в следующем: при тонком помоле материалов в машинах, реализующих одновременно несколько способов измельчения, необходимо по мере повышения дисперсности повышать степени влияния способа измельчения истиранием по сравнению с другими способами.

Цель исследования вибрационных мельниц заключалась в определении возможности их применения в больших масштабах в производстве вяжущих и ряда других строительных материалов. Одной из основных причин, обусловивших потребность в разработке таких мельниц, явилась малая энергонапряженность вращающихся трубных мельниц. В вибрационных мельницах мелющие тела движутся с ускорениями, значительно превышающими ускорение силы тяжести. В противоположность обычным шаровым мельницам, в которых с трудом достигается тонкость помола менее 60 мкм, в вибрационных мельницах можно достичь более тонкого помола при сравнительно меньших затратах энергии и износе установки. Эти преимущества вибрационных мельниц объясняются наличием высокочастотных воздействий на измельчаемый материал, определяющих интенсивность помола (обычно 1500 и 3000 колебаний в минуту при амплитуде соответственно 4 и 2 мм). Варьированием соотношения частоты и амплитуды можно достичь значительного увеличения интенсивности помола. Однако амплитуду колебаний барабана мельницы приходится ограничивать из прочностных соображений, для предотвращения усталостного разрушения конструкции мельницы. Вместе с тем важно подчеркнуть, что амплитуда вибраций не должна быть ниже удвоенного размера наибольшей частицы материала. В противном случае скорость помола резко снижается.

Вибрационные измельчители предназначены для измельчения материала с исходной крупностью частиц от 1 до 2 мм, до частиц размером от 10 до 50 мкм. Высокая степень измельчения и такая дисперсность продуктов измельчения достигается как за счет самого способа (удар и истирание), так и состояния материала в измельчителе. Частицы материала все время находятся во взвешенном состоянии и вибрируют, что препятствует их слипанию и спрессовыванию. Тонина помола в вибрационной мельнице периодического действия зависит от времени пребывания материала в зоне измельчения, а производительность измельчителя – от его параметров, физико-механических свойств измельчаемого материала

и условий ведения процесса. На производительность данного измельчителя большое влияние оказывает крупность готового продукта и сопротивляемость материала размолу. С увеличением тонины размола производительность мельницы уменьшается.

При вибрации измельчаемый материал следует подвергнуть воздействию относительно небольших усилий, «расшатывающих» структуру материала. Каждое из таких воздействий намного ниже предельного и не приводит к разрушению, однако их совокупность эффективно «расшатывает» имеющиеся дефекты структуры, вызывает образование новых дефектов. При достаточной частоте и длительности воздействий происходит разрушение частиц, в отличие от обычных методов измельчения, когда тело разрушается вследствие единичного акта воздействия внешних сил. Процессы измельчения ударом и истиранием взаимно связаны. В процессе вибрационного измельчения интенсивно участвуют только тонкие слои мелющих тел, поэтому помольную камеру следует разбивать на ряд камер меньшего размера.

Эффективность помола при сложно пространственной траектории колебаний более высокая, чем при круговой. При тонком измельчении следует увеличивать частоту колебаний, а при грубом помоле амплитуду. Эффективность вибрационной мельницы находится в прямой зависимости от плотности материала мелющего шара, диаметра мелющих шаров и диаметра измельчаемых частиц. Степень влияния вышеперечисленных факторов неодинакова в мельницах различной конструкции и определяется каждый раз экспериментально.

Появление неуравновешенных динамических сил при работе вибрационных мельниц налагает ограничения на их габариты и интенсивность колебаний помольного барабана и, следовательно, на их производительность, которая обычно не превышает несколько тонн в час. Другим недостатком вибромельниц является большой удельный расход металла на конструкцию и износ (загрязнение дисперсных порошков продуктами износа мелющих тел и корпуса). Этот же недостаток в еще большей мере характерен для шаровых трубных мельниц. Отсюда следует вывод о том, что высокий износ мелющих тел в шаровых трубных и вибрационных мельницах обусловлен реализацией в них способа измельчения ударом, преобладающего над другими способами измельчения. Следовательно, для снижения удельного износа машин для тонкого измельчения необходимо избегать реализации в их рабочем процессе способа ударного измельчения.

Вихревые электромагнитные мельницы для тонкого помола сыпучих материалов по реализации в них способов измельчения аналогичны вибрационным мельницам. Они состоят из рабочей камеры, помещенной внутрь соленоида, который представляет собой кольцевую обмотку, питаемую переменным током частотой 50 Гц регулируемого напряжения. Рабочая камера на 70–80 % наполняется мелющими телами сферической формы из магнитотвердого материала гексаферрита бария. Под действием пульсирующего поля соленоида шарики соударяются и измельчают находящиеся между ними частицы обрабатываемого материала за счет удара и истирания. Узким местом, сдерживающим широкое

внедрение данных мельниц, являются рабочие тела. Их приходится изготавливать специально, к тому же они сравнительно быстро теряют магнитные свойства и их приходится намагничивать в постоянном магнитном поле. Следует отметить, что неплохие результаты показывают мелющие тела, изготовленные из пружинной проволоки.

Для вибрационных и электромагнитных мельниц интенсифицирующим фактором является высокая частота колебательных воздействий мелющих тел на измельчаемые частицы, а для струйных мельниц в качестве интенсифицирующего фактора выступает высокая скорость нагружения частиц материала.

Планетарно-центробежные мельницы, хотя и не нашли широкого применения в промышленности из-за сложности их конструкции и эксплуатации, но заслуживают самого пристального внимания вследствие того, что по скорости измельчения они превосходят широко применяемые машины для тонкого измельчения, в том числе и вибрационные мельницы.

Интенсификация процесса измельчения в планетарных мельницах достигается за счет повышения «эффективного веса» мелющих тел, что позволяет применять мелющие тела небольших размеров, в результате него резко возрастает их суммарная поверхность в единице объема барабана. Применение шаров малого диаметра при их большой кинематической энергии (до 10 м/с) создает высокие удельные давления при разрушении материала. Это позволяет эффективно диспергировать материал на основе самоизмельчения, без мелющих тел.

К недостаткам планетарных мельниц, сдерживающих их широкое промышленное внедрение, относятся: сложность конструкции и балансировки во время работы; сложность осуществления процесса измельчения в непрерывном режиме; большой нагрев помольных барабанов и сложность подвода к ним охлаждающего агента; сравнительно высокий удельный износ мелющих тел.

Бисерные измельчители состоят из корпуса, многодискового ротора и станины, внутри которой размещаются насосы. Цилиндр примерно на 2/3 или ¾ объема заполняют специально приготовленным кремне-кварцевым бисером (размер частиц 1–2 мм) или крупнозернистым износостойким песком (размер частиц 0,6–0,8 мм). При вращении ротора его диски приводят бисеринки или песчинки в движение, интенсивность которого растет с увеличением частоты вращения ротора.

Бисерные измельчители находят широкое применение в производстве красок, эмалей, грунтовок и других аналогичных материалов. Суспензия, предварительно подготовленная из пигмента и связующего, проходит через слой вибрирующих бисеринок или песчинок, интенсивно измельчается, перетирается, затем фильтруется через сито и выводится по желобу на дальнейшую обработку. Измельчение твердой фазы происходит раздавливанием и истиранием.

Таблица 3 – Оценка эффективности машин для тонкого измельчения материалов по системе показателей

№	Тип мельницы	Общая форма записи показателей				Источники информации
		Дж/м^3	кВт ·ч/т	т ·ч/т	кВт ·ч^2/т	
1	Шаровая	$3 \cdot 10^3$	125	48	6000	8, 9
2	Кавитационно-истирающая МКИ	$2 \cdot 10^5$	440	4	1760	6
3	Коллоидная	$3 \cdot 10^4$	600	2,8	1680	6
4	Бисерная	$1{,}5 \cdot 10^3$	120	16	1420	14
5	Вибрационная №400	$1{,}1 \cdot 10^3$	110	10	1100	11
6	Электромагнитная вихревая	$6 \cdot 10^3$	150	4	600	12
7	Планетарная ПЦМ	$6 \cdot 10^3$	400	1,2	480	13
8	Электромагнитная с центральным ротором	$1{,}2 \cdot 10^3$	35,0	1	35,0	12
9	Планетарная эксцентриковая	$1{,}4 \cdot 10^4$	30,0	0,4	12,0	13

Мельницы с пружинными рабочими органами появились сравнительно недавно. Их отличает высокая удельная производительность, сравнительно низкая энергоемкость, компактность и простота конструкции. Мельница с пружинным рабочим органом содержит корпус в виде изогнутой трубы, имеющий загрузочный и выгрузочный люки, в корпусе размещен рабочий орган, выполненный в виде изогнутой по дуге окружности винтовой цилиндрической пружины, соединенной своими торцами с приводными валами. При вращении пружины относительно своей оси между боковыми поверхностями ее витков образуются зоны измельчения в виде сходящихся клиновых пространств. Частицы обрабатываемого материала захватываются витками пружины, вращающейся с большой угловой частотой и многократно перетираются в клиновых сходящихся пространствах между боковыми поверхностями смежных витков (рисунок 1).

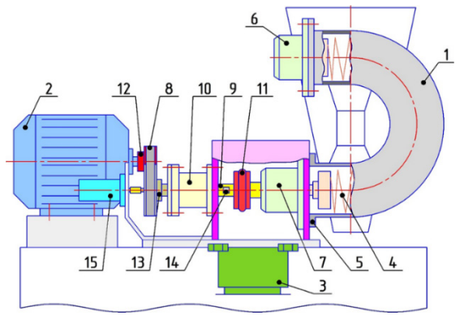


Рисунок 1 – Модель пружинной мельницы: 1, 5 – корпус; 2 – приводной электродвигатель; 3 – механизм изменения угла наклона рабочей камеры; 4 – упруго-деформируемый рабочий орган; 6, 7, 10 – подшипниковые опоры; 8 – клиноременная передача; 9 – промежуточный вал; 11 – упругая муфта; 12, 13 – сменные шкивы; 14 – тензометрические датчики; 15 – токосъемник

К недостаткам известных конструкций мельниц с пружинными рабочими органами следует отнести относительно невысокий срок службы рабочих органов, обусловленный износом пружин, работающих в контакте с абразивной средой и внутренней поверхностью корпуса, в результате чего усталостная прочность пружин резко снижается.

Результаты и обсуждение

Учитывая известные недостатки была разработана конструкция пружинной мельницы, рабочий орган которой освобожден от трубчатого корпуса и свободно работает в бункере, заполненном обрабатываемым материалом (рисунок 2).

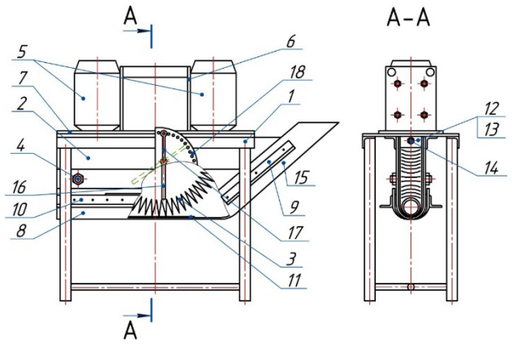


Рисунок 2 – Модуль мельницы: 1 – рама; 2 – стенка боковая;
3 – кинематическое измельчающее устройство (цилиндрическая пружина);
4 – шпилька; 5 – электродвигатель; 6 – кронштейн; 7 – крышка;
8 – днище; 9 – винт; 10 – уголок; 12 – втулка;
13 – втулка; 14 – болт; 15 – лоток загрузочный

Модуль пружинной мельницы (рисунок 2) состоит из рамы 1, боковых стенок 2, крепящихся к раме болтами через уголки с пазами для регулировки зазоров между кинематическим измельчающим устройством 3, выполненным в виде цилиндрической пружины и стенками 2. Для фиксации расстояния между стенками предусмотрены две шпильки 4, два двигателя 5 (типа 4АМ100 6УЗ мощностью по 2,2 кВт и частотой вращения 940 об/мин), крепят болтами к кронштейнам 6, установленным на крышке 7 модуля. Днище 8 мельницы, выполненное из резиновой ленты с металлизированным кордом, крепится к стенкам винтами 9, через уголки 10. Для предотвращения износа резинового днища, оно закрыто изнутри (на длину рабочей зоны) металлической листовой прокладкой 11 толщиной 2 мм. Концы пружины 3 навиты на втулки 12, имеющие на внешних поверхностях винтовые канавки. Втулки 12 посажены на втулки 13 и закреплены на них посредством болтов 14. Втулки 13 закреплены на выходных валах электродвигателей 5 посредством шпонок. Мельница снабжена загрузочным лотком 15.

Межосевое расстояние l = 522 мм;

Длина пружины $l_р$ = 820 мм;

Диаметр (внешний) пружины $d^{p}_{внеш}$ = 108 мм;

Диаметр (внутренний) пружины $d^{p}_{внутр}$ = 80 мм;

Мельница работает следующим образом: измельчаемый материал подается в мельницу через загрузочный лоток. Включаются двигатели, которые приводят пружину во вращательное движение. При вращении изогнутой пружины относительно собственной оси между боковыми поверхностями ее витков образуются зоны измельчения в виде скользящих клиновых пространств. Частицы обрабатываемого материала захватываются витками вращающейся пружины и многократно перетираются в клиновых сходящихся пространствах между боковыми поверхностями смежных витков. Одновременно пружина осуществляет перемещение материала на выход посредством эффекта спирального шнека. Выход измельченного материала наблюдается по всей высоте стенок при полностью загруженном лотке. С уменьшением уровня заполнения загрузочного лотка выход материала по высоте стенок соответственно уменьшается. Наблюдения показали, что производительность мельницы зависит как от уровня заполнения загрузочного лотка, так и от угла наклона днища мельницы к горизонтальной плоскости.

Угол наклона днища регулировался изменением угла наклона всего модуля к горизонтальной плоскости.

Цилиндрическая пружина диаметром 108 мм была согнута по радиусу R=261 мм, диаметр проволоки 12 мм.

Процесс измельчения в мельницах с пружинным рабочим органом определяется рядом геометрических параметров рабочего органа, основными из которых являются: D – средний диаметр рабочего органа; d – диаметр поперечного сечения витка; ρ_0 – радиус изгиба рабочего органа; – угол захвата частиц измельчаемого материала; λ – удлинение геометрической оси рабочего органа от изгиба по радиусу ρ_0. Перечисленные параметры существенно влияют на усилие дробления, возникающего между витками рабочего органа от действия изгибающего и крутящего момента.

Рассмотри соотношения, связывающие основные геометрические параметры рабочего органа. Расчетная схема пружинного рабочего органа в виде изогнутой по дуге винтовой спирали с центральным углом изгиба ψ и радиусом ρ_0 представлена на рисунке 3.

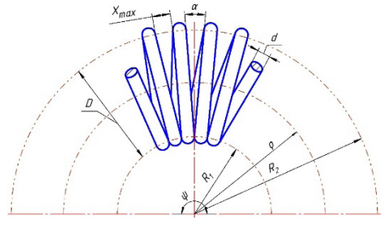


Рисунок 3 – Схема к расчёту геометрических параметров рабочего органа

Расчетная схема предполагает, что образующая рабочего органа, расположенная в плоскости изгиба со стороны вогнутости, в процессе деформации не изменяется по длине, поскольку слои винтовой спирали навиты вплотную друг к другу, поэтому при изгибе происходит удлинение геометрической оси рабочего органа на величину λ, которая равна разности между длиной дуги геометрической оси рабочего органа при изгибе по радиусу ρ_0 с центральным углом ψ и длиной недеформированной спирали L:

$$\lambda = \rho_0 \cdot \psi - L \tag{5}$$

Длину недеформированной спирали можно выразить через диаметр поперечного сечения витка d и количество витков z или через радиус ρ_0 изгиба и средний диаметр D спирали:

$$L = d \cdot z = \left(\rho_0 - \frac{D}{2}\right) \cdot \psi \tag{6}$$

$$\lambda = \rho_0 \cdot \psi - \left(\rho_0 - \frac{D}{2}\right) \cdot \psi \tag{7}$$

Исключив из выражения (7) величину ψ, получим зависимость величины λ от геометрических параметров рабочего органа:

$$\lambda = \frac{D \cdot d \cdot z}{(2\rho_0 - D)} \tag{8}$$

Удлинение одного витка в процессе деформации винтовой спирали λ' можно определить, разделив (8) на количество витков рабочего органа z:

$$\lambda' = \frac{D \cdot d}{(2\rho_0 - D)} \tag{9}$$

Максимальное расхождение соседних витков винтовой спирали со стороны выпуклости равно удвоенному произведению деформации одного витка:

$$\lambda_{max} = \frac{2D \cdot d}{(2\rho_0 - D)} \tag{10}$$

Величина λ_{max} определяет максимальный размер частиц исходного материала, т.е. для обеспечения возможности попадания частиц материала в межвитковое пространство, должно выполняться условие:

$$X_{max} < \lambda_{max} \tag{11}$$

где, X_{max} – максимальный размер частиц исходного материала.

Величина угла захвата α связана с геометрическими параметрами рабочего органа следующим соотношением:

$$\alpha = \frac{4d}{(2\rho_0 - D)} \tag{12}$$

От угла захвата α, образованного между двумя соседними витками пружинного рабочего органа зависит, будет ли частица измельчаемого материала втягиваться в зону сжатия или выталкиваться из этой зоны. Определим величину угла захвата из условия равновесия частицы материала от действующих на нее внешних нагрузок. Учитывая ограничение потока материала стенкой камеры дробления и пренебрегая массой частиц ввиду их малости по сравнению с разрушающими усилиями, можно предположить, что центробежные силы, действующие на частицы, не препятствуют их попаданию в зону измельчения. Схема действия сил на частицу дана на рисунке 4. При измельчении на частицу материала со стороны боковых поверхностей витков действуют силы P_B, вызывающие силы трения F, которые удерживают частицу от выталкивания.

$$F = f \cdot P_B \tag{13}$$

где, f – коэффициент трения измельчаемого материала о металл.

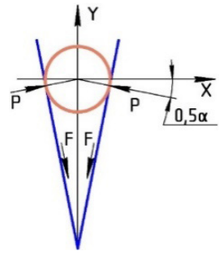


Рисунок 4 – Схема действия внешних нагрузок на частицу измельчаемого материала

Условие равновесия имеет следующий вид:

$$\sum Y = P_B sin\frac{\alpha}{2} + P_B sin\frac{\alpha}{2} - f P_B cos\frac{\alpha}{2} - f P_B cos\frac{\alpha}{2} = 0 \tag{14}$$

Решив данное уравнение относительно α, получим

$$tg\frac{\alpha}{2} = f \tag{15}$$

Заменим коэффициент трения f тангенсом угла трения :

$$tg\frac{\alpha}{2} = tg\varphi \tag{16}$$

Из чего следует, что $\frac{\alpha}{2} = \varphi$ или $\alpha = 2\varphi$, т.е. угол захвата не должен превышать двойного угла трения $\alpha \leq 2\varphi$, или с учетом (12):

$$\frac{4d}{(2\rho_0 - D)} \leq 2\varphi \quad (17)$$

Испытания проходили на одномодульном образце пружинной мельницы (рисунок 5). Изменение направления вращения пружины мельницы осуществляли путем изменения направления вращения электродвигателей. Отходы измельчали в 3 стадии с замером производительности мельницы и определением гранулометрического состава на каждой стадии (таблица 4).

Таблица 4 – Гранулометрический состав отходов производства, используемых при испытании мельницы, %

Остаток на сите с сеткой по ГОСТ 214-83	7 мм	5 мм	3 мм	1 мм	Остаток на сите с сеткой 0,25 мм по ГОСТ 6613-86
%	3	7	20	30	10

Отходы подсушивали до весовой влажности, не превышающей требования ГОСТ 5180-2015 и ГОСТ 24816-2014, 4 - 6 %.

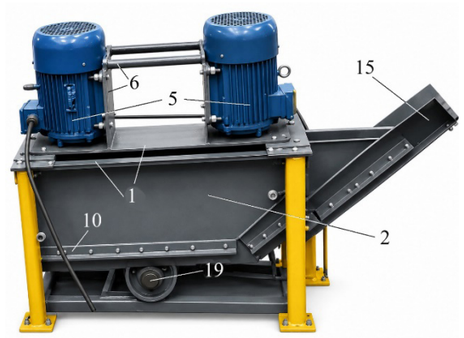


Рисунок 5 – Опытный одномодульный образец пружинной мельницы:
1 – рама; 2 – стенка боковая; 5 – электродвигатель; 6 – кронштейн;
10 – уголок; 15 – лоток загрузочный; 19 – вибратор

Разработанная конструкция одномодульной мельницы обеспечила проведение испытаний на трех режимах (таблица 5):

1 – Угол установки лотка а=80, направления вращения пружины попутное направлению навивки;

2 – Угол установки лотка а=80, направления вращения пружины встречное направлению навивки;

3 – Угол установки лотка а=240, направления вращения пружины попутное направлению навивки.

Таблица 5 – Результаты испытаний пружинной мельницы

Остаток на сите, %	1 режим			2 режим			3 режим		
	1 стадия	2 стадия	3 стадия	1 стадия	2 стадия	3 стадия	1 стадия	2 стадия	3 стадия
5	1,8	0,3	-	1	0,9	-	1	-	-
3	12	4	3	8,5	5	4	12	5	4
1	29	14	12,5	27	22,5	21	29	22	18
0,25	22	23,5	23	22,5	24	24	21	22	22
Производительность, т/ч	1,6 – 1,8			0,9 – 2,8			0,9 – 4,5		

Испытания показали, что реализованный в конструкции мельницы тип кинематического измельчающего устройства в виде изогнутой с определенным радиусом цилиндрической пружины обеспечивает выполнение главной функции устройства – помол отходов производства, например, щебня, путем захвата фракций в межвитковых клиновидных полостях и их дробления и истирания между сходящимися в верхней части изогнутой пружины, а также между витками пружины и стенками мельницы.

Информацию о финансировании

Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки МНиВО РК: грант AP26102017 «Обоснование параметров и разработка оборудования для инновационной технологии переработки отходов растениеводства с высокой производительностью».

Выводы

1) Результаты работы показывают, что кинематическое измельчающее устройство мельницы для помола отходов дробильно-сортировочной фабрики может быть реализовано в виде изогнутой по дуге определенного радиуса цилиндрической пружины, концы которой жестко закреплены на выходных валах установленных параллельно электродвигателей.

2) Максимальная производительность пружинной мельницы обеспечивается при полностью заполненном материалом загрузочном устройстве, т.е. на высоту рабочего органа.

3) Визуальный анализ рабочего процесса одномодульной пружинной мельницы показал, что в опытно-промышленном образце мельницы целесообразно предусмотреть отражающий экран, который необходимо жестко закрепить на крышке. Экран размещается в вертикальной поперечной плоскости мельницы в полости, образованной крышкой, стенками и изогнутой цилиндрической пружиной, и равноудален от ее концов, прикрепленных к электродвигателям. Экран служит для отражения крупных кусков измельчаемого материала, которые могут проникнуть в указанную полость и направляет их в зону измельчения.

4) Основываясь на результатах предварительных экспериментов рекомендуется заполнять указанную полость шарами, а под днищем смонтировать вибратор с целью повышения эффективности оборудования и увеличения степени измельчения дробимого материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ганбат, Д., Гаврюшин, С. С.** Исследование статических и динамических характеристик винтовых пружинных мельниц // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 8. – С. 10–16. – [Электронный ресурс]. – https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf.

2 **Севостьянов, В. С., Сиваченко, Т. Л., Севостьянов, М. В., Горягин, П. Ю., Бабуков, В. А.** Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2018. – № 3. – С. 107–116. – https://doi.org/10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359

3 **Сорокин, Ф. Д., Чжоу, Су.** Конечный элемент в виде витка для расчета частот и форм собственных колебаний пружин с учетом сдвига, и инерции вращения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 1 (694). – С. 3–11. – https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-3-11.

4 **Bond, F. C.** The third theory of comminution // Mining Engineering. – 1952. – Vol. 4. – P. 33.

5 **Bond, F. C.** Lab equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding units // Engineering and Mining Journal. – 1964. – Vol. 165. – № 6. – P. 169–176.

6 **Lee, J.** Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 302. – № 1–2. – P. 185–196.

7 **Yildirim, V.** On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion // Meccanica. – 2012. – Vol. 47. – № 4. – P. 1015–1033.

8 **Yu, A. M., Hao, Y.** Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 74. – P. 65–72.

9 **Yu, A. M., Hao, Y.** Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of Non-Cylindrical Helical Springs Including Warping // Shock and Vibration. – 2012. – Vol. 19. – № 6. – P. 1167–1180.

10 **Sivachenko, L. A., Kurguzikov, A. M., Moiseenko, V. V., Bochkov, S. L., Golban, E. G.** Apparatus for Grinding. U.S. Patent 4,899,941, 13 February 1990.

REFERENCES

1 **Ganbat, D., Gavryushin, S. S.** Issledovanie staticheskix i dinamicheskix xarakteristik vintovy`x pruzhinny`x mel`nicz // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. [Investigation of static and dynamic characteristics of screw spring mills] Mashinostroenie. – 2007. – № 8. – P. 10–16. – [Electronic resource]. – https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf

2 **Sevost`yanov, V. S., Sivachenko, T. L., Sevost`yanov, M. V., Goryagin, P. Yu., Babukov, V. A.** Nauchno-prakticheskie osnovy` sozdaniya iglofrezerny`x izmel`chitelej mnogocelevogo naznacheniya [Scientific and practical bases of creation of needle milling grinders of multipurpose purpose] // Vestnik BGTU im. V.G. Shuxova. – 2018. – № 3. – P. 107–116. – https://doi.org/10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359.

3 **Sorokin, F. D., Chzhou, Su.** Konechny`j e`lement v vide vitka dlya rascheta chastot i form sobstvenny`x kolebanij pruzhin s uchetom sdviga, i inercii vrashheniya [The final element in the form of a coil for calculating the frequencies and forms of natural vibrations of springs, taking into account the shear and inertia of rotation] // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Mashinostroenie. – 2018. – № 1 (694). – P. 3–11. – https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-3-11.

4 **Bond, F. C.** The third theory of comminution // Mining Engineering. – 1952. – Vol. 4. – P. 33.

5 **Bond, F. C.** Lab equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding units // Engineering and Mining Journal. – 1964. – Vol. 165. – № 6. – P. 169–176.

6 **Lee, J.** Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 302. – № 1–2. – P. 185–196.

7 **Yildirim, V.** On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion // Meccanica. – 2012. – Vol. 47. – № 4. – P. 1015–1033.

8 **Yu, A. M., Hao, Y.** Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 74. – P. 65–72.

9 **Yu, A. M., Hao, Y.** Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of Non-Cylindrical Helical Springs Including Warping // Shock and Vibration. – 2012. – Vol. 19. – № 6. – P. 1167–1180.

10 **Sivachenko, L. A., Kurguzikov, A. M., Moiseenko, V. V., Bochkov, S. L., Golban, E. G.** Apparatus for Grinding. U.S. Patent 4,899,941, 13 February 1990.

Поступило в редакцию 18.06.26.
Поступило с исправлениями 24.06.26.
Принято в печать 20.08.26.

Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], А. Ю. Коноплин[3],
Г. А. Оразбаев[4], А. Ж. Байгунусов[5]
[1,2]«Европлюс Восток» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті,
Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.;
[4,5]Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
18.06.26 ж. баспаға түсті.
24.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨНДІРІС ҚАЛДЫҚТАРЫН ҰНТАҚТАУҒА АРНАЛҒАН КИНЕМАТИКАЛЫҚ ҰНТАҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫСЫ БАР ДИІРМЕННІҢ ЖАҢА ҮЛГІСІН ӘЗІРЛЕУ

Материалдарды ұсақтаудың энергияны көп қажет ететін процестерін жетілдіру маңызды өнеркәсіптік проблема болып табылады. Қазіргі уақытта өнеркәсіпте миллиард тоннадан астам ұнтақ ұнтақталуда, бұл ретте оларды өндіруге жұмсалатын энергия шығыны электр энергиясы өндірісінің 20 %-ынан асады. Оның үстіне ұсақтағыштардың жұмыс органдарының тозуы нәтижесінде жыл сайын бірнеше миллион тонна жоғары сапалы болат жоғалады. Өнеркәсіптің бірқатар салалары, ең алдымен құрылыс, құрылыс материалдары өнеркәсібі, жол құрылысы, тау-кен, электрондық, ауыл шаруашылығы, химия және т.б. өнімдерінің сапасы көп жағдайда бастапқы шикізаттың сапасына - ірілігіне, тазалығына, астық пішініне және т.б. байланысты. Соңғы уақытта бастапқы шикізаттың ірілігі мәселесіне ерекше көңіл бөлінуде. Бұл қатты күйдегі заттар қатысатын процестердің жылдамдығы бөлшектер бетінің шамасына пропорционалды болуымен байланысты және сондықтан ұнтақтар дисперсиялығының артуымен күрт өседі. Өндіріс қалдықтарын ұсақтауға арналған жабдық зерттеу объектісі болып табылады. Жұмыс мақсаты - өндіріс және өсімдік шаруашылығы қалдықтарын ұсақтау үшін жабдықтардың тиімділігін арттыру. Зерттеулер нәтижесінде кинематикалық ұсақтау құрылғысы бар бір модульді диірмен әзірленді және дайындалды, ол ұсақтау-сұрыптау фабрикасының қалдықтарының 3-сатысында әктас қиыршықтасын өндіру кезінде ұсақтау жолымен 3 модульді диірменнің тәжірибелік-өнеркәсіптік үлгісінің жұмыс процесін іске асырады. Диірменнің модульдік орындалуы оның жұмысының 3 режимін сынап көруге мүмкіндік берді. Зерттеулердің нәтижелері өнертабыстарға арналған өтінімдер сериясында іске асырылды, олардың бір бөлігі бұрын өнертабыс деп танылған.

Кілтті сөздер: тозу, диірмен барабаны, энергия жүктемесі, жұмыс камерасы, корпус, тиеу науасы.

B. A. Moldakhanov[1], M. V. Doudkin[2], A. Y. Konoplin[3],
G. A. Orazbaev[4], A. Zh. Baigunussov[5]
[1,2]LLP «EUROPLYUS VOSTOK», Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Moscow Automobile and Road Engineering University, Russian Federation, Moscow;
[4,5]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 18.06.26.
Received in revised form 24.06.26.
Accepted for publication 20.08.26.

DEVELOPMENT OF NEW TYPE OF MILL WITH KINEMATIC GRINDING DEVICE FOR GRINDING OF PRODUCTION WASTES

The improvement of energy-intensive processes of fine grinding of materials is an important industrial problem. Currently, more than a billion tons of powders are crushed in industry, and the energy consumption for their production exceeds 20 % of electricity production. In addition, as a result of wear of the grinding tools, several million tons of high-quality steels are lost annually. The quality of products in a number of industries, primarily construction, construction materials, road construction, mining, electronic, agricultural, chemical, etc., largely depends on the quality of the starting material – size, purity, grain shape, etc. Particular attention has recently been paid to the issue of the size of the starting material. This is due to the fact that the speed of processes involving substances in the solid state is proportional to the size of the surface of the particles and therefore increases sharply with increasing dispersion of powders. The object of the study is equipment for grinding production waste. The purpose of the work is to increase the efficiency of equipment for fine grinding of production and crop production waste. As a result of research, a single-module mill with a kinematic grinding device was developed and manufactured, which implements a working process of a pilot industrial sample of a 3-module mill by grinding limestone crushed stone at the 3rd stage of waste from a crushing and sorting factory. The modular design of the mill made it possible to test 3 modes of its operation. The research results are realized in a series of applications for inventions, some of which were previously recognized as inventions.

Keywords: wear, mill drum, energy stress, working chamber, housing, loading chute.

SRSTI 55.19.13

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/182-197

A. Rasol[1], A. K. Sherov[2], B. Rasol[3], Sh. Baishugulova[4]

[1,2,4]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3]Karaganda Mechanical Engineering College, Republic of Kazakhstan, Karaganda.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2230-7319
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-957X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4160-349X
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3905-157X
*e-mail: aimoldir_0692@mail.ru

EFFECT OF ULTRASONIC COOLANT ON MILLING QUALITY AND TOOL WEAR

This article presents a computational assessment of the potential effects of ultrasonic regeneration of used cutting fluid on tool wear and selected milling-performance indicators. The study is relevant because used cutting fluids gradually accumulate solid particles, wear debris, tramp oils, and other contaminants, which can reduce their cooling and lubricating capacity and impair machining quality. A deterministic two-scenario model was used to compare milling with contaminated untreated fluid and with the same fluid after ultrasonic regeneration. Reductions in contamination were taken from previously published experimental data, whereas flank-wear trajectories, tangential cutting force, and surface roughness were defined as scenario assumptions.

The calculations showed that ultrasonic regeneration reduced solid-particle concentration by 70.3 %, turbidity by 63.0 %, mean particle size by 57.5 %, and tramp-oil content by 56.2 %. In the regenerated-fluid scenario, final flank wear decreased from 0.433 to 0.310 mm, corresponding to a 28.4 % reduction. Estimated tool life increased from 45.0 to 58.6 min, or by 30.2 %. Tangential cutting force decreased from 150.5 to 132.4 N, and surface roughness (Ra) decreased from 1.483 to 1.195 μm, corresponding to improvements of 12.0 % and 19.4 %, respectively. For 1000 min of milling, projected cutting-tool expenditure decreased from 400,000 to approximately 307,167 tenge, with an estimated saving of 92,833 tenge. The results suggest that ultrasonic regeneration may be useful for cutting-fluid management, but the findings remain preliminary and require experimental verification.

Keywords: ultrasonic cleaning, cutting fluid, milling, tool wear, tool life, cutting force, roughness, process stability.

Introduction

Cutting fluids constitute an essential technological medium in machining, as they remove heat from the cutting zone, reduce friction, support chip evacuation, and protect the surfaces of both the cutting tool and the workpiece. The state of the fluid therefore has a direct effect on cutting forces, the rate of tool wear, dimensional accuracy, and the

surface quality of machined parts [1; 2; 3; 4]. Its effectiveness depends not only on the initial formulation and method of delivery, but also on the stability of its physicochemical properties throughout the operating period.

With prolonged operation, cutting fluids become contaminated with metal and abrasive particles, products of tool wear, tramp oils, oxidation compounds, microorganisms, and other impurities. Such contamination may decrease heat-transfer capacity, weaken the stability of the lubricating film, increase secondary abrasive effects, and contribute to more intensive cutting-tool wear [5; 6]. However, full replacement of the used fluid is associated with additional operating expenses and the formation of waste that requires specialised treatment and disposal. In this regard, systematic monitoring, purification, and regeneration of cutting fluids are important for extending their service life and enhancing the environmental sustainability of machining processes [9–15].

Several recent studies have considered how the condition of cutting fluids affects machining performance. Pang et al. showed that the use of cutting fluid influences both milled-surface quality and tool life in aluminium-alloy machining [8]. In their review of cutting-fluid applications in micro-milling, Kuram et al. identified cooling and lubrication conditions as key factors influencing tool wear and process stability [9]. Ehsan et al. demonstrated that changes in cutting conditions are related to variations in vibration, machining temperature, surface integrity, and tool-wear mechanisms during end milling [10]. Overall, these studies indicate that the properties and operational state of the cutting fluid should be regarded as important factors determining the stability and quality of the milling process.

Ultrasonic treatment is regarded as a promising approach in the context of resource-efficient production. The effects of acoustic cavitation and ultrasound-induced particle movement can promote contaminant separation and contribute to a more uniform working medium. Kim et al. experimentally studied the ultrasonic regeneration of contaminated cutting fluid and reported improvements in its clarity and stability following treatment [11]. Ultrasound-assisted separation has also been used in contaminated emulsion systems; however, the efficiency of this process is influenced by the fluid composition, degree of contamination, acoustic parameters, treatment temperature, and exposure duration [12].

Despite these advances, existing studies still lack an integrated quantitative assessment of how ultrasonic regeneration of used cutting fluid affects tool wear, cutting force, surface roughness, and milling stability. Previous research has mainly addressed comparisons of lubrication and cooling methods, the performance of freshly prepared cutting fluids, or the physicochemical effects of ultrasonic treatment. At the same time, the technological implications of reusing ultrasonically regenerated cutting fluid in milling remain insufficiently investigated.

Therefore, this study aims to perform a reproducible computational assessment, based on two scenarios, of the potential effect of ultrasonic regeneration of used cutting fluid on milling performance. The scenarios compare untreated and ultrasonically regenerated cutting fluids, determine changes in contamination indicators, and estimate the associated differences in flank wear, tool life, cutting force, and surface

roughness. The economic assessment is limited to the potential reduction in cutting-tool consumption and related expenditure. Since the research is computational in nature, the obtained results should be interpreted as preliminary scenario-based estimates requiring further experimental verification.

Materials and methods

Research design

The research was structured as a deterministic computational assessment based on two scenarios. Scenario U described milling with contaminated, untreated cutting fluid, whereas Scenario C described milling under the use of the same fluid after ultrasonic regeneration. No physical milling experiments were carried out in this study; therefore, the reported values should be considered scenario-based estimates rather than experimentally measured effects.

The computational assessment was not designed to model the mechanical interaction of a particular workpiece–tool pair. Accordingly, workpiece material, tool geometry and coating, cutting speed, feed per tooth, axial and radial depths of cut, and cutting-fluid flow rate were not treated as independent variables. These parameters were assumed to remain constant and were incorporated implicitly through the baseline values used in Scenario U. Thus, the condition of the cutting fluid was the only factor distinguishing the two scenarios.

The physical feasibility of ultrasonic regeneration of cutting fluid was supported by the experimental results reported in Reference [11]. However, the present model did not simulate the ultrasonic treatment process directly. It instead evaluated the technological effects associated with an assumed regenerated-fluid state. The relative reductions in cutting-fluid contamination were based on the experimental results reported in Reference [11] and were subsequently incorporated as input parameters into the computational scenarios.

Input data

The values for the untreated cutting fluid were normalised to 1.000. For Scenario C, the corresponding values were calculated from the assumed purification efficiencies. A 70.3 % decrease in solid-particle concentration resulted in a normalised residual value of 0.297. The residual values for turbidity, mean particle size, and tramp-oil content were 0.370, 0.425, and 0.438, respectively. Viscosity and pH were assumed to remain within technologically acceptable limits and were therefore excluded from the scaling factors used for the machining indicators.

Tool wear was assessed over a 60 min machining period at 10 min intervals. In Scenario U, the modeled flank-wear values were 0.000, 0.070, 0.130, 0.190, 0.260, 0.340, and 0.433 mm. In Scenario C, the corresponding values were 0.000, 0.050, 0.090, 0.130, 0.180, 0.240, and 0.310 mm.

The mean tangential cutting force was specified as 150.5 N for Scenario U and 132.4 N for Scenario C. The corresponding surface roughness values were set at 1.483 and 1.195 μm, respectively. The flank-wear trajectories, tangential cutting-force values, and surface-roughness values were defined as deterministic assumptions within the two-scenario model. They were not derived directly from the normalized

contamination indicators. Accordingly, the calculations assess the technological and economic consequences of the assumed differences between the scenarios rather than predict machining responses on the basis of cutting-fluid properties. These parameters were used as deterministic inputs for the scenario-based calculations and should not be interpreted as sample means derived from repeated experimental measurements. The complete set of input data used in the calculations is presented in Table 1.

Table 1 – Input Values and Assumptions Used in the Computational Assessment

Indicator	Scenario U: untreated fluid	Scenario C: regenerated fluid	Unit or interpretation
Solid-particle concentration	1.000	0.297	Normalised value
Turbidity	1.000	0.370	Normalised value
Mean particle size	1.000	0.425	Normalised value
Tramp-oil content	1.000	0.438	Normalised value
Viscosity	Technologically acceptable	Technologically acceptable	Assumed stable
pH	Technologically acceptable	Technologically acceptable	Assumed stable
Flank wear at 0 min	0.000	0.000	mm
Flank wear at 10 min	0.070	0.050	mm
Flank wear at 20 min	0.130	0.090	mm
Flank wear at 30 min	0.190	0.130	mm
Flank wear at 40 min	0.260	0.180	mm
Flank wear at 50 min	0.340	0.240	mm
Flank wear at 60 min	0.433	0.310	mm
Mean tangential cutting force, Fz	150.5	132.4	N
Mean surface roughness, Ra	1.483	1.195	μm
Flank-wear limit, VBlimVB	0.300	0.300	mm
Estimated tool life	45.0	58.6	min
Assessment period	1000	1000	min
Cost of one tool set	18,000	18,000	tenge

Ultrasonic frequency, generator power, exposure duration, fluid volume, and treatment temperature were not considered as independent variables, since the ultrasonic regeneration process itself was not directly simulated. Reference [11] was used to justify the physical mechanism and practical feasibility of ultrasonic regeneration. In that study, the cleaning effect was attributed to acoustic cavitation, particle coagulation, dispersion processes, and phase separation.

Computational procedure

The computational procedure comprised the evaluation of cutting-fluid purification efficiency, flank-wear development, tool life, cutting force, surface roughness, and the estimated economic effect. These calculations were carried out separately for the untreated cutting fluid, defined as Scenario U, and for the ultrasonically regenerated cutting fluid, defined as Scenario C.

For each cutting-fluid indicator, purification efficiency was determined using the following equation:

$$\eta_i = \frac{X_{U,i} - X_{C,i}}{X_{U,i}} \cdot 100\%$$

where η_i denotes the purification efficiency of indicator i, $X_{U,i}$ represents its value before treatment, and $X_{C,i}$ represents its value after ultrasonic regeneration. The resulting reductions were 70.3 % for solid-particle concentration, 63.0 % for turbidity, 57.5 % for mean particle size, and 56.2 % for tramp-oil content.

The mean rate of flank-wear progression between two successive time points was calculated as follows:

$$v_{VB} = \frac{(VB_{t2} - VB_{t1})}{(t_2 - t_1)},$$

where VB_{t1} and VB_{t2} denote the modeled flank-wear values corresponding to time points t_2 and t_2, respectively.

Tool life was assessed on the basis of the limiting flank-wear criterion VB_{lim} =0.30 mm. If this threshold was reached between two modeled time points, the corresponding tool life was estimated by linear interpolation:

$$T = t_1 + \frac{VB_{lim} - VB_{t1}}{VB_{t2} - VB_{t1}}(t_2 - t_1)$$

In Scenario U, the limiting flank-wear value was reached between 40 min (VB=0.260 mm) and 50 min (VB=0.340 mm), which gave an estimated tool life of 45.0 min. In Scenario C, this threshold was reached between 50 min (VB=0.240 mm) and 60 min (VB=0.310 mm), corresponding to an estimated tool life of 58.6 min.

The relative decrease in final flank wear was determined as follows:

$$\Delta VB = \frac{VB_U - VB_C}{VB_U} \cdot 100\ \%$$

where VB_U and VB_C denote the final flank-wear values for the untreated and regenerated cutting fluids, respectively. Based on the final values of 0.433 and 0.310 mm, the relative reduction in flank wear was estimated at 28.4%.

The relative changes in cutting force, surface roughness, and tool life were calculated using the following equations:

$$\Delta F = \frac{F_U - F_C}{F_U} \cdot 100\ \%$$

$$\Delta Ra = \frac{Ra_U - Ra_C}{Ra_U} \cdot 100\ \%$$

$$\Delta T = \frac{T_C - T_U}{T_U} \cdot 100\ \%$$

where F_U and F_C denote the mean tangential cutting forces, Ra_U and Ra_C denote the surface roughness values, and T_U U and T_C denote the estimated tool lives for Scenarios U and C, respectively.

The mean tangential cutting force decreased from 150.5 to 132.4 N, which corresponds to a 12.0 % reduction. Surface roughness decreased from 1.483 to 1.195 μm, indicating a 19.4 % improvement in surface quality. The estimated tool life increased from 45.0 to 58.6 min, corresponding to a 30.2 % extension.

Since the calculations relied on deterministic scenario values, inferential statistical tests were not performed. The obtained results should therefore be interpreted as comparative model-based estimates that require further experimental validation.

Economic assessment

The economic assessment was based on the projected decrease in cutting-tool consumption during 1000 min of milling. Tool-related expenditure was calculated using the equation specified in the initial model:

$$\mathrm{E}_{instr} = \mathrm{NC}_{instr}\left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_C}\right)t_{\mathrm{fond}}$$

where E_{instr} denotes the estimated saving in tool expenditure, N is the number of workstations, C_{instr} is the cost of one tool set, T_U and T_C are the estimated tool lives for untreated and regenerated cutting fluid, respectively, and $t_{\mathrm{fond}}\}$is the effective machining time.

For the economic estimate, one workstation (N = 1), an effective machining time of 1000 min, and a tool-set cost of 18,000 tenge were used. In Scenario U, with an estimated tool life of 45.0 min, tool consumption amounted to approximately 22.222 sets, resulting in a total expenditure of 400,000 tenge. In Scenario C, where the estimated tool life increased to 58.6 min, the required number of tool sets decreased to approximately 17.065, with a corresponding expenditure of 307,167 tenge. Thus, the projected saving in tool costs was approximately 92,833 tenge per 1000 min of milling.

The economic assessment was limited to the reduction in tool expenditure. Costs related to tool replacement and adjustment, cutting-fluid maintenance, energy use, acquisition of ultrasonic equipment, and equipment operation were not included, as the data required for their reliable estimation were not available.

All calculations were carried out in Microsoft Excel 365 using unrounded input data. Intermediate values were retained at full precision, while the final technological effects were rounded to one decimal place and monetary estimates to the nearest tenge.

Results and discussion

The computational results are presented in four analytical groups: changes in cutting-fluid contamination, flank-wear progression and tool life, cutting force and surface roughness, and the projected economic effect. The reported values should be interpreted as outputs of the two-scenario model rather than as data obtained from physical milling experiments. The most pronounced relative changes were observed for the contamination indicators. According to the model, ultrasonic regeneration reduced solid-particle concentration by 70.3 %, turbidity by 63.0 %, mean particle size by 57.5 %, and tramp-oil content by 56.2 %. Viscosity and pH remained within the assumed technologically acceptable ranges.

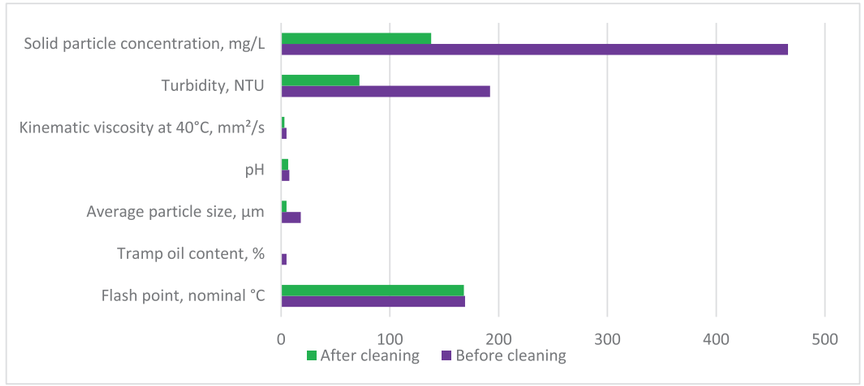


Figure 1 – Calculated comparison of the main cutting fluid parameters before and after ultrasonic treatment

The reduction in cutting-fluid contamination is technologically relevant, as solid and metallic particles recirculating into the cutting zone may function as secondary abrasives and intensify flank wear. The model assumes that contaminant removal enhances the continuity of the lubricating film while leaving the basic composition of the cutting fluid largely unchanged. Under these assumptions, the final flank-wear value decreased from 0.433 mm in Scenario U to 0.310 mm in Scenario C, which corresponds to a calculated reduction of 28.4%.

Table 2 – Modeled Development of Tool Flank Wear

Cutting time, min	Scenario U: untreated fluid, VB, mm	Scenario C: regenerated fluid, VB, mm	Difference, %
0	0.00	0.00	0.00
10	0.07	0.05	28.6
20	0.13	0.09	30.8
30	0.19	0.13	31.6
40	0.26	0.18	30.8
50	0.34	0.24	29.4
60	0.433	0.310	28.4

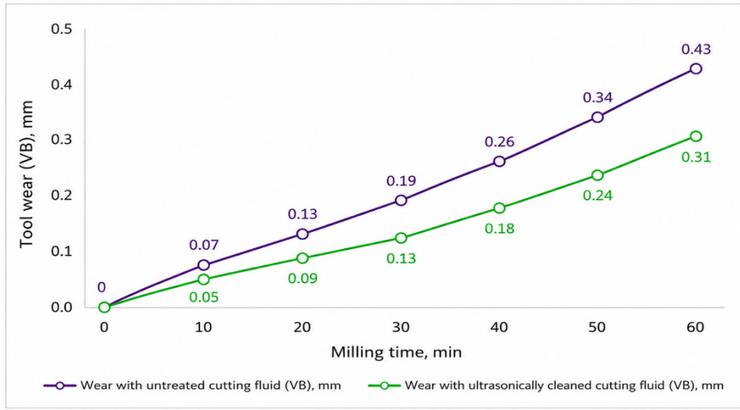


Figure 2 – Variation in Flank Wear Width (VB) over Time

Linear interpolation at the limiting flank-wear value of VB = 0.30 mm yielded an estimated tool life of 45.0 min for Scenario U and 58.6 min for Scenario C. Thus, in the model, ultrasonic regeneration was associated with a 30.2 % increase in tool life. Under industrial conditions, such an increase may reduce the frequency of tool replacement and prolong the duration of continuous machining.

The modelled wear trajectories also showed differences in progression rate. In Scenario U, flank wear increased more sharply toward the later stages of machining. By contrast, Scenario C demonstrated slower wear development, which is consistent with the assumed improvement in lubrication and cooling conditions following cutting-fluid regeneration.

The mean tangential cutting force decreased from 150.5 N in Scenario U to 132.4 N in Scenario C. The calculated difference was 18.1 N, corresponding to a relative reduction of 12.0%. Within the adopted model, this change indicates a reduction in frictional resistance and local mechanical loading after cutting-fluid regeneration.

Table 3 – Calculated Tangential Cutting Force

Scenario	Tangential cutting force Fz_	Relative change, %
Scenario U: untreated fluid	150.5	–
Scenario C: regenerated fluid	132.4	−12.0

The lower cutting force calculated for Scenario C may be explained by the assumed improvement in friction and heat transfer in the cutting zone. Removal of solid contaminants and tramp oil can contribute to more stable lubrication and reduce the likelihood of local overloads during machining.

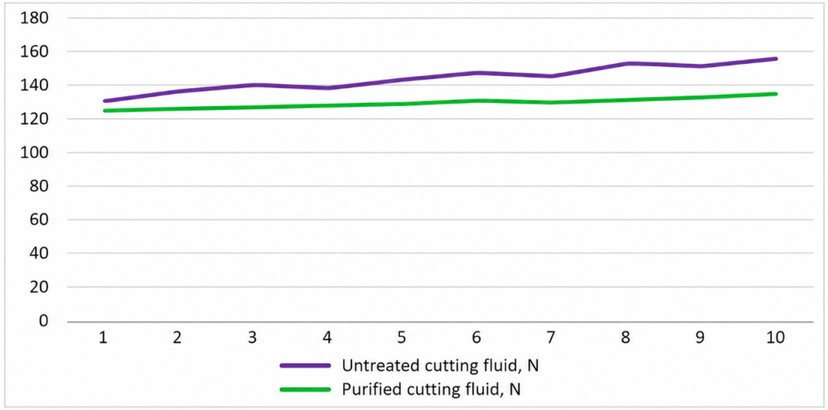


Figure 3 – Calculated Variation in the Tangential Cutting Force Fz

The reduction in force loading after coolant purification can be attributed to improved frictional and heat-transfer conditions in the cutting zone. The removal of solid contaminants and tramp oils promotes more uniform lubrication, reduces the likelihood of localized overloads, and enhances the stability of the milling process.

A similar trend was observed for surface roughness. The calculated Ra value decreased from 1.483 μm in Scenario U to 1.195 μm in Scenario C, corresponding to a 19.4 % reduction. This result suggests that regenerated cutting fluid may contribute to the formation of a smoother machined surface.

Table 4 – Calculated Values of Surface Roughness

Scenario	Surface roughness Ra, μm	Relative change, %
Scenario U: untreated fluid	1.483	–
Scenario C: regenerated fluid	1.195	−19.4

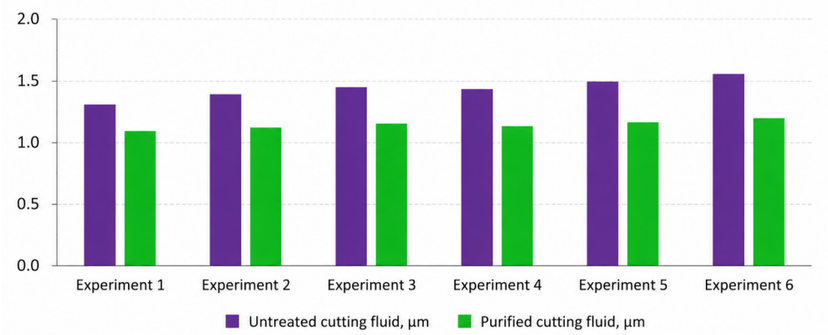


Figure 4 – Calculated Surface Roughness under Untreated- and Regenerated-Fluid Scenarios

Taken together, the reductions in flank wear, tangential cutting force, and surface roughness indicate a favourable change in the modelled milling conditions. However, as the study did not include repeated measurements of cutting force or surface roughness, the results do not allow for a statistical assessment of process variability or repeatability.

The relative technological effects were calculated using the procedure described in the Materials and Methods section and are summarised in Table 5.

Table 5 – ummary of Calculated Technological Effects

Indicator	Impact, %	Explanation
Reduction of solid particles in the coolant	70.3	Reduction of secondary abrasive action
Reduction of turbidity	63.0	Increased emulsion homogeneity and stability
Reduction of average force Fz	12.0	Reduced friction and local overloads
Reduction of final flank wear VB	28.4	Reduced wear of cutting edges
Extended tool life	30.2	Increased uptime
Improvement of roughness Ra	19.4	Improved surface quality

The integrated results of these calculations indicate that cutting-fluid quality should be regarded as an active parameter in milling process control. Within the adopted model, changes in fluid condition under constant machining parameters lead to substantial differences in tool wear, cutting force, and surface roughness. These findings suggest that cutting-fluid regeneration may represent a potentially useful approach to process optimisation, subject to experimental verification.

The projected economic effect was assessed for 1000 min of milling, assuming a tool-set cost of 18,000 tenge. The estimated increase in tool life from 45.0 to 58.6 min reduced the calculated tool consumption from 22.222 to 17.065 sets. Consequently, the projected tool expenditure decreased from 400,000 to approximately 307,167 tenge, yielding an estimated saving of 92,833 tenge.

Table 6 – Projected Cutting-Tool Expenditure per 1000 min of Milling

Indicator	Scenario U: untreated fluid	Scenario C: regenerated fluid
Estimated tool life, min	45.0	58.6
Tool consumption per 1000 min, sets	22.222	17.065
Cost of one tool set, tenge	18,000	18,000
Estimated tool expenditure, tenge	400,000	307,167
Estimated saving, tenge	–	92,833

The economic assessment indicates that the main quantifiable benefit is associated with the projected reduction in tool consumption. Other potential savings, including reduced adjustment, maintenance, energy, and cutting-fluid replacement costs, were not calculated because the required source data were unavailable. Therefore, the reported economic result should be interpreted as a preliminary estimate limited to tool expenditure.

The scenario comparison indicates that the assumed improvement in cutting-fluid condition is accompanied by more favourable calculated milling indicators. Following ultrasonic treatment, the working medium becomes less contaminated and

more homogeneous, which may contribute to lower cutting forces, reduced tool wear, extended tool life, and improved surface roughness. The scientific significance of the assessment lies in formulating a preliminary computational framework for examining the relationship between cutting-fluid condition and milling indicators. From an applied perspective, the results demonstrate the potential of ultrasonic regeneration in cutting-fluid circulation systems to improve resource efficiency. However, the final conclusions require further experimental validation.

The calculated results are consistent with the working hypothesis that ultrasonic regeneration may improve selected milling indicators. Within the proposed model, reductions in solid-particle concentration, turbidity, and tramp-oil content are accompanied by lower cutting forces, slower flank-wear development, longer relative tool life, and improved surface roughness. These findings suggest that the condition of the cutting fluid should be regarded not as a secondary operating parameter but as an important factor influencing tool-wear dynamics and the stability of the technological system. Overall, the results are consistent with previous studies indicating that cutting-fluid performance depends on its ability to dissipate heat, reduce friction, and stabilise contact processes in the cutting zone [1; 2; 3; 4].

Comparison with previous studies on the effects of cutting fluids on tool wear and machining quality indicates that the present findings extend established principles to used cutting fluids after regeneration. While studies [7; 8] primarily compared different cutting-fluid delivery methods or operating regimes, the present study examines the restoration of the functional properties of previously used fluid. The calculated results indicate that, without changing the cutting conditions, the mean cutting force can be reduced by 12.0 %, final tool wear by 28.4 %, surface roughness Ra by 19.4 %, while the estimated tool life can be increased by 30.2 %. These findings suggest that maintaining the functional properties of cutting fluids within a circulation system may be regarded as an independent means of extending tool life and improving the stability of the milling process [7; 8; 9; 10].

The consistency of the obtained results with studies addressing cutting-fluid contamination and the ultrasonic treatment of contaminated emulsion media is also noteworthy [6; 11; 12]. In the present study, these research areas are integrated into a unified cause-and-effect framework: ultrasonic treatment of used cutting fluid reduces contamination of the working medium and improves frictional and heat-transfer conditions, thereby decreasing cutting forces and tool wear, enhancing milling stability, and improving surface quality. However, the findings should be interpreted in view of the limitations of the computational model. The magnitude of the observed effects depends on the composition and contamination level of the cutting fluid, as well as on the parameters of ultrasonic treatment, while final confirmation of the identified relationships requires subsequent experimental validation. The practical significance of the study lies in demonstrating that ultrasonic cleaning may be considered a promising method for improving the resource and economic efficiency of metalworking processes.

Conclusion

The computational assessment showed that ultrasonic regeneration of used cutting fluid may improve selected milling-performance indicators. Under the adopted scenario assumptions, ultrasonic treatment reduced the normalized concentration of solid particles by 70.3 %, turbidity by 63.0 %, mean particle size by 57.5 %, and tramp-oil content by 56.2 %. Viscosity and pH were assumed to remain within technologically acceptable limits. Within the adopted model, the contamination indicators decreased, whereas viscosity and pH were held within technologically acceptable limits as scenario assumptions.

The scenario involving regenerated cutting fluid showed a decrease in final flank wear from 0.433 to 0.310 mm, which corresponds to a relative reduction of 28.4 %. The estimated tool life increased from 45.0 to 58.6 min, representing a 30.2 % improvement. The mean tangential cutting force decreased from 150.5 to 132.4 N, while surface roughness, expressed as Ra, declined from 1.483 to 1.195 μm. These changes correspond to improvements of 12.0 % and 19.4 %, respectively. The results suggest that the condition of the cutting fluid may affect frictional interactions, flank-wear progression, cutting-force formation, and the quality of the machined surface.

The economic assessment indicated that the estimated increase in tool life could reduce cutting-tool expenditure for 1000 min of milling from 400,000 to approximately 307,167 tenge. The projected saving therefore amounted to 92,833 tenge. This estimate is limited to cutting-tool costs and does not include expenditures related to ultrasonic equipment, energy consumption, fluid maintenance, adjustment operations, or cutting-fluid replacement.

Thus, ultrasonic regeneration may be considered a potentially useful element of cutting-fluid circulation systems, although its technological effectiveness requires experimental confirmation. However, the reported effects are derived from a deterministic two-scenario model and should not be interpreted as experimentally confirmed treatment outcomes. Further research should involve controlled milling experiments, direct measurement of cutting-fluid properties before and after ultrasonic treatment, and a comprehensive economic assessment that accounts for equipment, energy, maintenance, and cutting-fluid replacement costs.

REFERENCES

1 **Soković, M., Mijanović, K.** Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol.109. – №1–2. – P.181–189. – https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00794-9

2 **Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A. G., Herrmann, C.** Metalworking fluids – Mechanisms and performance // CIRP Annals. – 2015. – Vol.64. – № 2. – P. 605–628. – https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.003

3 **Debnath, S., Reddy, M. M., Yi, Q. S.** Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining : A review // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 83. – P. 33–47. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071

4 **Pervaiz, S., Kannan, S., Kishawy, H. A.** An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 197. – Part 1. – P. 134–153. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.190

5 **Kuram, E., Ozcelik, B., Bayramoglu, M., Demirbas, E., Simsek, B. T.** Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments // Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 42. – P. 159–166. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.003

6 **Khan, T., Broderick, M., Taylor, C. M.** Investigating the industrial impact of hydraulic oil contamination on tool wear during machining and the development of a novel quantification methodology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol.112. – № 1–2. – P. 589–600. – https://doi.org/10.1007/s00170-020-06370-y

7 **Xavior, M. A., Adithan, M.** Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. 2009. – Vol. 209. – № 2. – P. 900–909. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.068

8 **Pang, S., Zhao, W., Qiu, T., Liu, W., Yan, P., Jiao, L., Wang, X.** Effect of cutting fluid on milled surface quality and tool life of aluminum alloy // Materials. – 2023. – Vol. 16. – № 6. – Article 2198. – https://doi.org/10.3390/ma16062198

9 **Kuram, E., Bagherzadeh, A., Budak, E.** Application of cutting fluids in micro-milling – A review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 133. – P. 25–58. – https://doi.org/10.1007/s00170-024-13752-z

10 **Ehsan, S., Ali, M. A., Khan, S. A., Sana, M., Yasir, M., Anwar, S., Farooq, M. U.** Understanding the effects of cutting conditions on vibrations, surface integrity, machining temperature and tool wear mechanisms in end milling of AISI D2 steel // Tribology International. – 2024. – Vol. 198. – Article 109894. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109894

11 **Kim, A., Kadyrov, A., Sinelnikov, K., Sherov, K., Yurchenko, V.** The Method of Cleaning Cutting Fluid Using Ultrasonic Treatment // Applied Mechanics. – 2025. – Vol. 6. – № 4. – Article 83. – https://doi.org/10.3390/applmech6040083

12 **Agi, A., Junin, R., Alqatta, A. Y. M., Gbadamosi, A., Yahya, A., Abbas, A.** Ultrasonic assisted ultrafiltration process for emulsification of oil field produced water treatment // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – Vol. 51. – P. 214–222. – https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.023

13 **Demirbas, E., Kobya, M.** Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes // Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – Vol. 105. – P. 79–90. – https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013

14 **Elsheikh, A., Ali, A. B. M., Saba, A., Faqeha, H., Alsaati, A. A., Maghfuri, A. M., Abd-Elaziem, W., El Ashmawy, A. A., Ma, N.** A review on sustainable machining: Technological advancements, health and safety considerations, and related environmental impacts // Results in Engineering. – 2024. – Vol.24. – Article 103042. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103042

15 **Shokrani, A., Arrazola, P. J., Biermann, D., Mativenga, P., Jawahir, I. S.** Sustainable machining: Recent technological advances // CIRP Annals. – 2024. – Vol.73. – № 2. – P. 483–508. – https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.06.001

Received 12.05.26.
Received in revised form 17.06.26.
Accepted for publication 08.09.26.

А. Расол[1], А. К. Шеров[2], Б. Расол[3], Ш. Байшугулова[4]
[1,2,4]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]Қарағанды машина жасау колледжі, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
12.05.26 ж. баспаға түсті.
17.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
08.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ТАЗАРТЫЛҒАН САЛҚЫНДАТҚЫШ СҰЙЫҚТЫҚТЫҢ ФРЕЗЕРЛЕУ САПАСЫ МЕН ҚҰРАЛ ТОЗУЫНА ӘСЕРІ

Бұл мақалада пайдаланылған кесу сұйықтығының ультрадыбыстық регенерациясының құралдың тозуына ықтимал әсерін есептеу бағасы және таңдалған фрезерлеу өнімділік көрсеткіштері ұсынылған. Зерттеу өзекті, себебі пайдаланылған кесу сұйықтықтарында қатты бөлшектер, тозу қалдықтары, бөгде майлар және басқа да ластаушы заттар біртіндеп жиналады, бұл олардың салқындату және майлау қасиеттерін төмендетіп, өңдеу сапасын төмендетуі мүмкін. Ультрадыбыстық регенерациядан кейін ластанған өңделмеген сұйықтықты және сол сұйықтықты пайдаланып фрезерлеу өнімділігін салыстыру үшін детерминирленген екі сценарийлік модель қолданылды. Ластанудың азаюы бұрын жарияланған эксперименттік деректерден алынды, ал бүйірлік тозу жолдары, тангенциалды кесу күші және беттің кедір-бұдырлығы сценарий болжамдары ретінде анықталды.

Есептеулер ультрадыбыстық регенерация қатты заттардың концентрациясын 70,3 %-ға, лайлылықты 63,0 %-ға, бөлшектердің орташа өлшемін 57,5 %-ға және бөгде май мөлшерін 56,2 %-ға төмендеткенін көрсетті. Регенерацияланған сұйықтық сценарийінде құралдың бүйірлік тозуы 0,433-тен 0,310 мм-ге дейін төмендеді, бұл 28,4 %-ға төмендеуді білдіреді. Құралдың болжамды қызмет ету мерзімі 45,0 минуттан 58,6 минутқа дейін немесе 30,2 %-ға артты. Тангенциалды кесу күші 150,5-тен 132,4 Н-ге дейін төмендеді,

ал бетінің кедір-бұдырлығы (Ra) 1,483-тен 1,195 мкм-ге дейін төмендеді, бұл сәйкесінше 12,0 % және 19,4 % жақсаруды білдіреді. 1000 минуттық фрезерлеу кезінде кескіш құралдың болжамды құны 400 000 теңгеден шамамен 307 167 теңгеге дейін төмендеді, бұл шамамен 92 833 теңге үнемдеуге сәйкес келеді. Нәтижелер ультрадыбыстық регенерация салқындатқыш сұйықтықты басқару үшін пайдалы болуы мүмкін екенін көрсетеді, бірақ алынған деректер алдын ала болып қала береді және эксперименттік тексеруді қажет етеді.

Кілтті сөздер: ультрадыбыстық тазалау, кесу сұйықтығы, фрезерлеу, құралдың тозуы, құралдың қызмет мерзімі, кесу күші, кедір-бұдырлық, процестің тұрақтылығы.

***А. Расол[1], А. К. Шеров[2], Б. Расол[3], Ш. Байшугулова[4]**
[1,2,4]Казахский агротехнический научно-исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, Астана;
[3]Карагандинский машиностроительный колледж,
Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 12.05.26.
Поступило с исправлениями 17.06.26.
Принято в печать 08.09.26.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА КАЧЕСТВО ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА

В данной статье представлена вычислительная оценка потенциального влияния ультразвуковой регенерации отработанной смазочно-охлаждающей жидкости на износ инструмента и некоторые показатели производительности фрезерования. Исследование актуально, поскольку отработанные смазочно-охлаждающие жидкости постепенно накапливают твердые частицы, продукты износа, посторонние масла и другие загрязнения, что может снизить их охлаждающую и смазывающую способность и ухудшить качество обработки. Для сравнения фрезерования с использованием загрязненной необработанной жидкости и с той же жидкостью после ультразвуковой регенерации использовалась детерминированная двухсценарная модель. Снижение уровня загрязнения было взято из ранее опубликованных экспериментальных данных, а траектории износа боковой поверхности, тангенциальная сила резания и шероховатость поверхности были определены в качестве предположений сценария.

Расчеты показали, что ультразвуковая регенерация снижает концентрацию твердых частиц на 70,3 %, мутность на 63,0 %, средний размер частиц на 57,5 % и содержание посторонних масел на 56,2 %. В сценарии с использованием регенерированной жидкости износ боковой поверхности инструмента снизился с 0,433 до 0,310 мм, что соответствует уменьшению на 28,4 %. Расчетный срок службы инструмента увеличился с 45,0 до 58,6 мин, или на 30,2 %. Тангенциальная сила резания снизилась со 150,5 до 132,4 Н, а шероховатость поверхности (Ra) уменьшилась с 1,483 до 1,195 мкм, что соответствует улучшению на 12,0% и 19,4 % соответственно. При 1000 мин

фрезерования прогнозируемые затраты на режущий инструмент снизились с 400 000 до приблизительно 307 167 тенге, что соответствует предполагаемой экономии в 92 833 тенге. Результаты показывают, что ультразвуковая регенерация может быть полезна для управления смазочно-охлаждающей жидкостью, но полученные данные остаются предварительными и требуют экспериментальной проверки.

Ключевые слова: ультразвуковая очистка, смазочно-охлаждающая жидкость, фрезерование, износ инструмента, срок службы инструмента, сила резания, шероховатость, стабильность процесса.

SRSTI 53.37.33

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/198-208

***R. V. Sapinov[1,2], D. B. Kassymova[2,3]**

[1]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

[2]D. Serikbayev EKTU, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

[3]VNIItsvetmet, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

*e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz

PREDICTING OPTIMAL COPPER PRECIPITATION PARAMETERS IN THE CYANIDATION PROCESS FOR GOLD-COPPER ORES: FROM EXPERIMENTAL DESIGN TO ADABOOST MODELING

This article discusses ways to improve the technology for precipitating copper from productive solutions obtained during the processing of refractory gold-copper ores in Kazakhstan. The presence of copper in such ores critically complicates the selective extraction of precious metals and leads to excessive reagent consumption. The authors conducted a comparative analysis of the effectiveness of classical mathematical approaches (V. P. Malyshev's method) and predictive analytics tools based on the AdaBoost algorithm. The modeling was based on data from 50 experimental cycles, in which the pH, copper concentration, and dosage of the sulfidizing agent (Na_2S) were varied.It was established that ensemble learning demonstrates exceptional accuracy ($R^2 = 0.9933$), significantly minimizing prediction error compared to the traditional Protodyakonov equation. A key result of the study was the identification of a critical inversion point at pH ≈ 3.7, which determines the rationality of using Na_2S. The feature importance analysis conducted allows not only for the stabilization of gold extraction but also for significant cyanide savings through the precise real-time control of copper-removal parameters.

Keywords: gold-copper ore, optimal parameters, cyanide leaching, mathematical approaches, AdaBoost algorithm, precipitating.

Introduction

This work is a continuation of research and development of cyanide leaching technology for gold-copper ore from one of Kazakhstan's high-copper-content deposits, where gold is finely intergrown with sulfide minerals (pyrite, arsenopyrite, and chalcopyrite) [1]. Cyanide processing of gold-copper ores is complicated [2] due to the need to account for the influence of copper on the processes [3]. There are various approaches to solving the problem of cyanide processing of gold-copper ores. The SART process (Sulfidization, Acidification, Recycling, and Thickening) involves converting copper from the solution into a precipitate by introducing a sulfidizing agent, acidification, copper precipitation, and recirculation of the cyanide solution [4]. The «SuCy» process consists of the precipitation of metal sulfides combined with a membrane filtration operation to clarify the copper residues [5]. The Sceresini process is used to

produce copper-bearing by-products and to regenerate cyanide [6]. However, the specific composition of the ore significantly influences the processing technology (amount of sulfidizing agent, pH). Existing methods for copper precipitation are based on acidifying cyanide solutions with sulfuric acid to a pH of 2.0–5.4. The process can proceed with or without the addition of a sulfiding agent, after which the copper precipitate is thickened and separated. Due to the variability of approaches, a single standard for optimal copper extraction parameters has not yet been established. Experimental design and the mathematical models derived from it are tools for approximation and process optimization [7] that have yielded a number of positive results [8] and are widely used to optimize metallurgical processes [9]. In an earlier published work by the authors [1], mathematical models of the precipitation process were obtained. However, new machine learning tools, such as AdaBoost, are now emerging. They allow processes to be predicted with high accuracy. The fundamental principle of the method is based on the iterative construction of a composition of «weak» algorithms – decision trees [10].

The objective of this work is to optimize the parameters for the precipitation of copper from cyanide leaching solutions of gold-copper ores in Kazakhstan using modern machine learning tools through a comparative analysis of traditional experimental design methods and the AdaBoost algorithm to determine the optimal values of pH and sulfidizer flow rate. Of additional scientific and practical interest is the analysis of feature importance, which allowed us to rank the process parameters according to their degree of influence on the depth of solution purification [11].

Materials and methods

All experiments were conducted at the D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University and the Eastern Mining and Metallurgical Research Institute of Non-Ferrous Metals (VNIItsvetmet), both located in Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan. An Agilent Technologies (USA) ICP-MS 7500cx mass spectrometer was used to study the chemical composition of the raw materials. The results of the experiments, conducted in accordance with the experimental matrix (Latin square), are presented in Table 1.1. A total of 50 copper precipitation experiments were conducted, including experiments 1–25 with the addition of Na_2S and experiments 26–50 without the addition of Na_2S.

Table 1.1 – Experimental conditions for copper precipitation

No.	With Na_2S addition				№.	Without Na_2S		
	Consumption Na_2S by stoichiometry, %	pH of the solution after acidification	Initial Cu content, g/l	Cu content after precipitation, g/l		Initial Cu content, g/l	pH of the solution after acidification	Cu content after precipitation, g/l
1	80	3	0.34	0.165	26	0.34	3	0.046
2	80	4	1.15	0.806	27	0.34	4	0.087
3	80	3.5	1.10	0.653	28	0.34	3.5	0.052
4	80	5	1.55	1,211	29	0.34	5	0.34
5	80	4.5	1.35	1.041	30	0.34	4.5	0.33

6	90	3	1.15	0.587	31	1.15	3	0.172
7	90	4	1.10	0.703	32	1.15	4	0.393
8	90	3.5	1.55	1.003	33	1.15	3.5	0.194
9	90	5	1.35	1.162	34	1.15	5	1.15
10	90	4.5	0.34	0.206	35	1.15	4.5	1.09
11	83.3	3	1.10	0.638	36	1.1	3	0.165
12	83.3	4	1.55	1,192	37	1.1	4	0.382
13	83.3	3.5	1.35	0.898	38	1.1	3.5	0.234
14	83.3	5	0.34	0.192	39	1.1	5	1.1
15	83.3	4.5	1.15	0.889	40	1.1	4.5	1.07
16	156	3	1.55	0.966	41	1.55	3	0.232
17	156	4	1.35	0.901	42	1.55	4	0.487
18	156	3.5	0.34	0.176	43	1.55	3.5	0.371
19	156	5	1.15	0.878	44	1.55	5	1.55
20	156	4.5	1.10	0.832	45	1.55	4.5	1.49
21	117	3	1.35	0.675	46	1.35	3	0.202
22	117	4	0.34	0.187	47	1.35	4	0.437
23	117	3.5	1.15	0.732	48	1.35	3.5	0.265
24	117	5	1.10	0.871	49	1.35	5	1.35
25	117	4.5	1.55	1,204	50	1.35	4.5	1.32

The results were processed using the method of V. P. Malyshev (Malyshev, 1981). As a result of data processing by substituting partial dependence equations, a mathematical model (1.1) was obtained, describing the influence of two factors (process pH and initial Cu content in the solution) on the process of copper precipitation with the addition of Na_2S from the cyanide leaching solution of gold-copper ores. The equation showing the partial dependence on the amount of Na_2S was not included, as it is not a significant factor [1]. Consequently, this factor can be neglected.

$$Y_G = 1.33\times (-0.028x_2^2 + 0.358x_2 - 0.212) \times (0.091x_3^2 + 0.590x_3 - 0.023) \quad (1.1)$$

As a result of data processing by establishing partial dependence equations, a mathematical model (1.2) was obtained, describing the influence of two factors on the process of copper precipitation from the cyanide leaching solution of gold-copper ores without the addition of Na_2S:

$$Y_G = 1.72\times (0.149x_4^2 + 0.658x_4 + 0.740) \times (0.0016x_5^2 + 0.5366x_5 - 0.0110) \quad (1.2)$$

To apply the AdaBoost method, a training sample was formed by consolidating the results of 50 field experiments (including series with and without the addition of a sulfidizing agent, Table 1.1) into a structured data array. The following key process parameters were identified as independent predictors (features):

– presence of a sulfidizer (binary feature: 1 – present, 0 – absent);

– Na_2S consumption (% of stoichiometry; for experiments without Na_2S = 0);

– pH of the solution after acidification (X_2, X_5);

– initial Cu content in the solution (X_3, X_4).

The residual copper concentration after the precipitation process was completed (Y) was used as the response variable (Target). The AdaBoost Regressor algorithm was used to build the predictive model. This tool was chosen due to its proven effectiveness when working with limited datasets (small data) and its resistance to local biases. The fundamental principle of the method is based on the iterative construction of a composition of «weak» algorithms – decision trees. Each subsequent iteration of the algorithm aims to minimize prediction error in those regions of the feature space where previous iterations demonstrated the greatest error. Model stabilization was achieved through precise tuning of hyper parameters: the ensemble size was limited to 100 iterations with a learning rate of 0.1, which allowed for an optimal balance between convergence speed and generalization ability. To confirm reliability and eliminate the effect of overfitting, the AdaBoost model was validated using the Shuffle Split cross-validation scheme. This approach allowed for an objective assessment of the algorithm's performance on independent test samples. The adequacy of the intelligent model was evaluated in comparison with the Protodyakonov equations (Y_1, Y_2) using a hierarchy of metrics: the coefficient of determination (R^2), which determines the proportion of explained variance; the mean squared error (MSE), which is sensitive to large deviations; and the mean absolute error (MAE), which reflects the actual prediction accuracy in units of copper concentration (g/L). The reliability of the AdaBoost model was confirmed by a cross-validation procedure (Shuffle Split). The initial experimental dataset (50 observations) was randomly partitioned into training and testing sets at an 80:20 ratio. To ensure full reproducibility of the results, the shuffling procedure was fixed using the «random_state = 42» parameter. This approach enabled an objective evaluation of the algorithm's performance on independent control validation sets over 10 iterations of random splitting. The model's accuracy during the training and testing phases, as well as its comparison with the Protodyakonov equations (Y_1,Y_2), was quantitatively assessed using three statistical criteria:

– coefficient of determination (R^2): an indicator of the degree of model fit to the experimental data;

– mean absolute error (MAE) (Derringer & Suich, 1980): reflects the average prediction error in MPa (1.3);

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|y_i - y_i^p\right| \quad (1.3)$$

where:

n – the total number of experimental data points;

y_i – the actual strength value (MPa);

y_i^p – the predicted strength value (MPa).

Root Mean Square Error (RMSE) (Willmott & Matsuura, 2005): used to assess the sensitivity of the models to significant deviations (outliers) (1.4);

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_i^p\right)^2} \quad (1.4)$$

where:
n – the total number of experimental data points;
y_i – the actual strength value (MPa);
y_i^p – the predicted strength value (MPa).

Results and discussion

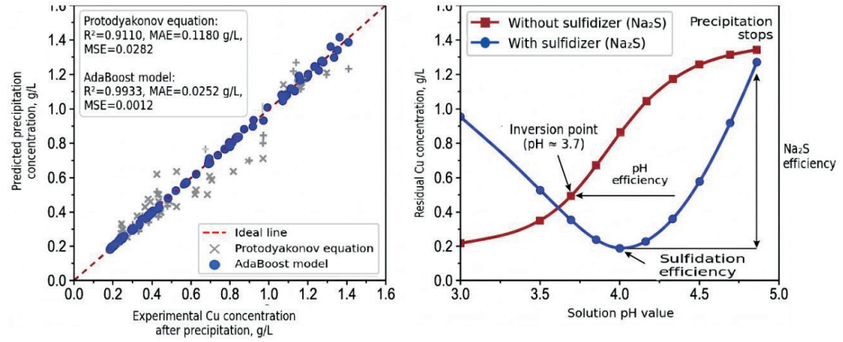
A sample of 50 experiments based on Table 1.2 was used to train the AI. The input factors were: Na_2S flow rate (X_1), pH (X_2, X_5), and initial copper concentration (X_3, X_4). Table 1.2 shows a comparative sample of the results. The model demonstrates high «sensitivity» – in most experiments, the deviation does not exceed 1%, which is considered an excellent result for metallurgical processes. The only noticeable spike in error (10.8 %) was recorded in experiment 26 (without Na_2S at low pH). This indicates that under conditions of minimal copper precipitation, the mathematical relationships become more complex; however, even here the calculated values remain within reasonable limits. At an initial copper concentration of 1.55 g/L (experiments 16 and 44), the error drops to a minimum (0.8–0.9 %). This confirms that AI performs well in predicting outcomes specifically in loaded systems, which are most critical for production

Table 1.2 – Comparative table of results (sample):

Experiment №	Process type	pH	$Cu_{initial}$, g/L	Cu AdaBoost, g/L	Deviation, %
1	with Na_2S	3	0.34	0.168	1.8
6	with Na_2S	3	1.15	0.601	2.3
16	with Na_2S	3	1.55	0.958	0.8
26	without Na_2S	3	0.34	0.051	10.8
34	without Na_2S	5	1.15	1.142	0.7
44	without Na_2S	5	1.55	1.535	0.9

Figure 1.1 shows the graphs obtained using the AdaBoost ensemble machine learning method. Figure 1.1a shows a comparison of the correlation ability of the analytical model (Malyshev V. P. equation) and the AdaBoost ensemble machine learning method. The line y = x corresponds to a perfect match between the calculation and the experiment. The coefficient of determination for AdaBoost (R^2= 0.993) significantly exceeds the corresponding value for Protodyakonov's equation (R^2= 0.911). Predictive analysis of the effect of pH on the efficiency of copper precipitation depending on the presence of a sulfidizing agent (initial copper content 1.35 g/L). The AdaBoost model clearly identifies the point of inversion in the efficiency of the regimes at pH ≈ 3.7 and the stabilization of the sulfidation process at pH = 4.0–4.5, which allows for the optimization of sulfuric acid consumption. This graph demonstrates the correlation between experimental data and AdaBoost predictions. AdaBoost (blue points): fit almost perfectly on the line y=x, corresponding to R^2 = 0.993. Protodyakonov's equation: exhibits greater

scatter (error up to 12–15% at), especially at extreme pH values. AI more accurately accounts for nonlinear relationships between factors, which is critical for controlling reagent consumption. The graph shows how the residual copper concentration changes at different acidity levels (for an initial Cu concentration of 1.35 g/L). Without a sulfidizer (red line): Efficiency drops sharply at pH > 3.5. At pH = 5, copper does not precipitate at all (residue 1.35 g/L). With a sulfidizing agent (blue line): Allows for effective removal of copper even at higher pH (4.0–4.5). This makes it possible to save sulfuric acid in production. Intersection point: The AdaBoost model accurately identifies pH ≈ 3.7 as the threshold beyond which the addition of Na_2S becomes necessary for solution purification.



(a) (b)

Figure 1.1 – Comparison of the correlation ability of the analytical model and the AdaBoost ensemble machine learning method (a), and predictive analysis of the effect of pH on the efficiency of copper precipitation depending on the presence of a sulfidizer (initial copper content 1.35 g/L)

Next, a statistical evaluation of the obtained models was performed using Malyshev's probabilistic-deterministic method and the AdaBoost machine learning method (Table 1.3). The comparison of metrics in Table 1.3 clearly demonstrates the technological gap between classical mathematics and modern AI. The coefficient of determination R^2 for AdaBoost is very close to one (0.9933). Meanwhile, the Malyshev method is less accurate at 0.911. The mean absolute error (MAE) for the neural network algorithm is nearly 5 times lower than that of the traditional method (0.025 vs. 0.118 g/L). Sensitivity to outliers: The MSE for AdaBoost is practically zero (0.0012). This indicates that the model is extremely stable and rarely makes gross errors in predictions, unlike classical equations, which sometimes do so during sudden changes in parameters (e.g., pH spikes).

Table 1.3 – Evaluation of the obtained models using Malyshev's probabilistic-deterministic method and the machine learning method (AdaBoost)

Metric	Malyshev method	AdaBoost model
Coefficient of determination (R^2)	0.911	0.9933
Mean Absolute Error (MAE), g/L	0.118	0.0252
Mean Square Error (MSE)	0.028	0.0012

The value of the coefficient of determination during the training phase ($R^2 = 0.9933$) is due to the precise alignment of the AdaBoost ensemble's structure with the nature of the experimental data obtained based on the results of the experimental design. To conduct a comprehensive verification and eliminate the effect of overfitting, an independent test subset (20% of the sample, or 10 experiments) was programmatically selected from the total set of 50 full-scale experiments (Table 1.1) by fixing the parameter random_state = 42. These experiments were completely isolated from the AdaBoost algorithm during the training phase. Table 1.4 presents a comparison of the actual results of the laboratory tests (both with and without the addition of Na_2S) with the predicted values generated by the AdaBoost model on the test set.

Table 1.4 – Results of testing the generalization ability of the AdaBoost model on an independent test set

№	Mode	pH	Cu_{Oinit}, g/L	Actual Cu_{resid}, g/L	Forecast Cu AdaBoost, g/L	MAE, g/L	Relative deviation, %
3	With Na_2S	3.5	1.10	0.653	0.661	+0.008	1.2
9		5.0	1.35	1.162	1.179	+0.017	1.5
13		3.5	1.35	0.898	0.885	-0.013	1.4
16		3.0	1.55	0.966	0.958	-0.008	0.8
22		4.0	0.34	0.187	0.191	+0.004	2.1
28	Without Na_2S	3.5	0.34	0.052	0.055	+0.003	5.7
32		4.0	1.15	0.393	0.402	+0.009	2.3
37		4.0	1.10	0.382	0.391	+0.009	2.4
44		5.0	1.55	1.550	1.535	-0.015	0.9
48		3.5	1.35	0.265	0.271	+0.006	2.2

An analysis of the independent testing results confirms the adequacy of the AdaBoost model and ensures that there is no overfitting to the training data. Next, a quantitative assessment of feature importance was conducted, derived directly from the trained AdaBoost ensemble model. The numerical values representing the contribution of each technological factor to the target response (residual copper concentration) are presented in Table 1.5.

Table 1.5 – Quantitative measures of the relative importance of features in the AdaBoost model

Factor	Proportion of the factor's influence in the model	Relative importance of the characteristic, %
pH	0.615	61.5
Initial concentration of copper in the solution: Cu_{init}	0.252	25.2
Presence of a sulfidizer (1 / 0)	0.115	11.5
Sulfidizer consumption (Na_2S, %) relative to stoichiometry	0.018	1.8
Total	1.000	100.0

Table 1.5 shows that the dominant factor determining the completeness of copper precipitation from cyanide solutions is the pH of the medium (61.5 %). The second most significant factor is the initial metal concentration (Cu_{init} – 25.2 %), reflecting the influence of the law of mass action on the precipitation kinetics. The basic fact of the presence or absence of a sulfidizing agent in the system accounts for 11.5 % of the response variance. The Na_2S dosage has an effect on the system equal to 1.8 %, which confirms the conclusion that it can be omitted.

Conclusions

This study conducted a comparative evaluation of traditional and intelligent methods for modeling the process of removing copper from cyanide solutions. It was found that the use of the AdaBoost machine learning algorithm allows for high accuracy in predicting residual metal concentrations ($R^2 = 0.9933$), significantly outperforming V. P. Malyshev's method and Protodyakonov's classical equation in terms of mean absolute error. Experiments have identified the process inversion point at pH ≈ 3.7, which determines the limits of the effectiveness of the Na_2S sulfidizing agent. Work is currently underway to confirm the obtained data through independent experimental verification. A quantitative assessment of the technological and economic advantages associated with the proposed approach will also be calculated. The results will be published.

REFERENCES

1 **Kassymova, D., Sapinov, R., Kushakova, L., Kulenova, N., Shoshay, Z., & Adylkanova, M.** Optimization of Copper Recovery from Cyanide Leaching Solutions Used in Gold–Copper Ore Processing Using Probabilistic–Deterministic Experimental Design // Processes. – 2024. – № 13(1). – P. 61.

2 **Sceresini, B.** Gold-Copper Ores // In Developments in Mineral Processing / Eds. Mike, D., Adams, B. A. – Amsterdam : Elsevier, The Netherlands. – 2005. – № 15. – P. 789–824.

3 **Medina, D., Anderson, C. G.** A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates // Metals. – 2020. – № 10. – P. 897.

4 **Estay, H.** Designing the SART process – A review. Hydrometallurgy. – 2018. – № 176. – P. 147–165.

5 **Estay, H., Ruby-Figueroa, R., Quilaqueo, M., Seriche, G., Cortés, I., Gim-Krumm, M., Barros, L.** Enhancing the effectiveness of copper and cyanide

recovery in gold cyanidation: A new integrated membrane process // Hydrometallurgy. – 2021. – № 202. – P. 105606.

6 **Sceresini, B.; Breuer, P.** Chapter 43 – Gold-Copper Ores // In Adams Gold Ore Processing, 2nd ed. / Ed. Mike, D. – Amsterdam : Elsevier, The Netherlands. – 2016. – P. 771–801.

7 **Малышев, В. П.** Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алма-Ата : Наука, 1981. – 116 с.

8 **Das, A. K., Saikat, D.** Chapter 3 – Optimization of Extraction Using Mathematical Models and Computation // In Computational Phytochemistry / Eds. Satyajit, D., Sarker, L. N. – Amsterdam : Elsevier, The Netherlands. – 2018. – P. 75–106.

9 **Gürkan, E. H., Tibet, Y., Çoruh, S.** Application of Full Factorial Design Method for Optimization of Heavy Metal Release from Lead Smelting Slag // Sustainability. – 2021. – № 13. – P. 4890.

10 **Freund Y., Schapire R. E.** A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting // Journal of Computer and System Sciences. – 1997. – № 55(1). – P. 119–139.

11 **Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.** The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – New York : Springer-Verlag. – 2009. – P. 745.

REFERENCES

1 **Kassymova, D., Sapinov, R., Kushakova, L., Kulenova, N., Shoshay, Z., & Adylkanova, M.** Optimization of Copper Recovery from Cyanide Leaching Solutions Used in Gold–Copper Ore Processing Using Probabilistic–Deterministic Experimental Design // Processes. – 2024. – № 13(1). – P. 61.

2 **Sceresini, B.** Gold-Copper Ores // In Developments in Mineral Processing / Eds. Mike, D., Adams, B. A. – Amsterdam : Elsevier, The Netherlands. – 2005. – № 15. – P. 789–824.

3 **Medina, D., Anderson, C. G.** A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates // Metals. – 2020. – № 10. – P. 897.

4 **Estay, H.** Designing the SART process – A review. Hydrometallurgy. – 2018. – № 176. – P. 147–165.

5 **Estay, H., Ruby-Figueroa, R., Quilaqueo, M., Seriche, G., Cortés, I., Gim-Krumm, M., Barros, L.** Enhancing the effectiveness of copper and cyanide recovery in gold cyanidation : A new integrated membrane process // Hydrometallurgy. – 2021. – № 202. – P. 105606.

6 **Sceresini, B.; Breuer, P.** Chapter 43 – Gold-Copper Ores // In Adams Gold Ore Processing, 2nd ed. / Ed. Mike, D. – Amsterdam : Elsevier, The Netherlands. – 2016. – P. 771–801.

7 **Malyshev, V. P.** Veroyatnostno-determinirovannoe planirovanie e`ksperimenta [Probabilistic-deterministic planning of the experiment] – Alma-Ata : Sci, 1981. – 116 p.

8 **Das, A. K., Saikat, D.** Chapter 3 – Optimization of Extraction Using Mathematical Models and Computation // In Computational Phytochemistry / Eds. Satyajit, D., Sarker, L. N. – Amsterdam : Elsevier, The Netherlands. – 2018. – P. 75–106.

9 **Gürkan, E. H., Tibet, Y., Çoruh, S.** Application of Full Factorial Design Method for Optimization of Heavy Metal Release from Lead Smelting Slag // Sustainability. – 2021. – № 13. – P. 4890.

10 **Freund Y., Schapire R. E.** A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting // Journal of Computer and System Sciences. – 1997. – № 55(1). – P. 119–139.

11 **Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.** The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – New York : Springer-Verlag. – 2009. – P. 745.

Received 04.07.26.
Received in revised form 04.07.26.
Accepted for publication 20.08.26.

***Р. В. Сапинов**[1,2], **Д. Б. Касымова**[2,3]*
[1]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]ШҒЗТКМИтүсмет, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
04.07.26 ж. баспаға түсті.
04.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЛТЫН-МЫС КЕНДЕРІН ЦИАНДАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДАҒЫ МЫСТЫ ТҰНДЫРУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ ПАРАМЕТРЛЕРІН БОЛЖАУ: ЭКСПЕРИМЕНТТІ ЖОСПАРЛАУДАН ADABOOST МОДЕЛЬДЕУІНЕ ДЕЙІН

Бұл мақалада Қазақстандағы қиын өңделетін алтын-мыс кендерін қайта өңдеу кезінде алынатын өнімді ерітінділерден мысты тұндыру технологиясын жетілдіру тәсілдері қарастырылады. Мұндай кендерде мыстың болуы бағалы металдарды селективті түрде бөліп алуды айтарлықтай қиындатады және реагенттердің шамадан тыс шығындалуына әкеледі. Авторлар классикалық математикалық тәсілдердің (В. П. Малышев әдісі) және AdaBoost алгоритміне негізделген болжамды аналитика құралдарының тиімділігіне салыстырмалы талдау жүргізді. Модельдеу pH, мыс концентрациясы және сульфидтеуші агенттің (Na_2S) мөлшері өзгертіліп отырған 50 эксперименталды циклдің деректеріне негізделген.Ансамбльдік оқыту әдісі жоғары дәлдікті көрсетіп (R^2 = 0,993), дәстүрлі Протодьяконов теңдеуімен салыстырғанда болжау қателігін айтарлықтай азайтатыны анықталды. Зерттеудің негізгі нәтижесі – pH ≈ 3,7 кезіндегі инверсияның критикалық нүктесін

анықтау болды, бұл Na_2S пайдаланудың мақсатқа сәйкестігін айқындайды. Сипаттамалардың маңыздылығына жүргізілген талдау алтынды бөліп алу процесін тұрақтандыруға ғана емес, сонымен қатар нақты уақыт режимінде мысты жою параметрлерін дәл бақылау есебінен цианидті айтарлықтай унемдеуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: алтын мыс кендері, оңтайлы параметрлер, цианидті шаймалау, математикалық тәсілдер, AdaBoost алгоритмі, тұндыру.

Р. В. Сапинов[1,2], Д. Б. Касымова[2,3]
[1]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2]ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]«ВНИИцветмет», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 04.07.26.
Поступило с исправлениями 04.07.26.
Принято в печать 20.08.26.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ МЕДИ В ТЕХНОЛОГИИ ЦИАНИРОВАНИЯ ЗОЛОТОМЕДНЫХ РУД: ОТ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ADABOOST

В данной статье рассматриваются способы совершенствования технологии осаждения меди из продуктивных растворов, получаемых при переработке тугоплавких золото-медных руд в Казахстане. Присутствие меди в таких рудах критически осложняет селективное извлечение драгоценных металлов и приводит к чрезмерному расходу реагентов. Авторы провели сравнительный анализ эффективности классических математических подходов (метод В. П. Малышева) и инструментов прогнозной аналитики на основе алгоритма AdaBoost. Моделирование основывалось на данных 50 экспериментальных циклов, в которых варьировались pH, концентрация меди и дозировка сульфидирующего агента (Na_2S). Установлено, что ансамблевое обучение демонстрирует исключительную точность (R^2 = 0,9933), значительно минимизируя ошибку прогнозирования по сравнению с традиционным уравнением Протодяконова. Ключевым результатом исследования стало выявление критической точки инверсии при pH ≈ 3,7, которая определяет целесообразность использования Na_2S. Проведенный анализ важности характеристик позволяет не только стабилизировать процесс извлечения золота, но и значительно экономить цианид за счет точного контроля параметров удаления меди в режиме реального времени.

Ключевые слова: золото-медная руда, оптимальные параметры, цианидное выщелачивание, математические подходы, алгоритм AdaBoost, осаждение.

SRSTI 55.33.39
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/209-224

D. Zh. Sarsembayev[1], N. A. Daniyarov[2],
****A. K. Kelisbekov[3], A. A. Sargulzhina[4]***
[1,4]Zhezkazgan University named after O. A. Baikonurov,
Republic of Kazakhstan, Zhezkazgan;
[2]Corporate University of Personnel Service of Kazakhmys Corporation LLP,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]A. S. Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3548-4507
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4476-4569
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8857-8162
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0505-5709
*e-mail: akelisbekov@mail.ru

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF DIESEL TRANSPORT EQUIPMENT IN DEEP MINES

This article presents a comprehensive analysis of the mining and technical conditions for the operation of self-propelled diesel equipment (SPDE) in the underground mines of the Kazakhmys Corporation. The relevance of this research stems from the need to improve the energy efficiency of mining operations in the context of declining ore grades and increasing mining depths. The study involved a systematisation of the fleet, comprising loaders and haulers, mine dump trucks and front-end loaders from leading global manufacturers (Caterpillar, Sandvik, Epiroc).

Particular attention was paid to the relationship between the technical characteristics of diesel engines with power outputs ranging from 299 to 522 kW and the volume of toxic emissions produced, as well as the associated ventilation costs. It has been established that the share of underground transport in the cost structure of ore extraction reaches 29.6 %, with the operation of diesel machinery accounting for more than half of these costs (17.2 % of the total cost). The analysis showed that the modern Tier 3/Stage IIIA environmental standards adopted in the Republic of Kazakhstan require the supply of significant volumes of fresh air to dilute exhaust gases, which places a heavy load on ventilation systems.

The results of this study enable a quantitative assessment of the current level of dieselisation in production and provide a basis for justifying the economic viability of switching to alternative propulsion systems, including battery-powered and hybrid technology. The data obtained serve as a foundation for further mathematical modelling and optimisation of the fuel efficiency of the self-propelled diesel vehicle fleet using modern digital technologies.

Keywords: underground mine, self-propelled diesel equipment, Kazakhmys Corporation, mining and technical conditions, production costs, mine ventilation, emissions of harmful substances, energy efficiency.

Introduction

The underground mines of the Kazakhmys Corporation are among the world's largest copper mining operations, concentrated primarily in the Zhezkazgan and Balkhash mining and metallurgical complexes in Kazakhstan. Reserves are mined primarily using the room-and-pillar method, which is well suited to the mechanisation of key technological processes but places high demands on the transport component of mining operations [1; 2]. The search for and development of technical solutions to reduce ore mining costs requires a comprehensive review of this issue [3].

The key link in the technological chain is underground transport, which accounts for 29.6 % of the cost of ore extraction at the South-Zhezkazgan Mine (SZM). Diesel self-propelled transport accounts for the largest share of this cost – 17.2 %. Given the recorded decline in the copper content of the ore from 1.19% to 0.53 %, the increase in the volume of rock transported makes the energy efficiency of the diesel fleet and the associated ventilation costs a critically important factor in the enterprise's economics [4]. Bondarenko [4] conducted a comparative analysis of the efficiency parameters of internal combustion engine-powered and electric-powered mining equipment in domestic mines, finding that for haulage lengths exceeding 1,500 m, the specific cost of transporting 1 ton of ore using electric transport is lower than that of diesel transport. This conclusion is particularly relevant for the Zhezkazgan mines, where the haulage length to the main ore passes averages 2,200 m.

Kazakhmys Corporation's fleet of self-propelled equipment includes over 229 diesel-powered internal combustion engines (ICEs), including 119 mine dump trucks and 110 LHDs and front-end loaders. All of these emit toxic gases (CO, NOx, PM), which significantly complicates mine air hygiene and entails significant ventilation costs. Modern approaches to solving this problem include the use of mathematical models and machine learning to optimize the energy consumption of ventilation systems, as confirmed by the work of Saleem [5].

Halim et al. [6] found during field testing of Epiroc battery-powered machines (ST14 Battery, MT42 Battery) at the Kittilä mine (Finland) that when operating solely on battery-powered equipment, CO, NOx, and diesel particulate matter concentrations in the mine atmosphere were reduced to virtually zero. This result is particularly significant for Kazakhmys, which already has these models of machines in its fleet.

Global experience shows that the introduction of battery-powered vehicles (BEVs) not only reduces the load on ventilation systems but also radically improves working conditions. For example, Halim et al. [6] based on field tests at the Kittilä mine (Finland), it was confirmed that replacing diesel equipment leads to a significant reduction in noise and heat emissions. In addition, Kuslap et al. [7] emphasized in a 2025 study that the use of BEVs in underground conditions is the most promising solution for increasing the energy efficiency of deep-level ventilation.

The objective of this study is to conduct a systems analysis of the mining and technical conditions of deep-level ventilation at Kazakhmys Corporation's underground mines and to assess the cost structure of in-mine transport as a basis for developing technological solutions to reduce production costs. The issue of underground ore

mining transportation has been the subject of numerous studies. Ivantsov and Akhpashev [8] demonstrated that transportation operations traditionally account for the largest share of underground mine operating costs, and this figure steadily increases with increasing haulage depth and distance. With haulage lengths exceeding 1,500–2,000 m, the use of self-propelled diesel transport becomes the dominant cost element in the production chain.

Research by Rylnikova et al. [9] on the Zhezkazgan deposit showed that depletion of balance reserves and a decrease in copper grade in the ore below the threshold of 0.5% requires a fundamental revision of the mining technology. The authors propose the concept of locating the beneficiation process directly underground, which would reduce the volume of transported ore. In international practice, the problem of reducing diesel engine emissions in mine atmospheres is considered in the context of the electrification of underground transport. Paraszczak et al. [10] showed that an electric drive provides significantly lower heat and toxic gas emissions than a diesel one, while the EMT-50 trolley dump truck requires only about 17 % of the air volume required by a similar diesel truck. Jacobs, Hodkiewicz, and Bräunl [11] confirmed that replacing diesel LHDs with electric ones reduces operating costs by approximately 30 %, primarily due to savings on ventilation.

The ventilation of underground workings with intensive use of diesel equipment is discussed in detail in Popov's work [12]. According to current Russian and Kazakh standards, the specific air flow per 1 kW of diesel engine power should be at least 3.0–3.5 m^3/min. For the largest CAT AD45B dump trucks (439 kW) in the Kazakhmys fleet, this corresponds to an air flow of 1,290–1,505 m^3/min per vehicle [12; 13].

Paraszczak et al. [14] substantiated the feasibility of using electric trucks in deep mines, noting that ventilation costs using electric traction are only approximately 17 % of those for diesel transport. Saleem showed that optimization of ventilation systems using mathematical and machine-learning models reduces the energy consumption of fan units by 31 %. Golik [15] considers the transport problem as an integral part of the overall underground mining system, pointing out the interdependence of the parameters of the mining system, the volume of the fleet of self-propelled equipment, and the need for air supply.

Materials and methods

The study focused on the underground mines of Kazakhmys Corporation, located in the Zhezkazgan, Karaganda, and Balkhash production divisions, as well as the Zhaisan mine and the Shaft Sinking Trust (SST).

The methodological basis of the work is a comprehensive technical and economic analysis, including the following stages:

– inventory and structuring of the underground mining fleet by model, production division, and machine type based on Kazakhmys corporate reporting;

– systematization of the technical characteristics of mining equipment based on manufacturer data (Caterpillar, Epiroc, Sandvik) and technical documentation;

– analysis of the ore mining cost structure by cost item, highlighting the share of in-mine transport in general and diesel transport in particular;

– Calculation of air requirements for ventilation of mine workings during diesel machine operation in accordance with the methods [12; 13; 16], followed by comparison with actual measurement data;

– Technical and economic assessment of the cost structure of in-mine transport using statistical and structural analysis methods.

Equipment specifications are based on official manufacturer specifications and publicly available technical data sheets. Regarding ventilation requirements for mine workings, the guiding document is the Industrial Safety Rules for Hazardous Industrial Facilities Conducting Mining Operations [13]; maximum permissible concentrations of CO, NOx, and dispersed particles in the air of the working area are established by the rules [16]. A methodology confirmed in studies [12] was used to calculate air flow rates:

$$Q = q \cdot N$$

where Q is the minimum air flow rate for one diesel unit, m³/min; q is the specific air supply rate, m³/(min kW); N is the diesel engine power, kW.

Results and discussion

The underground mines of Kazakhmys Corporation extract copper ore in the specific mining and technical conditions of the Zhezkazgan and Balkhash regions of Kazakhstan. The main characteristics determining the operating conditions of mobile equipment can be characterized as follows.

Firstly, the great depth of mining operations: at the operating mines of the Zhezkazgan division, stoping depths reach 600–800 m, resulting in elevated rock temperatures (up to 22–26°C) and mine air humidity, as well as increased ventilation network lengths.

Secondly, the significant haulage distances are significant. Due to the use of room-and-pillar mining and the gradual shift of the stope front away from the central shafts, the average haul distance for diesel trucks to reach the main ore passes is 2,200 meters, and in some areas reaches 3,500–4,000 meters. This leads to a significant increase in costs and exhaust emissions.

Thirdly, there is the confined nature of the mine workings. The dimensions of the chambers and transport workings are limited by the requirements of the mining systems used. The height of transport crosscuts and crosscuts is 3.5–4.5 meters, and the width is 4.5–6.0 meters, which imposes strict restrictions on the dimensions of the self-propelled equipment used.

Fourth, the decline in copper grade in ore. The average copper grade in mined ore has fallen from 1.19 % in 1995 to 0.5–0.6 % today. To maintain planned metal production, mines are forced to increase mining volumes, which requires an increase in the fleet and intensity of mobile equipment.

Fifth, ore losses in blocks. When using the room-and-pillar system, block losses can reach up to 30 % with a copper grade in the pillars of up to 2 %. This not only reduces reserve recovery but also predetermines a further increase in mining volumes and, consequently, an additional burden on the transport system.

As of December 2025, Kazakhmys Corporation's self-propelled equipment fleet consisted of 229 units, including 119 mine trucks and 110 LHDs and front-end loaders. The leading equipment suppliers are Caterpillar (USA), Epiroc (Sweden), and Sandvik (Finland/Sweden). Table 1 lists the technical specifications of the most common models.

Table 1 – Technical characteristics of the main models of self-propelled diesel equipment «Kazakhmys»

Parameter	CAT AD45B	CAT AD30	CAT 980L	Epiroc MT5020
Machine type	Dump truck	Dump truck	LHD	Dump truck
Load capacity, t	45	30	-	50
Body/bucket capacity, m³	18,0–25,1	11,3-17,5	4,2–12,2	23,4-31,3
Engine	Cat C18	Cat C15	Cat C13 ACERT	Cummins QSK19
Engine power, kW	439	299	303	522
Max. speed, km/h	40,5	36,7	39,5	40,4
Machine weight, t	85	60	30,1	92,9
Machine height, m	3,036	2,6	3,813	3,255
Emission rate	Tier 3 / Stage IIIA (or VR) equivalent	Tier 3 / Stage IIIA (or VR) equivalent	Tier 3 / Stage IIIA (Nonroad Stage III)	EPA Tier 3

As shown in Table 1, all models are equipped with high-power 4-stroke turbocharged diesel engines (299–522 kW). Actual fuel efficiency varies significantly between 30–70 l/h: peak values correspond to full-load conditions during ore haulage, while minimum values correspond to shunting operations. The equipment's toxic emissions comply with the Tier 3/Stage IIIA standard, which is a mandatory industrial safety requirement in the Republic of Kazakhstan [13].

The distribution of the diesel fleet by the corporation's production divisions is presented in Table 2. Including two battery-powered units (Epiroc MT42 Battery and ST14 Battery, Zhomart Mine), Kazakhmys's total fleet of self-propelled mining equipment amounts to 229 units. The largest concentration is in the Zhezkazgan division - 127 units, or 55.5% of the total, which is due to the scale of mining production in this region.

Table 2 – Distribution of the SPDE fleet by divisions of Kazakhmys

Model	Zhezkazgan	Karaganda	Balkhash	SST	Zhaisan	Total
Mine dump trucks						
CAT AD45B/AD30	52/1	-/3	11/1	-/19	-/3	63/27
Epiroc MT-series (5020/54/2200)	9	1	-	1	2	13
Sandvik TH-series (545/540/430/320/315)	2	12	-	1	-	15
Total dump trucks:	64	16	12	21	5	118
LHDs and front loaders						
CAT 980L/R1700/ R1300G	37/14/-	-/3/2	3/4/-	-/8/-	-/2/-	40/31/2
Epiroc ST-series (14/1030/7)	7	-	1	10	2	20

Model	Zhezkazgan	Karaganda	Balkhash	SST	Zhaisan	Total
Sandvik LH-series (621/514/307)	3	7	2	3	-	15
KAMA WJ6	-	-	-	1	-	1
Total LHDs/loaders:	61	12	10	22	4	109
TOTAL units of equipment:	126	28	22	43	9	227

Source: Kazakhmys corporate data, December 2025.

An analysis of Table 2 shows that the most widely used dump truck model in the corporation's fleet is the CAT AD45B (63 units, or 52.9% of all dump trucks), demonstrating a rational approach to fleet management that reduces maintenance and spare parts costs. Among LHDs and front-end loaders, the CAT 980L (40 units) and CAT R1700 (31 units) dominate, accounting for a combined 64.5% of the loading equipment fleet (109 diesel, 1 battery-powered).

In addition to the diesel fleet presented in Table 2, the Zhomart mine is also operating the first battery-powered equipment: the Epiroc MT42 Battery (1 unit) and Epiroc ST14 Battery (1 unit), indicating the beginning of the practical testing of electric technologies in the Kazakhmys mines.

Mine Ventilation Requirements for Diesel-Powered Equipment. The operation of diesel internal combustion engines in the confined spaces of underground workings results in intense emissions of toxic components: carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NOx), sulfur dioxide (SO2), hydrocarbons, and fine soot particles (PM). Atmospheric parameters in the working area must strictly comply with the maximum permissible concentrations (MPCs) established by the Industrial Safety Rules for Hazardous Production Facilities Conducting Mining Operations [13] and the Sanitary Rules for Hygienic Standards for Atmospheric Air on Enterprise Territories [16].

The key criterion for calculating air flow is the specific air flow rate, which is at least 3.0–3.5 m³/min per 1 kW of installed engine power [12]. Table 3 systematizes the standard and actual ventilation indicators for the workings of the Kazakhmys Corporation mines.

Table 3 – Standard and actual parameters for ventilation of mine workings during operation of diesel equipment at the Kazakhmys mines

Parameter	Unit of measurement	Standard (PB)	Fact (production face)
Sanitary and hygienic conditions:			
Specific air consumption per 1 kW of power	m³/min	3,0–3,5	3,2–4,0
CO concentration	mg/m³	≤20	12–18
NOx concentration (NO+NO_2),	mg/m³	≤5	3,5–4,8
Dust concentration (PM_{10} soot)	mg/m³	≤0,15	0,08–0,14
Air velocity in the workings	m/s	≥0,25	0,3–0,8
Air temperature in the workplace	°C	≤26	16–24
Equipment parameters:			

Parameter	Unit of measurement	Standard (PB)	Fact (production face)
Sanitary and hygienic conditions:			
Air flow for CAT AD45B (439 kW)	m³/min	≥1290	1350–1720
Air consumption for CAT 980L (303 kW)	m³/min	≥804	850–1070

Source: compiled based on [12; 15; 16] and data from the SZM ventilation department

An analysis of the data in Table 3 demonstrates that, although actual concentrations of harmful impurities generally remain within the maximum permissible concentration (MPC), they dangerously approach critical levels in the production faces when several pieces of equipment are operating simultaneously. Particularly noteworthy are NOx levels (3.5–4.8 mg/m³, compared to the MPC of 5.0 mg/m³) and PM_{10} soot concentrations (0.08–0.14 mg/m³, compared to the standard of 0.15 mg/m³). This indicates that the ventilation system is operating at its design capacity.

The total estimated air requirement for 227 pieces of diesel equipment (taking into account a simultaneity factor of 0.7) ranges from 800–1200 m³/s, which entails significant energy consumption by the ventilation units. Ventilation costs account for 2.4 % of ore mining costs at the SZM. According to field tests of Epiroc battery-powered vehicles at the Kittilä mine (Finland), toxic gas concentrations in work areas are reduced to virtually zero when switching to electric equipment, paving the way for a significant reduction in standardized air supply volumes. According to [10], an electric trolley truck requires only approximately 17% of the air volume required by a similar diesel vehicle, while ventilation costs can account for up to 40% of the mine's total electricity consumption [11].

The high energy intensity of mine ventilation systems is largely driven by stringent regulatory requirements for air environment parameters and the heterogeneity of mining and technical conditions across various types of workings. In accordance with Paragraph 837 of the Industrial Safety Rules [12], specific regulatory ranges for airflow velocity are established. For basic workings, the minimum permissible velocity is 0.25 m/s in development and heading faces, decreasing to 0.15 m/s during shaft sinking, while the upper limit in production and development workings is strictly restricted to 4.0 m/s. In main haulage drifts, crosscuts, and main inclines, the maximum velocity must not exceed 8.0 m/s, whereas in ventilation shafts and ducts in the absence of regular travel of people, an increase up to 10–12 m/s is permitted.

Particular attention in the design of underground mine ventilation is paid to microclimate parameters and aerodynamic constraints. The same regulatory section stipulates that the minimum permissible air velocity in active production faces at temperatures up to 20 °C must be no less than 0.5 m/s. In practice, within intensive loading and dumping zones where diesel-powered trackless equipment (LHDs) operates continuously, the optimal airflow velocity is maintained in the range of 0.5–1.5 m/s. This specified velocity interval represents a technologically justified compromise: it ensures the effective removal and suppression of fine dust (with a regulatory MPC of 2 mg/m³), the rapid dilution of hazardous exhaust gas components (primarily nitrogen

oxides and carbon monoxide), and simultaneously prevents the overcooling of mine workers (the ‘draft effect’) under low intake air temperatures.

An additional load on the main fan units (MFUs) is imposed by seasonal factors and the depth of mining operations. During the winter period, due to the significant density differential between ambient and mine air, natural ventilation draft occurs, which assists fan operation. Concurrently, pursuant to Paragraph 836 of the Industrial Safety Rules [12], the intake airflow must be heated by mine air heaters to ensure a temperature of no less than +2 °C at a distance of 5 meters from the junction of the heater duct with the shaft (adit), thereby preventing shaft icing. In the summer, this thermal depression sharply weakens or reverses, which requires forcing the MFU power to maintain regulatory velocities and ensure proper mine air quality. Pursuant to Paragraph 825 of the Rules [12], ventilation must guarantee an oxygen content in the air of no less than 20 % (by volume) with a carbon dioxide concentration at workplaces not exceeding 0.5 %. Furthermore, at deep horizons (800–1000 m), the natural temperature of the host rocks increases, reaching values of +28...+34 °C. If standard mine-wide ventilation modes fail to keep the temperature in the working area below the regulatory +26 °C (with an optimal relative humidity of 46–60 % and an allowable limit of 75–80 %), a technical necessity arises for artificial cooling and air conditioning systems. Monitoring of the air chemical composition and dust levels at workplaces is traditionally performed by the mine ventilation service in cooperation with specialized professional paramilitary mine rescue services.

In-mine Transport Cost Structure. An analysis of the ore mining cost structure (using the SZM example) shows that in-mine transport is the most resource-intensive process, accounting for 29.6 % of total costs. Self-propelled diesel transport predominates in the transportation cost structure (17.2 %), while rail transport and skip hoisting account for 5.4 % and 3.3 %, respectively. Notably, ventilation costs (2.4 %) directly correlate with diesel equipment operating intensity, which, combined with road maintenance costs (2.0 %), creates significant potential for optimization when switching to electric traction.

In-mine transport costs are the largest component of ore mining costs at the Zhezkazgan deposit. A detailed breakdown of these costs, based on SZM data, is presented below (Table 4).

Table 4 – Structure of ore mining costs and in-mine transport costs for the Southern Mining Region

Cost item	Share in production costs, %	Share in total in-mine transport, %	Note
Intra-mine transport (IMT) – total	29,6	100	[3]
– diesel transport	17,2	58,1	Dump trucks, LHDs, front-end loaders
– rail transport	5,4	18,2	Electric locomotive haulage
– ore crushing	1,7	5,7	Stone crushers
– skip hoist	3,3	11,1	Stem lift
– road maintenance	2,0	6,8	Soil of the workings
Cleaning work	21,6	-	-

Cost item	Share in production costs, %	Share in total in-mine transport, %	Note
Mining operations	9,1	-	-
Ventilation	2,4	-	-
Drainage	0,6	-	-
Other articles	36,7	-	-

Table 4 clearly demonstrates that diesel transport accounts for the largest share of both in-mine transport (58.1 %) and the overall cost of ore extraction (17.2 %). Underground mine transport system components account for 29.6 % of the total cost – a figure exceeding the combined share of all other mining processes (cleaning operations – 21.6 %, mining operations – 9.1 %).

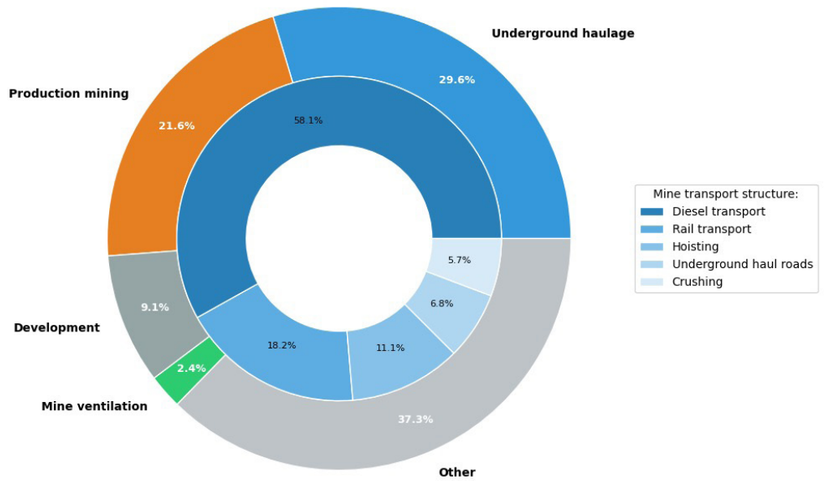


Figure 1 – Structure of operating costs of an underground mine with details of in-mine transport components

The presented cost structure (Figure 1) demonstrates the dominant role of in-mine transport in determining ore extraction costs (29.6 %). A detailed analysis of this process segment (the inner ring of the diagram) reveals that the operation of diesel-powered self-propelled equipment is the most resource-intensive component, accounting for 17.2 % of the company’s total operating expenses. The high cost concentration in the diesel segment, combined with the need to maintain standard ventilation parameters (2.4 %), confirms the significant economic potential of switching to alternative traction modes, which will significantly optimize the cost structure as the grade of the ore declines.

A characteristic feature of the cost structure is their rapid increase as the distance of ore haulage by diesel vehicles to the ore passes increases. With the current average haulage length of 2,200 meters, specific transportation costs per ton of ore significantly exceed those of mines with more compact horizons. This, coupled with the continuing decline in copper grade in the ore, creates an urgent need to optimize transportation systems and implement technologies that reduce specific costs.

It should be noted that rail transport costs (5.4 %) and road maintenance (2.0 %) are significantly lower than diesel transport costs, indicating the relatively high cost of owning and operating self-propelled diesel vehicles, primarily due to the costs of diesel fuel, maintenance, and repairs.

Conclusion

Based on the results of the study, the following conclusions were reached:

1 Kazakhmys Corporation's underground mines operate in challenging mining conditions characterized by significant depths (600–800 m), long haul distances (2,200 m on average), confined workings, and declining copper grades in the ore (0.5–0.6 %), which places increased demands on the reliability and performance of self-propelled equipment.

2 Kazakhmys's underground mine fleet comprises 229 units of equipment (119 mine trucks and 110 LHDs/loaders) with a total installed diesel engine capacity of over 65 MW. The largest share is made up of machines from Caterpillar, Epiroc, and Sandvik, all compliant with Tier 3 emissions standards.

3 The estimated total air supply requirement for diesel-powered fleets (with a 0.7 simultaneity factor) is 800–1200 m^3/s, placing a significant strain on the mine's ventilation infrastructure. Ventilation costs account for 2.4% of ore mining costs at the SZM. By switching to battery-powered equipment, the required air supply can be significantly reduced, as a trolley-powered electric truck requires only approximately 17% of the air volume required by its diesel counterpart [10].

4 Diesel-powered transport accounts for 17.2 % of ore mining costs, the largest share of all in-mine transport costs (58.1 % of the total). Total in-mine transport costs account for 29.6 % of mining costs, exceeding the share of mining operations.

5 The presence of the first battery-powered mining equipment – the Epiroc MT42 Battery and ST14 Battery – at the Zhomart mine marks the beginning of the practical testing of electric technologies. Field testing of these same models at the Kittilä mine (Finland) confirmed the complete elimination of gaseous and particulate air pollution in work areas during their operation [6], creating a scientifically sound basis for the planned transition of Kazakhmys mines to emission-free underground transport.

An analysis of the mining and technical operating conditions of self-propelled diesel equipment at Kazakhmys Corporation's underground mines has identified key issues within the mining transport subsystem. The significant contribution of diesel transport to ore extraction costs (17.2 %), the high need for ventilation to neutralize exhaust gases, and the objective trend of declining copper content in ore all contribute to the need for a technological transformation of in-mine transport.

Global experience documented in the scientific literature convincingly demonstrates the potential of converting underground mining transport to battery-electric traction. Paraszczak et al. [10] found that a trolley-powered electric truck requires only approximately 17 % of the air volume required by a diesel-powered equivalent of the same capacity, while ventilation costs can account for up to 40 % of a mine's total electricity consumption [11]. Field testing of Epiroc battery-powered vehicles at the Kittilä mine confirmed the complete elimination of gaseous and particulate pollutants in the atmosphere of work areas when using battery-powered vehicles, creating a realistic opportunity to reduce the required air supply [6]. In addition to the environmental benefits, the transition to electric traction improves working conditions for miners by reducing heat generation, noise, and vibration.

The obtained results provide a scientific and technical basis for developing a roadmap for the transition of Kazakhmys mines to electric mining equipment and can serve as a basis for subsequent feasibility studies. Further research should be focused on assessing possible underground transport electrification schemes, analyzing the infrastructure requirements for charging stations, and developing a methodology for calculating the economic impact of implementing battery-powered equipment at the Zhezkazgan deposit.

In our opinion, the phased transition of the process of transporting extracted ore to electric traction will make it possible to increase the overall energy efficiency of mining equipment and transport equipment and reduce the cost of diesel transport.

REFERENCES

1 **Сарсембаев, Д. Ж. Саргулжина, А. А., Сарсембаев, Н. Д., Бурабаев, К. А., Бектемисов, Е. С.** Применение вибромашин в условиях подземных рудников // Международные XXI Байконуровские чтения. – 2021. – С. 239–241.

2 **Сарсембаев, Д. Ж., Саргулжина, А. А.** Оценка значимости показателей транспортных машин // Международные XVIII Байконуровские чтения. – 2018. – С. 65–75.

3 **Имашев, А. Ж., Мусин, А. А., Нуршайыкова, Г. Т., Рабатұлы, М.** Применение кинематического анализа для оценки устойчивости откосов техногенных образований // Горный журнал Казахстана. – 2025. – № 7. – С. 40–45. – https://doi.org/10.48498/minmag.2025.243.7.006

4 **Бондаренко, А. А.** Определение условий и параметров перехода подземного рудника к самоходному погрузочно-доставочному оборудованию на базе электрического привода с автономным источником питания : дисс. на соиск. канд. техн. наук по 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная). – М. : 2022. – 171 с.

5 **Saleem, H. A.** Energy Consumption Reduction in Underground Mine Ventilation System : An Integrated Approach Using Mathematical and Machine Learning Models Toward Sustainable Mining // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – № 3. – 1038. – P. 1–34. – https://doi.org/10.3390/su17031038.

6 **Halim, A., Lööw, J., Johansson, J., Gustafsson, J.** Improvement of Working Conditions and Opinions of Mine Workers When Battery Electric Vehicles (BEVs) Are Used Instead of Diesel Machines // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2022. – Vol. 39. – № 2. – P. 301–316. – https://doi.org/10.1007/s42461-021-00506-8.

7 **Kuslap, E., Li, J., Talehatibieke, A., Hitch, M.** Battery Electric Vehicles in Underground Mining : Benefits, Challenges, and Safety Considerations // Energies. –2025. – Vol. 18. – № 14. – 3588. – P. 1–13. – https://doi.org/10.3390/en18143588.

8 **Иванцов, В. М., Ахпашев, Б. А.** Основы подземной разработки рудных месторождений. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2019. – 259 с.

9 **Рыльникова, М. В., Юн, А. Б., Терентьева, А. В.** Второе дыхание Жезказгана // Горная промышленность. – 2015. – № 3(121). – С. 32–34.

10 **Paraszczak, J., Svedlund, E., Fytas, K., Laflamme, M.** Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining // Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ). – 2014. – № 12. – P. 81–86. – https://doi.org/10.24084/repqj12.240.

11 **Jacobs, W., Hodkiewicz, M., Braunl, T. A.** Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – Vol. 51. – № 3. – P. 2565–2573. – https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2372046.

12 **Попов, М. Д.** Расчет воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловой депрессии в наклонных горных выработках : дисс. на соиск. канд. техн. наук по 2.8.6. – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика. – Пермь, 2024. – 165 с.

13 Правила обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы : утв. приказом Министра по инвестициям и развитию РК от 30 декабря 2014 года № 352 (с изм. и доп. по состоянию на 2024 г.). – Астана, 2024.

14 **Paraszczak, J., Fytas, K., Laflamme, M.** Feasibility of Using Electric Trucks in Deep Metal Mines // Mine Planning and Equipment Selection. – 2014. – P. 1265–1275. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_122.

15 **Голик, В. И.** Подземная разработка рудных месторождений. – М. : Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 212 с.

16 Санитарные правила «Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских поселениях, на территориях предприятий» : утв. приказом Министра здравоохранения РК от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-70. – Астана, 2022.

REFERENCES

1 **Sarsembayev, D. Zh., Sargulzhina, A. A., Sarsembayev, N. D., Burabayev, K. A., Bektemisov, Ye. S.** Primeneniye vibromashin v usloviyakh podzemnykh rudnikov [Application of vibrating machines in underground mining conditions] // Mezhdunarodnye XXI Bajkonurovskie chteniya. – 2021. – P. 239–241.

2 **Sarsembayev, D. Zh., Sargulzhina, A. A.** Otsenka znachimosti pokazateley transportnykh mashin [Assessment of the significance of transport vehicle indicators] // Mezhdunarodnye XVIII Bajkonurovskie chteniya. – 2018. – P. 65–75.

3 **Imashev, A. Zh., Musin, A. A., Nurshayykova, G. T., Rabatuly, M.** Primenenie kinematicheskogo analiza dlya ocenki ustojchivosti otkosov tekhnogennyh obrazovanij [Application of kinematic analysis to assess the slope stability of man-made formations.] Gornyj zhurnal Kazahstana. – Almaty. – 2025. – № 7. – P. 40–45. – https://doi.org/10.48498/minmag.2025.243.7.006

4 **Bondarenko, A. A.** Opredelenie uslovij i parametrov perekhoda podzemnogo rudnika k samohodnomu pogruzochno-dostavochnomu oborudovaniyu na baze elektricheskogo privoda s avtonomnym istochnikom pitaniya : diss. na soisk. kand. tekhn. nauk po 25.00.22 – Geotekhnologiya (podzemnaya, otkrytaya i stroitel'naya) [Definition of conditions and parameters for transitioning an underground mine to self-propelled load-haul-dump equipment based on an electric drive with an autonomous power source : Diss. for Ph.D. in Engineering (Specialty 25.00.22 – Geotechnology: underground, open-pit, and construction). – Moscow : 2022. – 171 p.

5 **Saleem, H. A.** Energy Consumption Reduction in Underground Mine Ventilation System : An Integrated Approach Using Mathematical and Machine Learning Models Toward Sustainable Mining // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – № 3. – 1038. – P. 1–34. – https://doi.org/10.3390/su17031038.

6 **Halim, A., Lööw, J., Johansson, J., Gustafsson, J.** Improvement of Working Conditions and Opinions of Mine Workers When Battery Electric Vehicles (BEVs) Are Used Instead of Diesel Machines // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2022. – Vol. 39. – № 2. – P. 301–316. – https://doi.org/10.1007/s42461-021-00506-8.

7 **Kuslap, E., Li, J., Talehatibieke, A., Hitch, M.** Battery Electric Vehicles in Underground Mining: Benefits, Challenges, and Safety Considerations // Energies. –2025. – Vol. 18. – № 14. – 3588. – P. 1–13. – https://doi.org/10.3390/en18143588.

8 **Ivantsov, V. M., Akhpashev, B. A.** Osnovy podzemnoj razrabotki rudnyh mestorozhdenij [Fundamentals of underground mining of ore deposits]. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2019. – 259 p.

9 **Rylnikova, M. V., Yun, A. B., Terentyeva, A. V.** Vtoroye dykhaniye Zhezkazgana [The second wind of Zhezkazgan] // Gornaya promyshlennost. – 2015. – № 3(121). – P. 32–34.

10 **Paraszczak, J., Svedlund, E., Fytas, K., Laflamme, M.** Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining // Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ). – 2014. – № 12. – P. 81–86. – https://doi.org/10.24084/repqj12.240.

11 **Jacobs, W., Hodkiewicz, M., Braunl, T. A.** Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – Vol. 51. – № 3. – P. 2565–2573. – https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2372046.

12 **Popov, M. D.** Opredelenie uslovij i parametrov perekhoda podzemnogo rudnika k samohodnomu pogruzochno-dostavochnomu oborudovaniyu na baze elektricheskogo

privoda s avtonomnym istochnikom pitaniya : diss. na soisk. kand. tekhn. nauk po 25.00.22 –Geotekhnologiya (podzemnaya, otkrytaya i stroitel'naya) [Calculation of airflow distribution in mine ventilation networks accounting for natural ventilation pressure in inclined workings : Diss. for Ph.D. in Engineering (Specialty 2.8.6. – Geomechanics, Rock Destruction, Mine Aerogasdynamics and Mining Thermophysics)] – Perm. – 2024. – 165 p.

13 Pravila obespecheniya promyshlennoy bezopasnosti dlya opasnykh proizvodstvennykh ob"yektov, vedushchikh gornyye i geologorazvedochnyye raboty [Rules for ensuring industrial safety for hazardous production facilities conducting mining and geological exploration work] : utv. prikazom Ministra po investitsiyam i razvitiyu RK ot 30 dekabrya 2014 goda № 352 (s izm. i dop. po sostoyaniyu na 2024 g.). – Astana. – 2024.

14 **Paraszczak, J., Fytas, K., Laflamme, M.** Feasibility of Using Electric Trucks in Deep Metal Mines // Mine Planning and Equipment Selection. – 2014. – P. 1265–1275. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_122.

15 **Golik, V. I.** Podzemnaya razrabotka rudnyh mestorozhdenij [Underground development of ore deposits]. – Moscow : Vologda : Infra-Engineering, 2022. – 212 p.

16 Sanitarnyye pravila «Gigiyenicheskiye normativy k atmosfernomu vozdukhu v gorodskikh i sel'skikh poseleniyakh, na territoriyakh predpriyatiy» [Sanitary rules Hygienic standards for atmospheric air in urban and rural settlements, in the territories of enterprises]: utv. prikazom Ministra zdravookhraneniya RK ot 2 avgusta 2022 goda № QR DSM-70. – Astana, 2022.

Received 31.05.26.
Received in revised form 09.07.26.
Accepted for publication 31.08.26.

Д. Ж. Сәрсембаев[1], Н. А. Данияров[2], *А. К. Келисбеков[3], А. А. Саргулжина[4]
[1,4]Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті,
Қазақстан Республикасы, Жезқазған қ.;
[2]ЖШС «Қазақмыс корпорациясының» персонал қызметінің корпоративтік университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
31.05.26 ж. баспаға түсті.
09.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕРЕҢ ШАХТАЛАРДАҒЫ ДИЗЕЛЬДІ ТАСЫМАЛДАУ ЖАБДЫҚТАРЫНЫҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Мақалада «Қазақмыс» корпорациясының жерасты кеніштерінде өздігінен жүретін дизельдік жабдықты (ӨЖДЖ) пайдаланудың тау-кен-техникалық

шарттарына кешенді талдау ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі кендегі пайдалы компоненттің құрамын төмендету және жұмыс тереңдігінің өсуі жағдайында тау-кен өндірісінің энергия тиімділігін арттыру қажеттілігіне байланысты. Зерттеу барысында жүк тиеу-жеткізу машиналарын, шахта самосвалдарын және жетекші әлемдік өндірушілердің (Caterpillar, Sandvik, Epiroc) алдыңғы тиегіштерін қамтитын машиналар паркін жүйелеу жүргізілді.

Қуаты 299-дан 522 кВт-қа дейінгі дизельді қозғалтқыштардың техникалық сипаттамаларының бөлінетін улы шығарындылар көлемімен және желдетуге тиісті шығындармен өзара байланысына ерекше назар аударылды. Кен өндіру өзіндік құнының құрылымындағы шахта ішілік көліктің үлесі 29,6 %-ға жететіні анықталды, бұл ретте дизельдік техниканы пайдалану осы шығыстардың жартысынан астамын (жалпы өзіндік құнының 17,2 %) өндіреді. Талдау көрсеткендей, Қазақстан Республикасында қабылданған Tier 3/Stage IIIA заманауи экологиялық стандарттары пайдаланылған газдарды сүйылту үшін таза ауаның едәуір көлемін беруді талап етеді, бұл желдету жүйелеріне жоғары жүктеме тудырады.

Жұмыс нәтижелері өндірістің дизелизациясының ағымдағы деңгейін сандық бағалауға және аккумуляторлық және гибридті техниканы қоса алғанда, тартудың баламалы түрлеріне көшудің экономикалық орындылығын негіздеуге мүмкіндік береді. Алынған деректер заманауи цифрлық технологияларды пайдалана отырып, ӨЖДЖ паркінің отын тиімділігін одан әрі математикалық модельдеу және оңтайландыру үшін іргетас ретінде қызмет етеді.

Кілтті сөздер: жерасты кеніші, өздігінен жүретін дизельді жабдық, «Қазақмыс» корпорациясы, тау-кен-техникалық шарттар, өндіру құны, шахталық желдету, зиянды заттардың эмиссиясы, энергия тиімділігі.

Д. Ж. Сәрсембаев[1], Н. А. Данияров[2], *А. К. Келисбеков[3], А. А. Саргулжина[4]
[1,4]Жезқазганский университет О. А. Байконурова,
Республика Казахстан, г. Жезқазган;
[2]Корпоративный университет Службы персонала ТОО «Корпорация Казахмыс»;
Республика Казахстан, г. Караганда;
[3]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 31.05.26.
Поступило с исправлениями 09.07.26.
Принято в печать 31.08.26.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

В данной статье представлен всесторонний анализ горнотехнических условий эксплуатации самоходного дизельного оборудования (СДО) на подземных рудниках корпорации «Казахмыс». Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности

горных работ в условиях снижения качества руды и увеличения глубины добычи полезных ископаемых. Исследование включало систематизацию парка погрузчиков, карьерных самосвалов и фронтальных погрузчиков ведущих мировых производителей (Caterpillar, Sandvik, Epiroc).

Особое внимание было уделено взаимосвязи между техническими характеристиками дизельных двигателей мощностью от 299 до 522 кВт и объемом производимых токсичных выбросов, а также связанными с этим затратами на вентиляцию. Установлено, что доля подземного транспорта в структуре затрат на добычу руды достигает 29,6 %, при этом более половины этих затрат приходится на эксплуатацию дизельной техники (17,2 % от общей стоимости). Анализ показал, что современные экологические стандарты Tier 3/Stage IIIA, принятые в Республике Казахстан, требуют подачи значительных объемов свежего воздуха для разбавления выхлопных газов, что создает большую нагрузку на системы вентиляции.

Результаты этого исследования позволяют количественно оценить текущий уровень использования дизельного топлива в производстве и обеспечивают основу для обоснования экономической целесообразности перехода на альтернативные силовые установки, включая аккумуляторные и гибридные технологии. Полученные данные служат основой для дальнейшего математического моделирования и оптимизации топливной экономичности парка самоходных дизельных транспортных средств с использованием современных цифровых технологий.

Ключевые слова: подземный рудник, самоходное дизельное оборудование, корпорация Казахмыс, горно-технические условия, производственные затраты, вентиляция шахты, выбросы вредных веществ, энергоэффективность.

МРНТИ 55.03.03

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/225-235

А. К. Тогусов[1], К. С. Кажибаев[2], Е. Ж. Жантлесов[3], М. Д. Алимжанов[4], *А. Б .Калиев[5]

[1]Департамент военного образования и науки Министерства обороны Республики Казахстан, Республика Казахстан, г. Астана;

[2,3]ТОО «Research & Development центр «Казахстан инжиниринг», Республика Казахстан, г. Астана;

[4,5]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5810-1940

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8447-6779

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7209-5844

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

*e-mail: adilbekk@mail.ru

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА БРОНЕТЕХНИКИ ОТ БПЛА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье рассматриваются вопросы расчета и анализа несущей способности конструкции защитного устройства бронетанкового вооружения и техники от воздействия беспилотных летательных аппаратов при динамическом нагружении. Актуальность исследования обусловлена широким применением БПЛА в современных боевых условиях и необходимостью разработки эффективных средств защиты бронетанковой техники. В качестве объекта исследования выбрана конструкция защитного устройства, состоящая из вертикальных и горизонтальных несущих элементов, соединённых шарнирно-штыревыми узлами. Для оценки прочности и жесткости конструкции использован метод компьютерного моделирования в программном комплексе SolidWorks Simulation. Разработана пространственная 3D-модель конструкции, позволяющая определить напряженно-деформированное состояние при действии гармонической динамической нагрузки. В работе выполнен анализ эквивалентных напряжений по Мизесу и перемещений узлов конструкции во времени. Полученные результаты показали, что максимальные эквивалентные напряжения не превышают допускаемых значений для стали Ст3, а возникающие деформации находятся в пределах нормативных требований. Установлено, что конструкция обладает достаточным запасом прочности и жесткости, а характер динамического отклика свидетельствует об отсутствии резонансных явлений. Разработанное защитное устройство может быть рекомендовано для практического применения в целях повышения защищенности бронетанкового вооружения и техники от поражающих воздействий БПЛА.

Ключевые слова: защитное устройство, беспилотные летательные аппараты, бронетанковая техника, компьютерное моделирование, динамическое нагружение, напряженно-деформированное состояние, SolidWorks Simulation, прочность конструкции.

Введение

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) против бронетанкового вооружения и техники (БТВТ) требует совершенствования существующих и разработки новых конструкций защитных устройств. Их расчёты и анализ обычно проводят численным методом с помощью программного обеспечения. В работе [1] рассмотрено теоретическое обоснование расчётной схемы защитного устройства БТВТ. Осуществлен расчёт основных элементов при статическом нагружении узлов конструкции. Разработан и получен патент на полезную модель подобного защитного устройства [2]. Новизна конструкции заключается в том, что вертикальные и горизонтальные стержни соединены в узлах с помощью втулочно-штыревых шарниров, нижние выступы которых соединяют вертикальные и горизонтальные стержни, а верхние выступы закрепляют сетку-рабицу, что, в свою очередь, позволяет сократить время на выполнение сборки, разборки, закрепления сетки-рабицы и замены поврежденных элементов конструкции в военно-полевых условиях.

В рассматриваемой расчетной схеме основными несущими элементами защитного устройства являются вертикальные и горизонтальные стержни. Полученные предварительные данные расчёта на прочность вертикальных и горизонтальных элементов на сжатие и изгиб при статическом нагружении показали, что требования к несущей способности защитного устройства выполняются [1; 3].

В работе, на основе вышеизложенного, рассматриваются расчёт и анализ несущей способности конструкции защитного устройства в целом при действии динамических нагрузок. Расчёты проведены численным методом с использованием программного комплекса SolidWorks Simulation [4; 5; 6; 7; 8; 9]. В боевых условиях, в случае попадания на защищаемый объект и подрыва боевого заряда БПЛА, энергия взрыва передается на несущие элементы защитного устройства.

Расчётная схема защитного устройства приведена на рисунке 1 (сетка «рабица», накрывающая конструкцию, условно не показана).

Материалы и методы

Учитывая сложность задачи, при моделировании приняты следующие общепринятые упрощающие допущения [3]:

– несущие элементы конструкции являются упруго-деформируемыми;

– динамические нагрузки приложены в узлах конструкции;

– распределённые нагрузки равномерно действуют по всей длине горизонтальных элементов.

Размеры элементов и узлы конструкции пронумерованы и показаны, как на рисунке 1.

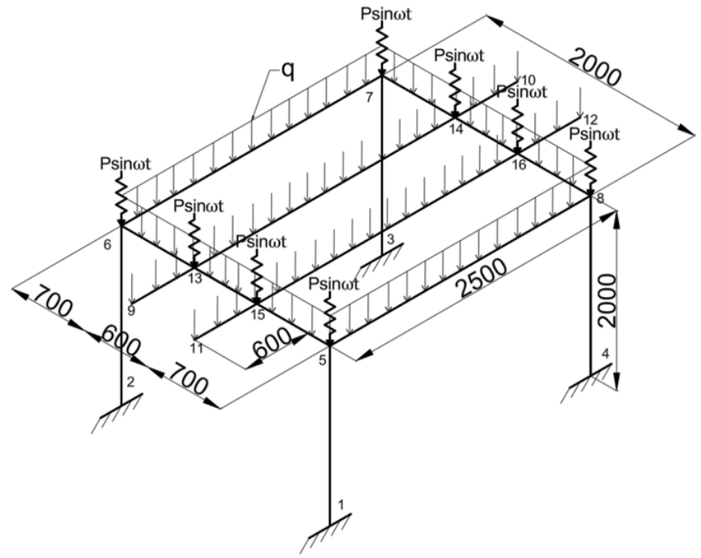


Рисунок 1 – Расчётная схема защитного устройства

Исходные данные выбраны на основании аналитического исследования напряженно-деформированного состояния конструкции общепринятыми методами [10; 11; 12] и представлены в следующем виде:

– вертикальные горизонтальные элементы выполнены в виде равнобоких уголков 8х8 см; материал уголков сталь Ст.3; допускаемое напряжение [σ]=160 МПа; модуль упругости материала E=2 ·10^4 кН/см^2; площадь поперечного сечения уголка A=108 см^2; момент инерции сечения уголка I_x=65,3 см^4; радиус инерции сечения уголка ix=2,45 см^4; гибкость вертикального стержня $\lambda = \frac{\mu L}{i_x}$„ где μ – коэффициент приведенной длины (μ =0,7), L – длина элемента;

– распределенная нагрузка имеет интенсивность q=10 кН/м;

– динамическая нагрузка Psinωt задана виде периодической функции и рассматривается, как наиболее неблагоприятный случай силового воздействия на узлы конструкции, и соответствует общепринятым подходам в динамических исследованиях [11]. Принимаем, что P=2кН; круговая частота ω=20^{-1}; время t=(0÷5)с.

Допускаемые значения относительных перемещений и напряжений, исходя из расчетных соображений, выбраны, соответственно, в пределах: [ε]=50; [σ]=250 МПа.

Динамическая нагрузка приложена в узлах конструкции, как показано на рисунке 1.

На основании принятых исходных данных для расчётной схемы разработана 3D-модель защитного устройства.

Постановка задачи. Используя программный комплекс SolidWorks Simulation необходимо получить характеристики напряженно-деформируемого состояния, возникающего в конструкции защитного устройства. Результаты расчёта представить в двух решениях, как:

– определение перемещений вследствие деформаций в узлах конструкции при действии динамических нагрузок;

– определение эквивалентных напряжений в узлах конструкции при действии динамических нагрузок.

Провести анализ полученных результатов.

Применяемый программный комплекс SolidWorks Simulation [4] позволяет оценить жёсткость и прочность конструкции под действием различных нагрузок, в том числе динамических, как в рассматриваемом случае. Последовательно соблюдая все этапы моделирования, создана 3D-модель конструкции. К основным характеристикам расчетной сетки относятся: типы элементов – пластинчатые треугольные; число элементов – 239770; тип сетки – сплошная; качество сетки – высокое; условия закрепления – фиксированная геометрия нижних концов стоек; моделирование соединений – болтовые и сварные.

Результаты и обсуждение

Исследования проведены в широком диапазоне изменения переменных параметров.

На рисунке 2 представлены результаты анализа напряжений конструкции (Von Mises).

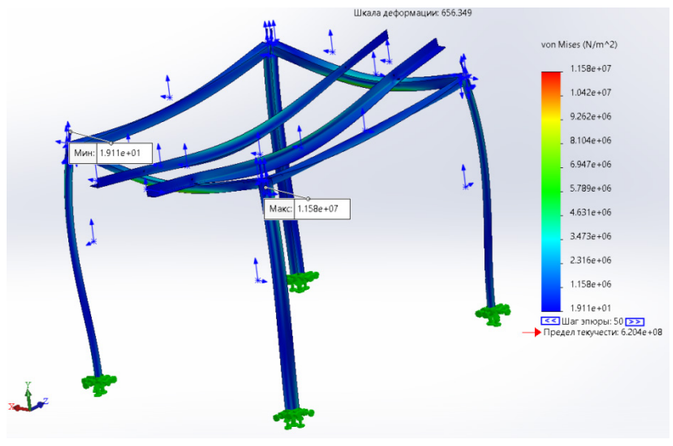


Рисунок 2 – Результаты анализа напряжений конструкции (Von Mises)

Максимальное эквивалентное напряжение составляет: $\sigma_{max} = 1.158 \times 10^7 \text{Н/м}^2$.

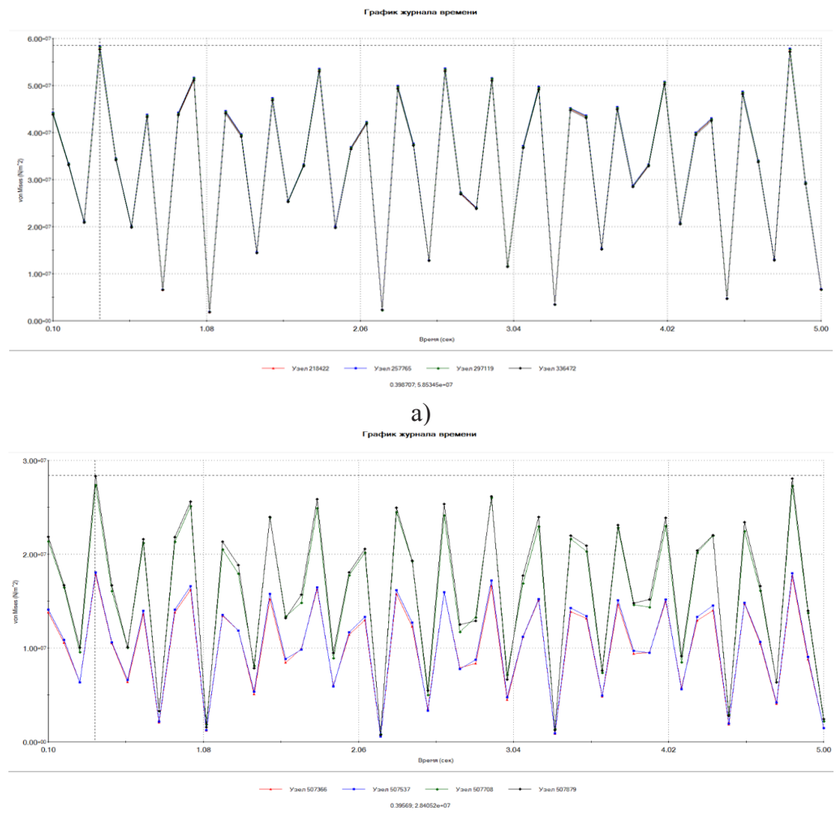
Предел текучести материала (сталь Ст3): $\sigma_t = 6.204 \times 10^8 \text{Н/м}^2$

Анализ показывает, что возникающие в конструкции напряжения значительно ниже предела текучести материала. Это свидетельствует о достаточном значении

коэффициента запаса прочности конструкции при заданных нагрузках. На рисунке 3 представлены графики изменения эквивалентных напряжений по Мизесу для узлов конструкции во времени.

Для узлов 5, 6, 7, 8: максимальное значение эквивалентных напряжений достигает порядка $\sigma = 5.85 \times 10^7 \text{Па}$. Для узлов 13, 14, 15, 16: максимальное значение эквивалентных составляет около $\sigma = 2.84 \times 10^7 \text{Па}$.

Во всех рассматриваемых узлах наблюдаются синхронные высокочастотные колебания напряжений. Это указывает на то, что данные элементы находятся в зоне интенсивного динамического воздействия, обусловленного гармонической нагрузкой. При этом характер колебаний свидетельствует об устойчивом динамическом отклике элементов защитного устройства без признаков резонансного режима.



а – для узлов 5, 6, 7, 8; б – для узлов 13, 14, 15, 16

Рисунок 3 – Графики изменения эквивалентных напряжений во времени

На рисунке 4 показаны результаты расчёта деформаций конструкции.

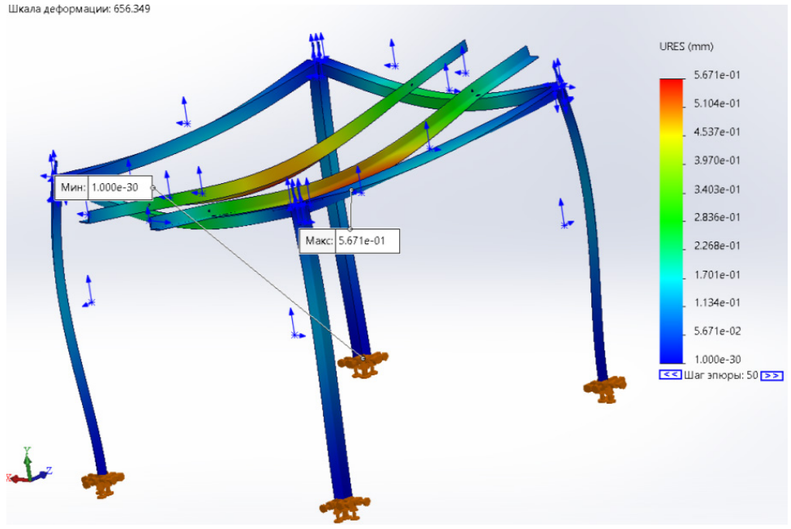


Рисунок 4 – Результаты расчёта деформаций конструкции (URES)

Параметр URES характеризует абсолютное перемещение элементов конструкции в миллиметрах.

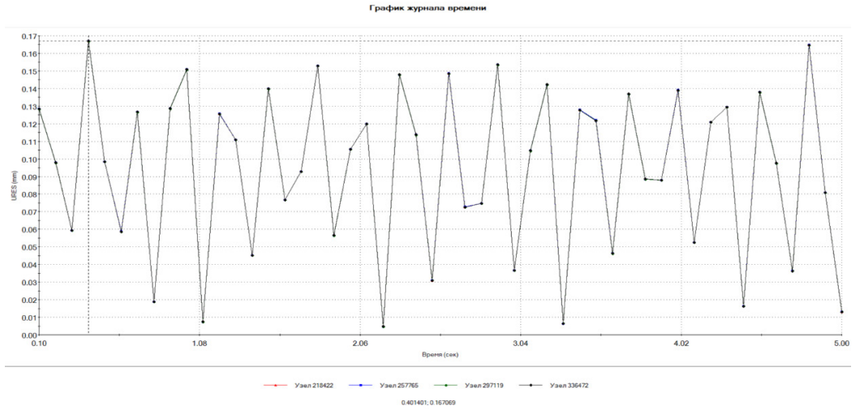
Максимальное перемещение составляет: $U_{max} = 5.671 \times 10^{-1}$мм.

Минимальное перемещение: $U_{min} = 1.000 \times 10^{-30}$мм.

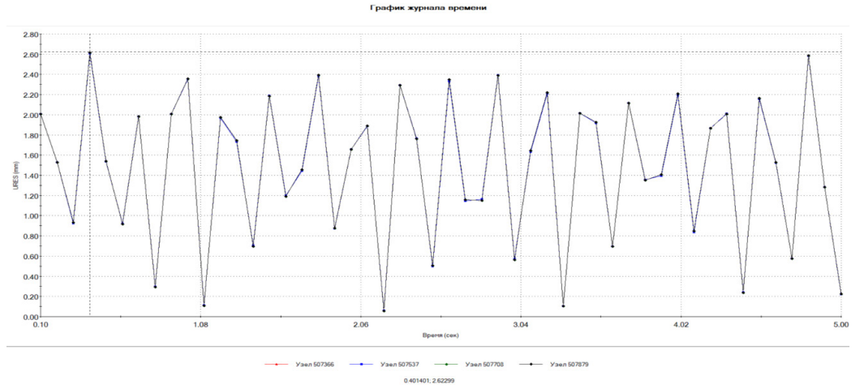
Данные цветовой шкалы показывают, что наибольшие деформации локализуются в наиболее нагруженных участках конструкции, в то время, как основная часть элементов работает в упругой области. Общий уровень деформаций является незначительным, что подтверждает достаточную жесткость конструкции. На рисунке 5 представлены графики изменения перемещений узлов конструкции во времени.

Для узлов 5, 6, 7, 8: максимальное перемещение достигает около 0.17 мм.

Для узлов 13, 14, 15, 16: максимальное перемещение составляет около 2.62 мм.



а)



б)

а – для узлов 5, 6, 7, 8; б – для узлов 13, 14, 15, 16

Рисунок 5 – Графики изменения перемещений узлов конструкции во времени

Во всех узлах наблюдаются синхронные высокочастотные колебания перемещений. Характер изменения перемещений во времени указывает на наличие интенсивного динамического воздействия, вызывающего отклик системы. При этом амплитуды перемещений остаются в допустимых пределах. Достоверность полученных результатов подтверждается методикой применяемого программного комплекса SolidWorks Simulation.

Выводы

1. Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу для узлов конструкции составляет 1.158×10^{7}Н/м^2, что ниже предела текучести материала (сталь Ст3) 6.204×10^{8} Н/м^2.

2. Анализ напряжений показал, что в наиболее нагруженных узлах конструкции (5÷8) максимальные значения достигают порядка 5.85×10^{7}Па, а в

узлах (13÷16) - 2.84×10^7Па, что также не превышает допускаемого напряжения для стали Ст3, принимаемого по условию прочности $[\sigma] \approx 2.0 \times 10^8$Па (с учётом коэффициента запаса).

3. Максимальные перемещения в горизонтальных элементах конструкции составляют 5.671×10^{-1} мм. При этом в узлах (5÷8) амплитуда перемещений не превышает 0.17 мм, а в узлах (13÷16) - 2.62 мм. Указанные значения деформаций находятся в допустимых пределах.

Разработанная конструкция защитного устройства отвечает требованиям прочности и жесткости и может быть рекомендована для практического применения защиты БТВТ от БПЛА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Макаров, А. П., Литвиненко, В. И., Ногинов, Ю. В.** Борьба с беспилотными летательными аппаратами. Учебное пособие. – М. : КиоРус, 2025. – 140 с.

2 **Тогусов, А. К., Курмангажинов, Т. А., Сеитов, Е. С. и др.** Устройство для защиты бронетанкового вооружения и техники от беспилотных летательных аппаратов. // Патент на полезную модель РК №11689, 23.01.2026.

3 **Макаренко, С. И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам : монография / С. И. Макаренко. – Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2020. – 204 с.

4 **Shix, R.** Engineering Graphics with SOLIDWORKS 2024. – Mission, KS: SDC Publications, 2024. – 728 p.

5 **Borvik, T., Hopperstad, O.S., Berstad, T., Langseth, M.** A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration // European Journal of Mechanics A/Solids. – 2001. – Vol. 20. – № 5. – P. 685–712. – https://doi.org/10.1016/S0997-7538(01)01157-3

6 **Nurick, G. N., Shave, G. C.** The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – Vol. 38. – P. 99–116.

7 **Almohandes, A. A., Abdel-Khalik, S. I.** Ballistic resistance of steel plates // International Journal of Impact Engineering. – 2005. – Vol. 31. – P. 103–117.

8 **Hazell, P. J.** Armour: Materials, Theory and Design. - Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2015. – 395 p. – https://doi.org/10.1201/b18683

9 **Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J.** Concepts and Applications of Finite Element Analysis. – New York : Wiley. – 2002. – 719 p.

10 **Дарков, А. В.** Сопротивление материалов: учеб. для техн. вузов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1989. – 624 с.

11 **Тимошенко, С. П., Гере, Дж.** Механика материалов. – СПб. : Лань, 2002 – 672 с.

12 **Hibbeler, R. C.** Mechanics of Materials. - Boston: Pearson, 2017. – 901 p.

REFERENCES

1 **Makarov, A. P., Litvinenko, V. I., Noginov, Yu. V.** Borba s bespilotnymi letatelnymi apparatami. Uchebnoe posobie [Fight against unmanned aerial vehicles. Training manual]. – Moscow : KioRus. – 2025. – 140 p.

2 **Togusov, A. K., Kurmangazhinov, T. A., Seitov, E. S. and oth.** Ustrojstvo dlya zashhity bronetankovogo vooruzheniya i texniki ot bespilotnyx letatelnyx apparatov [A device for protecting armored weapons and equipment from unmanned aerial vehicles]. // Utility model patent RK №11689, 23.01.2026.

3 **Makarenko, S. I.** Protivodejstvie bespilotnym letatelnym apparatam: monografiya [Countering unmanned aerial vehicles: a monograph] / S. I. Makarenko. – Sankt-Peterburg : Naukoemkie texnologii, 2020. – 204 p.

4 **Shix, R.** Engineering Graphics with SOLIDWORKS. – 2024. – Mission, KS: SDC Publications. – 2024. – 728 p.

5 **Borvik, T., Hopperstad, O. S., Berstad, T., Langseth, M.** A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration // European Journal of Mechanics A/Solids. – 2001. – Vol. 20. – № 5. – P. 685–712. – https://doi.org/10.1016/S0997-7538(01)01157-3

6 **Nurick, G. N., Shave, G. C.** The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – Vol. 38. – P. 99–116.

7 **Almohandes, A. A., Abdel-Khalik, S. I.** Ballistic resistance of steel plates // International Journal of Impact Engineering. – 2005. – Vol. 31. – P. 103–117.

8 **Hazell, P. J.** Armour: Materials, Theory and Design. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015. – 395 p. – https://doi.org/10.1201/b18683

9 **Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J.** Concepts and Applications of Finite Element Analysis. – New York : Wiley. – 2002. – 719 p.

10 **Darkov, A. V.** Soprotivlenie materialov: ucheb. dlya texn. vuzov [Resistance of materials: studies. for techs. universities] / A. V. Darkov, G. S. Shpiro. – 5-e izd., pererab. i dop. – Moscow : Vyssh. shk., 1989. – 624 p.

11 **Timoshenko, S. P., Gere, J.** Mechanika materialov [Mechanics of Materials]. – Saint-Petersburg: Lan. – 2002. – 672 p.

12 **Hibbeler, R. C.** Mechanics of Materials. – Boston : Pearson, 2017. – 901 p.

Поступило в редакцию 16.05.26.
Поступило с исправлениями 15.06.26.
Принято в печать 01.09.26.

А. Қ. Тогусов[1], Қ. С. Қажыбаев[2], Е. Ж. Жантлесов[3],
М. Д. Әлімжанов[4], *Ә. Б. Қалиев[5]
[1]Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігінің әскери білім және ғылым департаменті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2,3]«Қазақстан инжиниринг» Research & Development орталығы» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[4,5]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
16.05.26 ж. баспаға түсті.
15.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
01.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ БРОНДАЛҒАН КӨЛІКТЕРІНІҢ ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРДАН ҚОРҒАНЫС ҚҰРЫЛҒЫСЫНЫҢ КОНСТРУКЦИЯСЫН ЕСЕПТЕУ

Мақалада пилотсыз ұшу аппараттарының әсерінен бронды қару-жарақ пен техниканы қорғауға арналған құрылғы конструкциясының динамикалық жүктеме кезіндегі көтергіш қабілетін есептеу және талдау мәселелері қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі қазіргі әскери жағдайда пилотсыз ұшу аппараттарының кеңінен қолданылуымен және бронды техниканы қорғаудың тиімді құралдарын әзірлеу қажеттілігімен түсіндіріледі. Зерттеу нысаны ретінде тік және көлденең көтергіш элементтерден тұратын, топсалы-штифті түйіндер арқылы байланысқан қорғаныс құрылғысының конструкциясы қабылданды. Конструкцияның беріктігі мен қаттылығын бағалау үшін SolidWorks Simulation бағдарламалық кешенінде компьютерлік модельдеу әдісі қолданылды. Гармониялық динамикалық жүктеме әсеріндегі кернеулі-деформацияланған күйді анықтауға мүмкіндік беретін кеңістіктік 3D-модель жасалды. Жұмыста Мизес бойынша эквивалентті кернеулер мен түйіндердің уақыт бойынша орын ауыстырулары талданды. Алынған нәтижелер бойынша максималды эквивалентті кернеулер Ст3 болаты үшін рұқсат етілген мәндерден аспайтыны, ал деформациялардың нормативтік талаптар шегінде екені анықталды. Сонымен қатар, конструкцияның жеткілікті беріктік және қаттылық қоры бар екені, ал динамикалық жауап сипаттамасы резонанстық құбылыстардың жоқтығын көрсететіні дәлелденді. Ұсынылған қорғаныс құрылғысы бронды қару-жарақ пен техниканы пилотсыз ұшу аппараттарының зақымдаушы әсерінен қорғауда тәжірибелік қолдануға ұсынылады.

Кілтті сөздер: қорғаныс құрылғысы, пилотсыз ұшу аппараттары, бронды техника, компьютерлік модельдеу, динамикалық жүктеме, кернеулі-деформацияланған күй, SolidWorks Simulation, конструкция беріктігі.

A. K. Togusov[1], K. S. Kazhibayev[2], E. Zh. Zhantlesov[3],
M. D. Alimzhanov[4], *A. B. Kaliyev[5]
[1]Department of Military Education and Science of the Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan, Astana;
[2,3]«Research&Development Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Republic of Kazakhstan, Astana;
[4,5]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 16.05.26.
Received in revised form 15.06.26.
Accepted for publication 01.09.26.

CALCULATION OF THE DESIGN OF THE PROTECTIVE DEVICE OF ARMORED VEHICLES FROM UAVS BASED ON COMPUTER MODELING

The article considers the calculation and analysis of the load-bearing capacity of a protective device structure for armored weapons and military equipment under dynamic loading caused by unmanned aerial vehicles (UAVs). The relevance of the study is associated with the widespread use of UAVs in modern combat conditions and the need to develop effective protection systems for armored vehicles. The object of the study is a protective structure consisting of vertical and horizontal load-bearing elements connected by hinged-pin joints. To evaluate the strength and stiffness of the structure, the computer simulation method implemented in the SolidWorks Simulation software package was used. A three-dimensional model of the structure was developed to determine the stress-strain state under harmonic dynamic loading. The study includes an analysis of equivalent von Mises stresses and nodal displacements over time. The obtained results showed that the maximum equivalent stresses do not exceed the allowable values for St3 steel, while the resulting deformations remain within acceptable limits. It was established that the structure possesses a sufficient safety margin and stiffness, and the nature of the dynamic response indicates the absence of resonance phenomena. The developed protective device can be recommended for practical application to improve the protection of armored weapons and military equipment against the damaging effects of unmanned aerial vehicles.

Keywords: protective device, unmanned aerial vehicles, armored vehicles, computer simulation, dynamic loading, stress-strain state, SolidWorks Simulation, structural strength.

МРНТИ 55.29.31

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/236-249

***М. Т. Төреханова[1], К. К. Комбаев[2], Г. Б. Тлеужанова[3], А. С. Уркунбай[4], А. С. Қизатов[5]**

[1,2,3,4,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9993-4037

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0032-8924

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7868-2393

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

*e-mail: MTorehanova@edu.ektu.kz

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ СПЛАВА Д16

В работе экспериментально исследовано изменение шероховатости поверхности при различных сочетаниях режимов резания и параметров режущего инструмента в процессе токарной обработки цилиндрических деталей из алюминиевого сплава Д16 на станке с ЧПУ. В качестве варьируемых параметров рассматривались радиус при вершине инструмента, скорость резания, подача, глубина резания и смещение инструмента. Эксперимент включал девять сочетаний исследуемых технологических параметров, сформированных в соответствии с принятой экспериментальной матрицей. Шероховатость обработанной поверхности оценивали по параметру Ra методом бесконтактной интерференционной 3D-профилографии.

В исследованном диапазоне технологических параметров значения шероховатости Ra составили 2,287–3,564 мкм. Наименьшее значение Ra = 2,287 мкм получено в эксперименте № 7 при радиусе вершины инструмента 0,8 мм, скорости резания 100 м/мин, подаче 0,25 мм/об, глубине резания 0,8 мм и смещении инструмента +0,5 мм. Полученные экспериментальные данные характеризуют различия в шероховатости поверхности при различных сочетаниях исследуемых технологических параметров.

Сочетание параметров, обеспечившее минимальное значение Ra среди девяти исследованных режимов, может рассматриваться как рациональное в пределах выполненного эксперимента. Полученные результаты представляют практический интерес при выборе технологических параметров токарной обработки цилиндрических деталей из сплава Д16 на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, токарная обработка, сплав Д16, режимы резания, параметры инструмента, станок с ЧПУ, экспериментальная матрица, 3D-профилография.

Введение

Станки с числовым программным управлением широко применяются в современном машиностроении. При токарной обработке алюминиевых сплавов они обеспечивают повторяемую геометрию деталей и позволяют автоматизировать процесс. Однако рост требований к качеству поверхности и точности размеров вынуждает технологов более тщательно подходить к выбору режимов резания. Как показывают исследования, выбор условий обработки влияет на качество получаемой поверхности и эффективность технологического процесса [1].

Широкое использование CAD/CAM-систем, в частности Mastercam, заметно упростило подготовку обработки. Автоматическая генерация траекторий, встроенная симуляция и снижение риска ошибок программирования позволяют быстрее получать рабочие программы и сокращать время технологической подготовки [2].

Износ режущего инструмента существенно влияет на стабильность токарного процесса. По мере его развития растут силы резания, нарушается стружкообразование, а на поверхности детали появляются более выраженные неровности. Кроме того, износ вызывает постепенное смещение режущей кромки относительно заготовки, что приводит к отклонениям по размерам. Поэтому контроль состояния инструмента во время обработки позволяет своевременно вводить необходимые коррекции и снижать вероятность получения бракованных деталей [3].

Точность начальной наладки инструмента также напрямую сказывается на результате. Ошибки в позиционировании, неверный учёт геометрии инструмента и отсутствие коррекции на износ приводят к систематическим отклонениям формы и размеров детали. Современные измерительные системы помогают уменьшить эти погрешности, однако полностью исключить влияние наладки на качество поверхности пока не удаётся [4; 5].

При обработке сплава Д16 дополнительную проблему создаёт его склонность к налипанию на режущую кромку и образованию нароста. Это явление особенно сильно проявляется при неоптимальных сочетаниях режимов и может ухудшать качество обработанной поверхности и ускорять износ инструмента. В настоящей работе износ режущего инструмента и размерная точность деталей непосредственно не оценивались. В связи с этим в данной работе исследовано влияние режимов резания и параметров режущего инструмента на шероховатость поверхности Ra при токарной обработке сплава Д16 на станке с ЧПУ.

Полученные результаты позволяют сопоставить шероховатость поверхности при исследованных сочетаниях технологических параметров и определить режим, обеспечивший минимальное значение Ra в пределах выполненного эксперимента [6; 7].

Материалы и методы

Экспериментальная часть работы выполнялась в лаборатории цифрового машиностроения Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева (ВКТУ), ориентированной на разработку современных подходов

к проектированию и изготовлению прецизионных деталей [8]. Объектами исследования служили цилиндрические поверхности деталей из алюминиевого сплава Д16, обработанные при различных сочетаниях технологических параметров. Проектирование экспериментальных деталей и подготовка управляющих программ осуществлялись с использованием CAD/CAM-технологий [9], обеспечивающих построение трёхмерной геометрической модели, автоматическую генерацию траекторий движения режущего инструмента и подготовку управляющей программы для станка с числовым программным управлением (ЧПУ), рисунок 1.

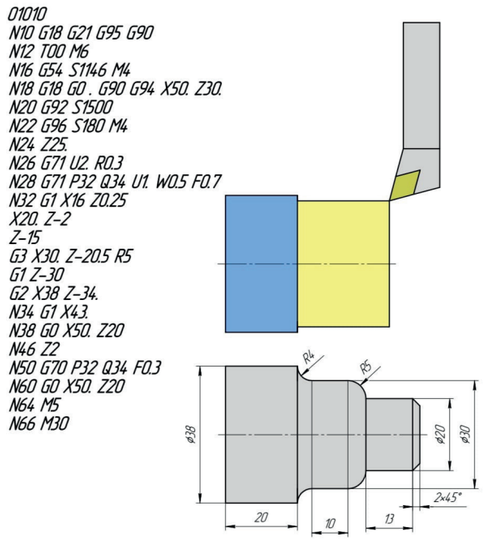


Рисунок 1 – CAD/CAM моделирование детали для обработки на станке с ЧПУ

В ходе эксперимента выполнялась токарная обработка цилиндрических поверхностей при девяти сочетаниях технологических параметров, сформированных в соответствии с принятой экспериментальной матрицей. В качестве исследуемых параметров рассматривались радиус при вершине инструмента Rd, скорость резания V, подача F, глубина резания Ap и смещение инструмента H. Основным количественно оцениваемым показателем качества обработанной поверхности являлась шероховатость Ra [10].

В качестве материала заготовок использовался деформируемый алюминиевый сплав Д16 (таблица 1), относящийся к конструкционным лёгким сплавам. Он сочетает высокую прочность и низкую плотность, благодаря чему широко применяется в машиностроении при изготовлении различных деталей и элементов конструкций [11]. Сплав Д16 также характеризуется обрабатываемостью резанием, позволяющей применять его для изготовления деталей на станках с ЧПУ [12].

Токарная обработка сплава Д16 может сопровождаться адгезией обрабатываемого материала к инструменту и образованием нароста на режущей кромке, что при неблагоприятных условиях способно ухудшать качество обработанной поверхности [11;12]. Геометрия и положение режущей кромки также относятся к параметрам, влияющим на формирование микрорельефа поверхности при точении [13;14]. В настоящей работе состояние режущей кромки, силы резания и размерная точность деталей непосредственно не оценивались; экспериментальное исследование было ограничено определением шероховатости Ra при девяти заданных сочетаниях технологических параметров.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевого сплава Д16 по ГОСТ 4784-97

Элемент	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Прочие
Содержание	Основа	3.8–4.9	1.2–1.8	0.3–0.9	≤0.5	≤0.5	≤0.3	≤0.15	≤0.15

Примечание — Химический состав указан в массовых процентах (мас. %).

Механическую обработку выполняли на токарном станке с ЧПУ CTX 510 ecoline (DMG MORI) с системой управления SIEMENS, рисунок 2. Станок имеет следующие основные характеристики:

– максимальный диаметр точения – 465 мм;

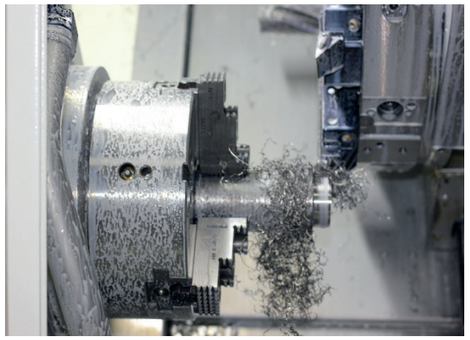
– максимальная длина обработки в центрах – 1050 мм;

– максимальный диаметр патрона – 315 мм;

– максимальный внутренний диаметр зажимной втулки – 90 мм и скорость ускоренных перемещений до 30 м/мин.

Оборудование позволяет выполнять обработку наружных и внутренних цилиндрических, конических и фасонных поверхностей, а также торцов и резьбы. Револьверная головка с сервоприводом и высокостабильные линейные направляющие обеспечивают высокую повторяемость результатов и позволяют воспроизводимо выполнять сложные траектории инструмента [15].

Процесс изготовления экспериментальных деталей включал разработку CAD-моделей, формирование технологических маршрутов, программирование операций в CAM-системе, наладку инструмента с вводом коррекций, токарную обработку и последующий контроль шероховатости обработанных поверхностей методом бесконтактной интерференционной 3D-профилографии. Экспериментальные исследования проводили при токарной обработке трёх цилиндрических поверхностей на каждой детали при режимах, заданных принятой экспериментальной матрицей.



а) процесс обработки



б) стойка панели управления

Рисунок 2 – Токарная обработка на станке
с ЧПУ CTX 510 ecoline (DMG MORI)

В качестве варьируемых параметров рассматривались радиус при вершине инструмента (Rd), скорость резания (V), подача (F), глубина резания (Ap) и смещение инструмента (H), а выходным параметром служила шероховатость поверхности Ra. При представлении результатов на графике основное внимание уделялось скорости резания V и подаче F, позволяющим наглядно сопоставить исследованные режимы с полученными значениями Ra. Полные сочетания параметров каждого режима, включая Rd, Ap и H, приведены в таблице 2 и учитывались при интерпретации результатов.

Стабильность процесса точения и качество формируемой поверхности в значительной степени определяются выбранным сочетанием технологических параметров обработки. Для прецизионных деталей особенно важно обеспечить устойчивые условия резания, позволяющие минимизировать шероховатость обработанной поверхности [16].

Для измерения шероховатости Ra обработанных поверхностей использовался бесконтактный интерференционный 3D-профилограф «Micron-alpha». Метод основан на восстановлении микрорельефа поверхности с микрометровой точностью

и позволяет получать двумерные профили и трёхмерные изображения поверхности. Помимо численного значения Ra, полученные данные позволяют оценивать распределение выступов и впадин на исследуемом участке. Бесконтактный характер измерений исключает непосредственное механическое воздействие измерительного зонда на исследуемую поверхность. Для сравнительной оценки шероховатости поверхности при различных режимах резания использовалась экспериментальная матрица, включавшая девять сочетаний исследуемых технологических параметров. Выполнение девяти экспериментов позволило сопоставить полученные значения Ra при ограниченном числе испытаний [17].

В качестве управляемых параметров были выбраны радиус при вершине инструмента Rd, скорость резания V, подача F, глубина резания Ap и смещение инструмента H. В экспериментальной матрице данные параметры были обозначены буквами A–E и принимали следующие значения [18]:

A (Rd) – радиус при вершине инструмента, мм: уровень 1 – 0,4; уровень 2 – 0,8;

B (V) – скорость резания, м/мин: уровень 1 – 100; уровень 2 – 150; уровень 3 – 225;

C (F) – подача, мм/об: уровень 1 – 0,15; уровень 2 – 0,25; уровень 3 – 0,35;

D (Ap) – глубина резания, мм: уровень 1 – 0,8; уровень 2 – 1,3; уровень 3 – 2,0;

E (H) – смещение инструмента, мм: уровень 1 – -0,5; уровень 2 – 0,0; уровень 3 – +0,5.

Каждый параметр принимал заданные значения в соответствии с принятой экспериментальной матрицей, что позволило сопоставить значения Ra для девяти исследованных сочетаний технологических параметров.

После выполнения каждого опыта проводились измерения шероховатости Ra на цилиндрических поверхностях с использованием бесконтактного интерференционного 3D-профилографа «Micron-alpha», таблица 2. Значения шероховатости были измерены для всех девяти экспериментальных режимов, что позволило сопоставить шероховатость поверхности при различных сочетаниях исследуемых технологических параметров и определить режим с минимальным экспериментальным значением Ra.

Таблица 2 – Экспериментальная матрица и режимы токарной обработки цилиндрических поверхностей с результатами измерения Ra.

Экспериментальная матрица						Параметры испытаний					
Exp. №	A	B	C	D	E	Rd, (mm)	V, (m/min)	F, (mm/rev)	Ap, (mm)	H, (mm)	Ra, (μm)
1	1	1	2	3	1	0.4	100	0.25	2	-0.5	2.834
2	1	2	3	1	2	0.4	150	0.35	0.8	0.0	3.021
3	1	3	1	2	3	0.4	225	0.15	1.3	+0,5	3.165
4	1	1	2	3	2	0.4	100	0.25	2	0.0	2.925
5	1	2	3	1	3	0.4	150	0.35	0.8	+0.5	3.078
6	1	3	1	2	1	0.4	225	0.15	1.3	-0.5	2.589
7	2	1	2	1	3	0.8	100	0.25	0.8	+0.5	2.287
8	2	2	3	2	1	0.8	150	0.35	1.3	-0.5	3.114
9	2	3	1	3	2	0.8	225	0.15	2	0.0	3.564

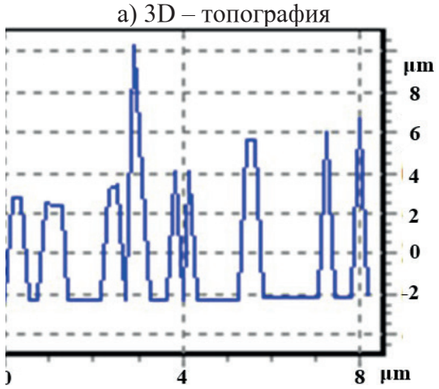
Наименьшая шероховатость Ra = 2,287 мкм получена в опыте №7, поэтому данное сочетание параметров далее рассматривается как рациональное среди девяти исследованных режимов.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 показаны результаты обработки при режиме №7. Трёхмерная топографическая карта поверхности (рис. 3а), построенная по данным интерференционного 3D-профилографа, демонстрирует достаточно равномерное распределение микронеровностей без резких перепадов высоты и заметных дефектов. Это указывает на стабильное протекание процесса резания. Профиль шероховатости по образующей цилиндра (рис. 3б) также подтверждает умеренную амплитуду неровностей. Амплитуда неровностей умеренная; глубоких впадин и острых пиков не наблюдается — картина, характерная для устойчивого формирования поверхности в данном режиме обработки.



а) 3D – топография



б) профиль шероховатости Ra

Рисунок 3 –Топография поверхности и профиль шероховатости, полученные при режиме эксперимента № 7

Среднеарифметическое отклонение профиля Ra = 2,287 мкм – наименьшее среди всех девяти режимов – подтверждает, что режим № 7 обеспечивает наилучшее качество поверхности в рамках данного плана эксперимента. В таблице 3 приведены все измеренные параметры шероховатости поверхности образца № 7 (угол цилиндра 0°), включая как стандартные показатели Ra, Rz, Rq, так и дополнительные характеристики профиля: R3z, Rp, Rv, Rku и объём материала Hp. Эти данные количественно характеризуют микротопографию исследованного участка поверхности. Для сравнительной оценки шероховатости при различных сочетаниях технологических параметров использованы экспериментальные значения Ra, полученные в девяти опытах в соответствии с принятой экспериментальной матрицей (таблица 2). В качестве варьируемых параметров рассматривались радиус при вершине инструмента Rd, скорость резания V, подача F, глубина резания Ap и смещение инструмента H.

В исследованном диапазоне технологических параметров значения Ra изменялись от 2,287 до 3,564 мкм. Минимальная шероховатость поверхности Ra = 2,287 мкм получена в эксперименте №7 при Rd = 0,8 мм, V = 100 м/мин, F = 0,25 мм/об, Ap = 0,8 мм и H = +0,5 мм. Максимальное значение Ra = 3,564 мкм зарегистрировано в эксперименте №9 при Rd = 0,8 мм, V = 225 м/мин, F = 0,15 мм/об, Ap = 2,0 мм и H = 0,0 мм. Эксперимент №7 характеризуется наименьшим значением шероховатости среди девяти исследованных сочетаний технологических параметров.

Таблица 3 – Параметры шероховатости поверхности цилиндрической детали образца № 7, измеренные профилографом «Micron-alpha».

Параметр	Значение, (µm)	Описание
Ra	2,287	Среднее арифметическое отклонение профиля
Rz	9,322	Средняя высота неровностей
Rq	2,878	Среднеквадратичное отклонение профиля
R3z	9,252	Среднее значение трёх наибольших высот профиля
Rp	8,028	Максимальная высота выступа
Rv	−1,798	Максимальная глубина впадины
Rku	3,673	Коэффициент эксцессности (крутизна пиков)
Hp	7,730	Объём выступов по профилограмме

Следует отметить, что данный результат характеризует рациональное сочетание параметров только среди исследованных режимов. Поскольку в каждом опыте одновременно изменялось несколько технологических параметров в соответствии с принятой экспериментальной матрицей, различия значений Ra между отдельными опытами не следует интерпретировать как количественную оценку самостоятельного влияния одного параметра без соответствующего статистического анализа [19].

На рисунке 4 представлены изменения скорости резания V, подачи F и экспериментально измеренной шероховатости поверхности Ra для девяти режимов точения сплава Д16, представленных в экспериментальной матрице (таблица 2). Раздельные шкалы позволяют сопоставить изменение технологических

параметров с полученными значениями Ra без объединения физических величин различной размерности на одной числовой оси. В исследованных режимах значения шероховатости изменялись в диапазоне 2,287–3,564 мкм.

Минимальное значение Ra = 2,287 мкм зарегистрировано в эксперименте № 7 при V = 100 м/мин и F = 0,25 мм/об. С учётом остальных параметров экспериментальной матрицы этому режиму соответствовали радиус вершины инструмента Rd = 0,8 мм, глубина резания Ap = 0,8 мм и смещение инструмента H = +0,5 мм. Максимальное значение Ra = 3,564 мкм получено в эксперименте №9 при V = 225 м/мин, F = 0,15 мм/об, Rd = 0,8 мм, Ap = 2,0 мм и H = 0,0 мм.

Сопоставление представленных на рисунке экспериментальных данных показывает, что минимальное значение Ra при F = 0,25 мм/об не следует интерпретировать как доказательство самостоятельной экстремальной зависимости шероховатости от подачи. В соответствии с принятой экспериментальной матрицей в каждом эксперименте изменялось сочетание нескольких технологических параметров, поэтому полученное значение Ra характеризует результат их совместного действия в конкретном режиме обработки.

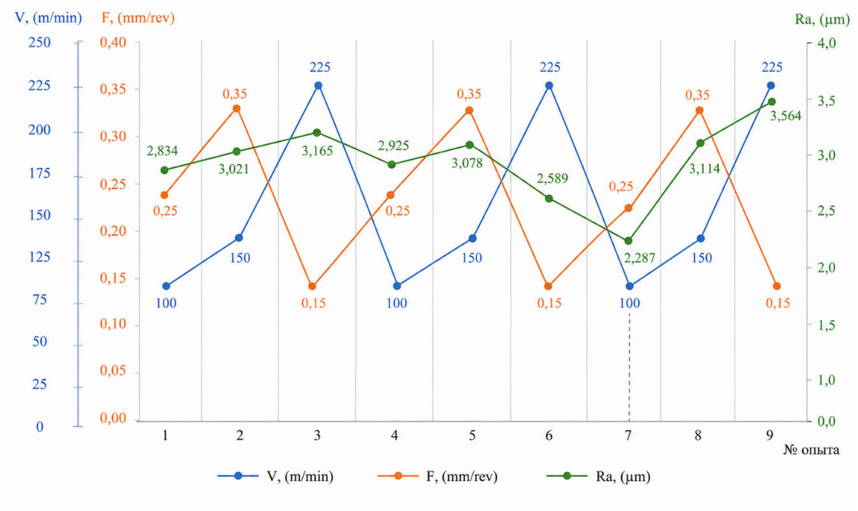


Рисунок 4 — Изменение шероховатости поверхности Ra при исследованных сочетаниях скорости резания V и подачи F

Наблюдаемое отклонение от ожидаемого характера зависимости шероховатости от подачи может быть связано с особенностями стружкообразования, образованием нароста на режущей кромке и динамическими явлениями в зоне резания [20]. Однако указанные процессы в настоящем исследовании непосредственно не контролировались, поэтому рассматриваются только как возможные объяснения и требуют дополнительной экспериментальной проверки при фиксированных значениях остальных параметров.

Таким образом, эксперимент №7 характеризует наиболее рациональное из девяти исследованных сочетаний параметров по критерию минимальной шероховатости поверхности Ra. Полученный результат относится только к исследованным режимам обработки и не рассматривается как доказательство независимого влияния отдельного технологического параметра.

Информация о финансировании

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта программно-целевого финансирования BR24992925 «Разработка технологии и материалов для инновационного развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан».

Выводы

По результатам экспериментального исследования установлено, что в пределах рассмотренных режимов точения сплава Д16 значения шероховатости поверхности Ra изменялись от 2,287 до 3,564 мкм. Минимальное значение Ra = 2,287 мкм получено в эксперименте №7 при сочетании радиуса вершины инструмента Rd = 0,8 мм, скорости резания V = 100 м/мин, подачи F = 0,25 мм/об, глубины резания Ap = 0,8 мм и смещения инструмента H = +0,5 мм. Данное сочетание параметров может рассматриваться как рациональное среди девяти исследованных режимов по критерию минимальной шероховатости поверхности.

Применение экспериментальной матрицы позволило провести сравнительную оценку шероховатости поверхности при различных сочетаниях исследуемых технологических параметров. Полученные результаты показали, что значения Ra характеризуют совокупное действие параметров конкретного режима обработки. Поскольку в отдельных экспериментах одновременно изменялись несколько параметров, имеющиеся данные не позволяют однозначно связывать изменение Ra с независимым влиянием только подачи, скорости резания или радиуса вершины инструмента без дополнительного статистического и экспериментального анализа.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе исходных технологических параметров точения сплава Д16 на станках с ЧПУ в пределах исследованных условий. Для количественного определения самостоятельного влияния отдельных параметров и подтверждения наблюдаемых различий необходимы дополнительные эксперименты с контролируемым изменением параметров и статистической оценкой результатов.

REFERENCES

1 **Hoesen, Y. A., Furqon, M., Novrinaldi, Hanifah, U., Rofik, N. A.** A CNC turning process simulation for a polygonal shaft using CAM ESPRIT software // Engineering Proceedings. – 2024. – Vol. 63. – № 1. – Art. 20. – https://doi.org/10.3390/engproc2024063020

2 **Zhang, S., Bai, J.** Research on CNC programming and machining process based on CAD/CAM technology // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2024. – Vol. 9. – № 1. – https://doi.org/10.2478/amns-2024-0516

3 **Huang, P.-M., Lee, C.-H.** Estimation of tool wear and surface roughness development using deep learning and sensor fusion // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 16. – Art. 5338. – https://doi.org/10.3390/s21165338

4 **Sapundzhi, F., Vezyuv, D., Georgiev, S., Nikolaev, I.** Application and development of CAD/CAM technologies in the modern metalworking industry // Engineering Proceedings. – 2026. – Vol. 122. – № 1. – Art. 22. – https://doi.org/10.3390/engproc2026122022

5 **Li, C., Zhao, G., Ji, D., Zhang, G., Liu, L., Zeng, F., Zhao, Z.** Influence of tool wear and workpiece diameter on surface quality and prediction of surface roughness in turning // Metals. – 2024. – Vol. 14. – № 11. – Art. 1205. – https://doi.org/10.3390/met14111205

6 **Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., Kumar, L., Khan, I. H.** Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. – 2022. – Vol. 3. – P. 161–171. – https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003.

7 **Peterka, J., Kuruc, M., Kolesnyk, V., Dehtiarov, I., Moravcikova, J., Vopat, T., Pokorny, P., Jurina, F., Simna, V.** Selected aspects of precision machining on CNC machine tools // Machines. – 2023. – Vol. 11. – № 10. – Art. 946. – https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003

8 **Doudkin, M., Kim, A., Kombayev, K., Azamatov, B., Azamatova, Z.** Research of cutting temperature reducing of titanium alloy Grade 5 below polymorphic transformation depending on calculation of cutting modes // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 747–758. – Paper ID: IJMPERDAPR202074.

9 **Kombayev, K., Khoshnaw, F., Kozhakhmetov, Y., Tleuzhanova, G., Azamatov, B., Tabiyeva, Y.** Microplasma sprayed tantalum coatings on Ti Grade 5 extra-low interstitials: Investigation of thickness and porosity control // Coatings. – 2025. – Vol. 15. – Art. 464. – https://doi.org/10.3390/coatings15040464

10 **Kombayev, K., Kozhakhmetov, Y., Yerbolat, D., Dauletkhanov, Y., Kim, V., Kaidar, A., Ishangaliyev, A., Khoshnaw, F.** Influence of cutting parameters and assist gases on the laser cutting quality of 09G2S (S355J2, EN 10025-2) structural steel // Results in Surfaces and Interfaces. – 2026. – Vol. 22. – Art. 100716. – https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2026.100716

11 **Pimenov, D. Y., Kiran, M., Khanna, N., Pintaude, G., Vasco, M.C., Ribeiro da Silva, L., Giasin, K.** Review of improvement of machinability and surface integrity in machining of aluminum alloys // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129. – P. 4743–4779. – https://doi.org/10.1007/s00170-023-12630-4.

12 ASM Handbook Committee. Machining of aluminum and aluminum alloys // ASM Handbook. Vol. 16: Machining. ASM International. – 1989. – P. 761–804. – https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002184

13 **Chou, Y. K., Song, H.** Tool nose radius effects on finish hard turning // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 148. – № 2. – P. 259–268. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.029.

14 **Abellán-Nebot, J. V., Vila Pastor, C., Siller, H. R.** A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – № 5. – Art. 1917. – https://doi.org/10.3390/su16051917.

15 **Feldhausen, T., Heinrich, L., Saleeby, K., Burl, A., Post, B., MacDonald, E., Saldana, C., Love, L.** Review of computer-aided manufacturing strategies for hybrid directed energy deposition // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 61. – Art. 103188. – https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103188.

16 **Liu, Q., Jiang, J., Xiu, W., Ming, Z., Cui, B., Zheng, L., Wang, J., Qi, L.** Research progress on precision tool alignment technology in machining // Micromachines. – 2024. – Vol. 15. – № 10. – Art. 1202. – https://doi.org/10.3390/mi15101202.

17 **Kayır, Y., Demirer, E.** Investigation of the effect of the position of the cutting tool tip on the geometric tolerances and surface roughness in turning process // Politeknik Dergisi. – 2025. – Vol. 28. – № 2. – P. 479–489. – https://doi.org/10.2339/politeknik.1490439.

18 **Mohamed, A., Hassan, M., M'Saoubi, R., Attia, H.** Tool condition monitoring for high-performance machining systems: A review // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 6. – Art. 2206. – https://doi.org/10.3390/s22062206.

19 **Madić, M., Marinković, V., Radovanović, M.** Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of polyamide based on artificial neural network // Mechanika. – 2012. – Vol. 18. – № 5. – P. 574–581. – https://doi.org/10.5755/j01.mech.18.5.2701.

20 **Bahari, M. S. K., Abd Rahman, S. N., Salleh, M. M., Tamin, N.** Optimization of CNC turning parameters for surface roughness and tool wear in machining Inconel 718 using response surface methodology // Research and Innovation in Technical and Vocational Education and Training. – 2025. – Vol. 5. – № 1. – P. 181–191. – https://doi.org/10.30880/ritvet.2025.05.01.018. – [Electronic resource]. – https://periodical.uthm.edu.my/index.php/ritvet/article/view/19697

Поступило в редакцию 23.02.26.
Поступило с исправлениями 21.04.26.
Принято в печать 28.08.26.

М. Т. Төреханова[1], К. К. Комбаев[2], Г. Б. Тлеужанова[3],
А. С. Уркунбай[4], А. С. Қизатов[5]
[1,2,3,4,5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
23.02.26 ж. баспаға түсті.
21.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
28.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Д16 ҚОРЫТПАСЫН ЖОНУ КЕЗІНДЕ КЕСУ РЕЖИМДЕРІ МЕН ҚҰРАЛ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ БЕТ КЕДІР-БҰДЫРЛЫҒЫНА ӘСЕРІ

Жұмыста СББ токарлық білдегінде Д16 алюминий қорытпасынан жасалған цилиндрлік бөлшектерді өңдеу кезінде кесу режимдері мен кескіш құрал параметрлерінің әртүрлі үйлесімдеріндегі бет кедір-бұдырлығының өзгеруі эксперименттік түрде зерттелді. Өзгертілетін параметрлер ретінде кескіш құрал төбесінің радиусы, кесу жылдамдығы, беріліс, кесу тереңдігі және құралдың ығысуы қарастырылды. Эксперимент қабылданған эксперименттік матрицаға сәйкес қалыптастырылған зерттелетін технологиялық параметрлердің тоғыз үйлесімін қамтыды. Өңделген беттің кедір-бұдырлығы Ra параметрі бойынша байланыссыз интерференциялық 3D-профилография әдісімен бағаланды.

Зерттелген технологиялық параметрлер диапазонында Ra кедір-бұдырлығының мәндері 2,287–3,564 мкм аралығында болды. Ең төменгі Ra = 2,287 мкм мәні № 7 экспериментте кескіш құрал төбесінің радиусы 0,8 мм, кесу жылдамдығы 100 м/мин, беріліс 0,25 мм/айн, кесу тереңдігі 0,8 мм және құралдың ығысуы +0,5 мм болған кезде алынды. Алынған эксперименттік деректер зерттелетін технологиялық параметрлердің әртүрлі үйлесімдеріндегі бет кедір-бұдырлығының айырмашылықтарын сипаттайды.

Зерттелген тоғыз режимнің ішінде Ra параметрінің ең төменгі мәнін қамтамасыз еткен параметрлер үйлесімін жүргізілген эксперимент шегінде ұтымды деп қарастыруға болады. Алынған нәтижелер СББ білдектерінде Д16 қорытпасынан жасалған цилиндрлік бөлшектерді токарлық өңдеудің технологиялық параметрлерін таңдау кезінде практикалық қызығушылық тудырады.

Кілтті сөздер: бет кедір-бұдырлығы, токарлық өңдеу, Д16 қорытпасы, кесу режимдері, құрал параметрлері, СББ білдегі, эксперименттік матрица, 3D-профилография.

M. T. Torekhanova[1], K. K. Kombayev[2], G. B. Tleuzhanova[3],
A. S. Urkunbay[4], A. S. Kizatov[5]
[1,2,3,4,5]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 23.02.26.
Received in revised form 21.04.26.
Accepted for publication 28.08.26.

INFLUENCE OF CUTTING CONDITIONS AND TOOL PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN TURNING OF D16 ALLOY

This study experimentally investigated changes in surface roughness under different combinations of cutting conditions and cutting tool parameters during CNC turning of cylindrical parts made of D16 aluminum alloy. The variable parameters included tool nose radius, cutting speed, feed rate, depth of cut, and tool offset. The experiment comprised nine combinations of the investigated technological parameters formed in accordance with the adopted experimental matrix. The surface roughness of the machined surfaces was evaluated using the Ra parameter by non-contact interferometric 3D profilometry.

Within the investigated range of technological parameters, the surface roughness Ra values ranged from 2.287 to 3.564 μm. The lowest value, Ra = 2.287 μm, was obtained in experiment No. 7 at a tool nose radius of 0.8 mm, cutting speed of 100 m/min, feed rate of 0.25 mm/rev, depth of cut of 0.8 mm, and tool offset of +0.5 mm. The experimental data characterize the differences in surface roughness among the various combinations of the investigated technological parameters.

The combination of parameters that provided the lowest Ra value among the nine investigated machining conditions may be considered rational within the scope of the experiment. The obtained results are of practical interest for selecting technological parameters for CNC turning of cylindrical parts made of D16 aluminum alloy.

Keywords: surface roughness, turning, D16 aluminum alloy, cutting conditions, tool parameters, CNC machine tool, experimental matrix, 3D profilometry.

SRSTI 55.41.17

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/250-271

E. S. Chukenova[1], Y. Z. Nugman[2], A. K. Mustafa[3],
M. K. Sagyntay[4], F. Khoshnaw[5]
[1,2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]De Montfort University, United Kingdom, Leicester.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4371-5989
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4537-9440
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4751-7141
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7946-1568
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4467-1944
*e-mail: elvira_85-11@mail.ru

WAAM OF LOW-CARBON STEEL USING MIG WELDING UNDER EQUIVALENT CONDITIONS

In this study, the effect of arc process parameters on the microstructure and mechanical properties of samples produced from low-carbon steel wire using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology was investigated. MIG/MAG welding and lathe machine facilities were used to establish deposition conditions like those of a WAAM system. The MIG/MAG welding machine acted as the heat source, while the lathe controlled the substrate motion to enable vertical layer-by-layer deposition. The samples were fabricated in MIG/MAG mode using a Magnetta 220 S welding system. During the experiments, the following process parameters were applied: welding current 53 A, voltage 14.8 V, torch travel speed 3.5 mm/s, and wire feed speed 3 m/min. Metallographic analysis revealed the formation of a directional solidification structure in the deposited samples. The microstructure mainly consisted of a ferritic matrix with pearlite colonies, which ensures a favorable balance between strength and ductility. Moreover, microhardness measurements ranged from 154–166 HV1, with an average of 161 HV1. The results show that the low-carbon steel produced by WAAM technology exhibits a relatively uniform microstructure and high mechanical strength characteristics.

Keywords: Additive manufacturing, WAAM technology, low-carbon steel, microstructure, mechanical properties.

Introduction

Additive manufacturing has emerged in recent years as an efficient technology for producing metal components through layer-by-layer deposition, enabling the fabrication of near-net-shape metallic structures [1]. Among metal-based additive manufacturing technologies, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) has emerged as one of the most rapidly developing processes. WAAM utilizes an electric arc as a heat source to melt metallic wire feedstock and deposit material layer by layer along a programmed path. Compared with traditional casting and forging processes, the WAAM method can reduce material consumption by 30–60 % and significantly shorten production time

[2]. This technology is based on welding processes such as MIG/MAG and Cold Metal Transfer (CMT) and is characterized by a high deposition rate.

The microstructure and mechanical properties of samples produced in the WAAM process are directly dependent on technological parameters. Among these parameters, heat input plays a particularly important role, since in WAAM technology the thermal energy required to melt the wire feedstock is generated by an electric arc, making it the main controlling factor of the process [3]. Heat input is mainly governed by arc parameters such as welding current, voltage, wire feed speed, and travel speed. These parameters directly influence the dynamics of the molten metal pool, the formation of the surface morphology of the deposited layers, and the heat transfer processes occurring during solidification [4]. Therefore, adjusting arc parameters is essential for achieving dimensional accuracy, stable deposition, and improved microstructural and mechanical performance. When improving the macrostructure of the deposited samples, reducing excessive heat input is crucial for maintaining geometric accuracy and enhancing deposition efficiency [5].

Improper selection of technological parameters can lead to dimensional inaccuracies, deterioration of surface quality, and geometric distortions, which subsequently require additional post-processing operations such as machining or remelting [6]. Therefore, effective control of the key technological parameters in the WAAM process, particularly heat input, is considered one of the most important scientific and engineering challenges.

Scientific studies have shown that the thermal energy in the WAAM process is largely dependent on the ratio between the wire feed speed (WFS) and the torch travel speed (TS). Yildiz et al. [7] investigated the effect of the WFS/TS ratio on the weld geometry and the mechanical properties of the material. Their results indicate that this ratio is one of the key process parameters for controlling the thermal energy in the WAAM process. Furthermore, over the selected parameter range, thermal energy demonstrated a linear correlation with the geometric characteristics, particularly the layer height, weld width, and penetration area. Moreover, analysis of individual welds revealed a negative correlation between the thermal energy and the material hardness values. Other studies have also shown that thermal energy has a significant effect on material properties. For example, Li et al. [8] reported that an increase in thermal energy resulted in a decrease in the mechanical properties of the deposited material. Furthermore, Wang et al. [9] found that with increasing thermal energy input, the mechanical properties of the material gradually deteriorate and the failure mechanism shifts from ductile to brittle. On the other hand, a number of studies have shown that the deposition strategy in WAAM significantly affects the material properties. For example, Williams et al. [10] investigated the effect of interlayer temperature and heat accumulation on geometric accuracy. Ma et al. [11] studied the effect of deposition trajectories on porosity and hardness. Martina et al. [12] analyzed the evolution of microstructure and residual stresses during vertically oriented deposition.

However, most of the existing studies primarily focused on WAAM processes performed in a horizontal plane or under conventional deposition configurations. The influence of substrate spatial orientation and deposition angle has not been sufficiently

investigated [13]. Furthermore, inclined deposition has been shown to affect the gravitational behavior of the molten pool, interlayer bonding quality, and cooling kinetics [14].

This study has investigated the effect of the WAAM parameters on vertical deposition. Based on that, the structural characteristics of low-carbon steels widely used in WAAM technology, including ER70S-6 wire, are of particular importance. Moreover, ER70S-6 steel is characterized by good weldability as well as sufficient strength and ductility. For this reason, studying the microstructure and mechanical properties of ER70S-6 steel produced by WAAM is of significant scientific and practical interest.

This study aims to investigate the influence of technological parameters on the microstructure and mechanical properties of low-carbon steel produced using WAAM technology, as well as to analyze its tensile strength and hardness characteristics. In this regard, experimental and quantitative studies were carried out to evaluate the efficiency of the WAAM process, the microstructural features, and the mechanical properties of the produced material. In the proposed experimental setup, the substrate was positioned vertically along the Y-axis of the coordinate system, and the layer-by-layer deposition of the samples was performed at an inclined angle relative to the horizontal plane. This configuration represents a specific feature of the present study and enables the investigation of the influence of non-standard deposition orientation on the microstructural evolution and mechanical performance of the deposited low-carbon steel. The novelty of the present study lies in the vertical positioning of the substrate along the Y-axis of the coordinate system and the layer-by-layer deposition carried out at an inclined angle relative to the horizontal plane. Such a configuration alters the heat transfer mechanism, affects the stability of the molten pool, and influences interlayer adhesion as well as geometric formation.

Materials and methods

In this study, the principles of WAAM were implemented using available MIG welding and lathe machine facilities to establish deposition conditions comparable to those of a conventional WAAM system. The MIG welding machine Magnetta 220 S was used as the arc heat source and wire deposition tool, while the lathe machine provided controlled movement of the substrate during the deposition process. Through careful selection of welding parameters, including current, wire feed rate, and deposition conditions, the setup was designed to replicate the key operational characteristics of WAAM, particularly layer-by-layer material deposition and controlled thermal input. This approach enabled the creation of WAAM-like processing conditions, allowing the investigation of microstructural evolution and mechanical properties of the deposited material under control and repeatable parameters.

Material. ER70S-6 grade steel wire was used as the feedstock material. The nominal diameter of the wire was 0.8 mm. A substrate from mild steel, with dimensions of 208 × 63 × 12 mm, was used as the base material. Table 1 shows the chemical composition of the ER70S-6 steel wire.

Table-1 – Chemical composition of ER70S-6 wire (%) [15]

Original wire	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Fe
ER70S-6	0.07	0.85	1.43	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	Balance

Preparation Method of WAAM Samples. Figure 1 shows the welding machine type Magnetta 220 S MIG/MAG, which was used for preparing WAAM samples by welding with inert/active shielding gas. An IK62 automatic lathe was employed as the moving unit of the setup. The substrate was fixed to the moving part using a steady rest (lunette), and the experiments were carried out under these conditions. Figure 2a shows an image of the welding system with the welding head oriented at an angle of 90° to the substrate.

The present study was designed as a controlled comparative investigation rather than a full parametric optimisation of the deposition process. A single, stable set of processing parameters was selected for each welding mode (MIG) based on preliminary trials to ensure consistent multilayer deposition and comparable build quality. This approach allows the isolation of the effect of the transfer mode and heat input characteristics on the resulting microstructure and mechanical properties. It is acknowledged that variations in current, voltage, wire feed rate, and travel speed can significantly influence thermal history and, consequently, the structure–property relationships. However, a systematic parametric study was beyond the scope of the present work. Future studies will focus on expanding the experimental design to quantify the influence of these parameters and establish broader process–structure–property correlations.

The deposition process was carried out using a controlled additive manufacturing setup designed for consistent layer-by-layer material formation. The WAAM process was carried out in MIG/MAG mode. The technological parameters used in the experiment were as follows: welding current 53 A, welding voltage 14.8 V, torch travel speed 3.5 mm/s, wire feed speed 3 m/min, and an interlayer dwell time of 15 s. The produced samples had a height of 2.7–2.9 mm, while the thickness of the deposited samples ranged from 0.68 to 0.71 mm.

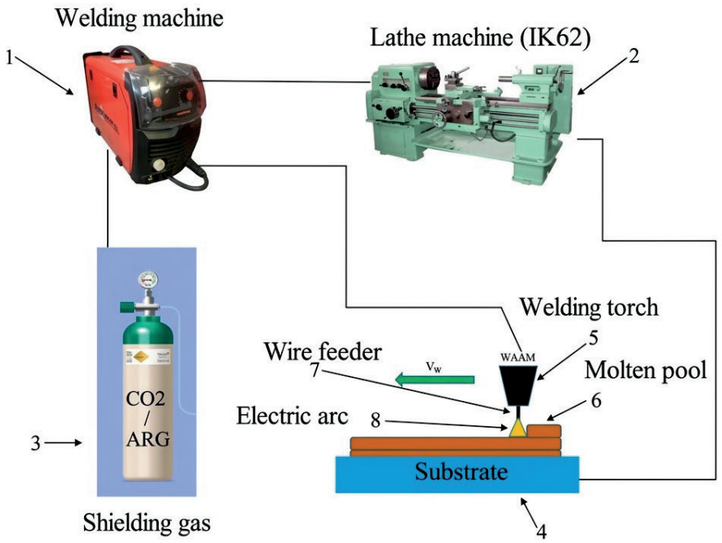


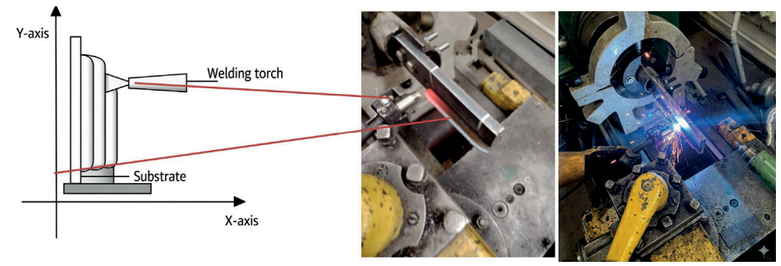
Figure 1 – Schematic representation of the WAAM system [16]

By applying voltage and initiating the welding arc, the wire was melted using an electric arc and protected by a shielding gas, while the material was deposited layer by layer to produce the samples. During the experiment, argon (Ar) was used as the shielding gas, and the remaining parameters were set on the MIG/MAG welding system.

In conventional additive welding or WAAM processes, the substrate is typically positioned horizontally, with layers built in the vertical direction. However, in the proposed experimental setup, the substrate was positioned vertically along the Y-axis of the coordinate system, and layer-by-layer deposition was carried out at an inclined angle relative to the horizontal plane. Accordingly, the welding torch was oriented at a specific angle toward the substrate, enabling investigation of molten metal flow under gravitational influence, weld bead geometric stability, and interlayer adhesion.

Furthermore, the vertical positioning of the substrate influenced the hydrodynamics of the molten pool, the formation of the solidification front, and the metal flow mechanisms, acting as an additional process variable. Figure 2b shows the microstructure of the deposited sample, enabling comparison with conventional horizontal deposition conditions.

Four samples were produced. These were cut using a laser cutting machine, polished, and subsequently analysed to determine their microstructure and mechanical properties.



a) b)

a) vertical positioning of the substrate along the Y-axis of the coordinate system [16]
b) experimental process
Figure 2 – Experimental Setup and Process

Metallographic Analysis. The samples were prepared for microstructural examination in accordance with the ASTM E3 standard. The specimens were sectioned and mechanically polished using abrasive papers with different grit sizes (180, 320, 600, and 1200 grit). The polished samples were then etched using a 5 % hydrochloric acid (HCl) solution. Figure 4b illustrates the microstructural characteristics of the samples after polishing and etching, as examined using a Leica optical microscope. The microstructure was analyzed at magnifications ranging from 500X to 1000X. During the microstructural analysis, statistical data were obtained on the average grain size, grain morphology, and porosity, and the phase composition of the material was also investigated.

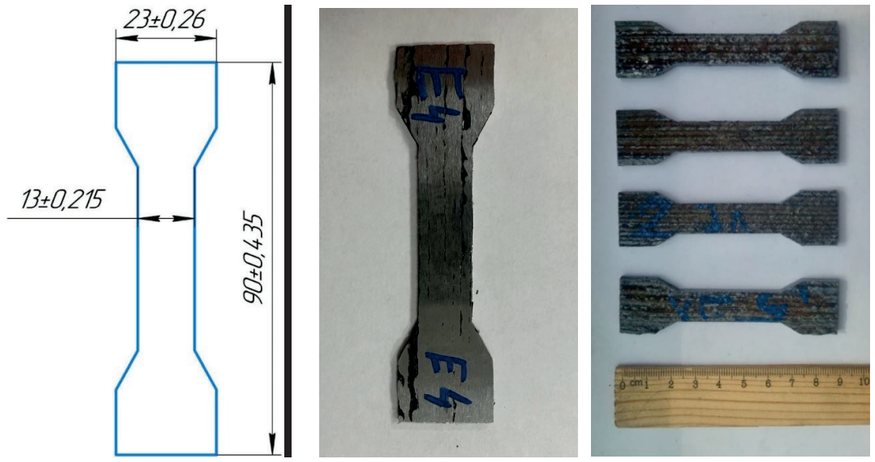
Investigation of Mechanical Properties. Determination of Tensile Strength. Figure 3 shows the samples being deposited onto the substrate using the layer-by-layer deposition method with a wire arc melting process for the investigation of mechanical properties. Before deposition, the substrate plate was carefully cleaned with acetone to remove any contaminants. The height of the layer-by-layer deposited samples ranged from 2.7 to 2.9 mm, while the thickness of the samples varied between 0.68 and 0.71 mm.



Figure 3 – External appearance of samples obtained through simulated WAAM technology

The tensile specimens were prepared in accordance with the ISO 6892-1 international standard. The geometric dimensions of the specimens were designed using Kompas software and subsequently processed by precision milling and grinding, as shown in Figures 4a and 4b. As illustrated in Figure 4c, the tensile specimens were cut at room temperature using a laser cutting machine, with a processing time of approximately 10 seconds per specimen.

Figure 5 shows the tensile tests performed using a universal electronic testing machine (WDW-50E). The tensile strength values were determined as the average of four tested samples.



a) b) c)

a) geometric dimensions of the tensile test specimen
b) Overall view of the tensile test specimen
c) standard metal specimens for tensile testing
Figure 4 – Specimens for tensile testing



Figure 5 – Tensile testing process using a universal electronic testing machine

The tensile test specimens were tested using a WDW-50E universal electronic testing machine to determine their ultimate tensile strength up to fracture.

Microhardness Measurement. The microhardness of the samples produced from ER70S-6 steel wire was evaluated using the Vickers method under the HV1 loading condition. Microhardness measurements were performed using a Vickers microhardness tester with an applied load of 100 g for 10 seconds. The microhardness was determined at five points along the cross-section of the samples with a spacing of 2 mm.

Figure 6 shows that the Vickers microhardness tests were carried out using a Wilson VH3300 hardness tester, applying an indentation load of 50 gf with a dwell time of 10 seconds. Measurements were carried out at indentation depths of 50 μm and 100 μm. At each depth position, five microhardness measurements were collected, and the standard deviations were calculated.

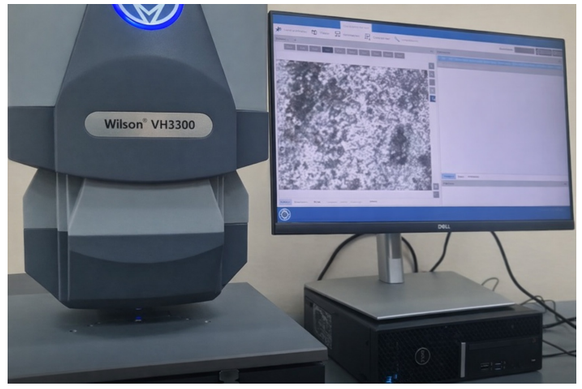


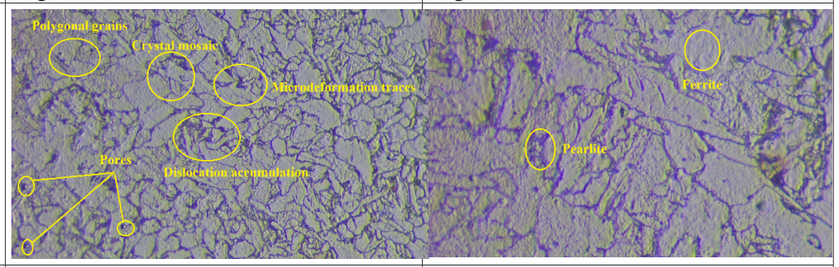
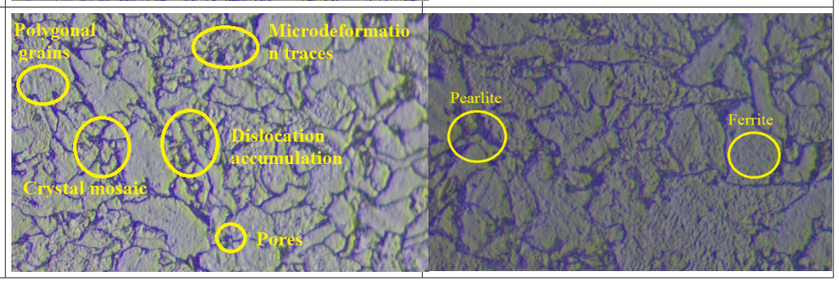
Figure 6 – Wilson VH3300 microhardness tester used to determine the surface hardness of the material

This study was conducted under controlled, WAAM-representative conditions using conventional welding equipment combined with a mechanised deposition system. While the approach enables reproducible multilayer deposition and allows systematic investigation of process–structure–property relationships, it does not fully replicate all features of industrial-scale WAAM processes. In particular, aspects such as long-range heat accumulation, residual stress evolution, interlayer distortion, and the influence of complex deposition strategies and toolpath planning are not comprehensively captured in the present setup. Therefore, the results should be interpreted as providing fundamental insights into microstructure and mechanical property development under WAAM-like thermal conditions, rather than as a direct representation of full-scale WAAM manufacturing.

Results and discussion

Microstructural Analysis. WAAM involves the sequential deposition of multiple layers, which leads to a complex interaction between temperature, thermal cycles, and cooling rates. In this context, particular attention is given to understanding how this process parameters influence not only specific regions but also the overall morphology and phase composition of the entire sample.

Table-2 – Optical microstructure of low-carbon steel produced by WAAM

№	Magnification 500X	Magnification 1000X
Sample 1		
Sample 2		

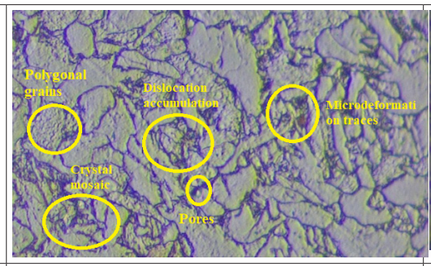
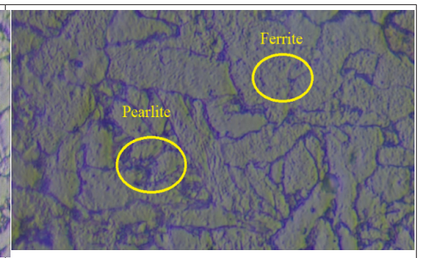
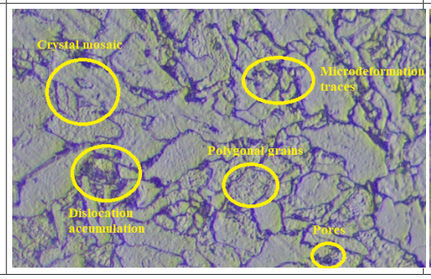
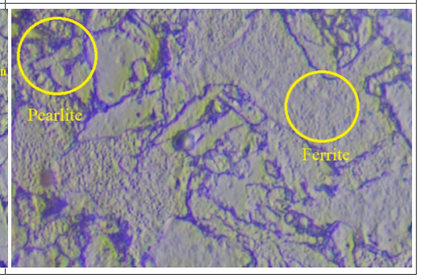
Sample 3		
Sample 4		

Table 2 shows a coarse-grained structure and traces of directional solidification are observed. This phenomenon can be explained by the dendritic growth mechanism, which develops in accordance with the dominant direction of heat flow during the additive manufacturing process. During the WAAM process, the effect of high temperatures leads to surface decarburization of the steel, and the microstructure mainly consists of a ferritic matrix with dispersed pearlite colonies. The microstructure of the low-carbon steel was predominantly composed of ferrite, which contributed to the overall ductility of the material. Pearlite was also present in a smaller amount, and due to its higher hardness, it played an important role in enhancing the strength of the steel.

For the alloy used in this study, which contains 0.07 wt% carbon, the expected microstructure can be interpreted using the iron-carbon phase diagram and applying the lever rule at the eutectoid temperature. As a hypoeutectoid steel with a very low carbon content, the microstructure is predominantly ferritic, with only a limited proportion of pearlite formed from the retained austenite during the transformation process. Based on the lever rule, the approximate pearlite fraction can be estimated as $0.07/0.76 \approx 9$ %, with the remainder (~91 %) being ferrite. Therefore, the resulting microstructure is expected to be predominantly ferritic, with small and scattered pearlite colonies. This distribution is consistent with low-carbon steels and may further depend on the thermal conditions and cooling rates associated with the WAAM process. A higher pearlite fraction contributes to improved.

The microstructural features observed in the deposited walls can be interpreted in relation to the thermal conditions associated with the deposition processes. The predominance of ferrite–pearlite structures is consistent with the relatively low carbon content of the wires and the moderate cooling rates typical of arc-based deposition. However, variations in grain morphology and phase distribution between MIG deposits

can be attributed to differences in heat input and thermal cycling. In multilayer deposition, repeated thermal cycles and interlayer reheating further influence phase transformation, leading to partial tempering and homogenisation of the microstructure across layers, which explains the relatively uniform microhardness distribution observed. In addition, the directional solidification inherent to layer-by-layer deposition contributes to the development of columnar grain structures aligned with the build direction. These combined effects highlight the role of process parameters and thermal history in governing the structure–property relationships in WAAM-type deposits.

The microstructural features observed in the deposited walls can be interpreted in relation to the thermal conditions associated with the deposition processes. The predominance of ferrite–pearlite structures is consistent with the relatively low carbon content of the wires and the moderate cooling rates typical of arc-based deposition. However, variations in grain morphology and phase distribution between MIG deposits can be attributed to differences in heat input and thermal cycling. The heat input in conventional MIG welding is higher and less stable, which may result in coarser grains due to prolonged thermal exposure. In multilayer deposition, repeated thermal cycles and interlayer reheating further influence phase transformation, leading to partial tempering and homogenisation of the microstructure across layers, which explains the relatively uniform microhardness distribution observed. In addition, the directional solidification inherent to layer-by-layer deposition contributes to the development of columnar grain structures aligned with the build direction. These combined effects highlight the role of process parameters and thermal history in governing the structure–property relationships in WAAM-type deposits.

A higher fraction of pearlite contributes to the improvement of the mechanical properties of the material. To clearly highlight the novelty of the vertical deposition approach, the obtained grain size was compared with numerical data reported for horizontal WAAM deposition. In the present study, the average grain size was 14.7 pixels, corresponding to approximately 7.35 өm, whereas horizontal ER70S-6 WAAM studies reported larger grain sizes of 19.91 ұ 1.06 өm, 13.06 ұ 0.57 өm, and 11.34 ұ 1.59 өm under different travel speeds. This comparison shows that vertical deposition under equivalent conditions can provide a finer grain structure, confirming the effectiveness and novelty of the proposed deposition approach. These results are like those of Ma et al. [11], who reported that vertical deposition leads to significant changes in the material's microstructure and mechanical properties. Thus, our results also show an improvement in hardness and tensile strength, accompanied by a reduction in porosity. However, this result shows some deviations in the microstructural structure and hard distribution compared to the findings of Marinelli et al. [17].

Analysis of Mechanical Properties. Tensile Test Results. The test results demonstrated the high mechanical strength properties of ER70S-6 steel wire. The ultimate tensile strength of the specimens was determined within the range of Rm = 500–567 MPa. The minimum value of 500 MPa was recorded for the first sample, while the maximum value of 567 MPa was observed.

The yield strength values were also relatively high: the upper yield strength ranged from ReH = 380–469 MPa, while the lower yield strength varied from ReL = 374–464 MPa. These values indicate that the material demonstrates stable deformation behavior within the elastic–plastic transition region and possesses a sufficient margin of strength.

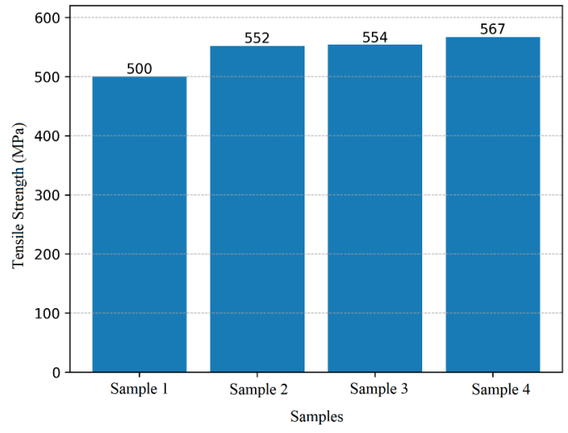
Figure 7a shows that the differences between the samples are relatively small, confirming the technological stability of the mechanical properties of ER70S-6 wire.

The tensile strength values of the four specimens were 500, 552, 554, and 567 MPa. Statistical analysis showed an average tensile strength of 543.25 MPa, with a standard deviation of 29.59 MPa and a coefficient of variation of 5.45%. The 95% confidence interval was 543.25 ұ 47.08 MPa. The relatively low coefficient of variation indicates limited scatter of the results and confirms acceptable reproducibility of the tensile test data.

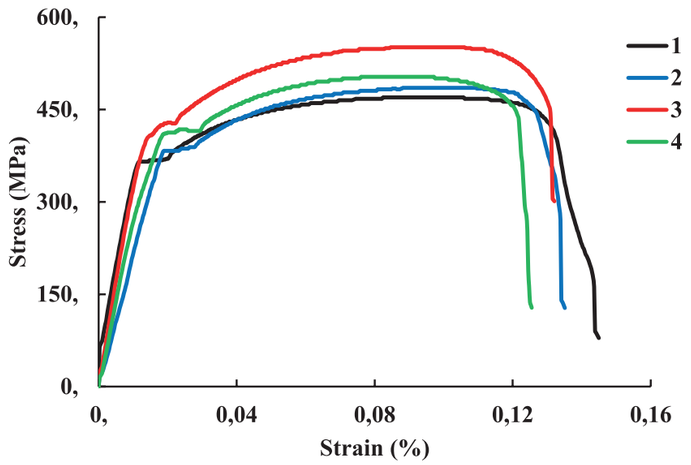
Furthermore, the gradual increase in Rm values can be explained by structural densification or changes in thermal history. Overall, the results confirm that ER70S-6 steel wire possesses high strength properties suitable for welding and additive manufacturing.

Figure 7b shows the stress–strain relationship obtained during the tensile testing of low-carbon steel specimens.

The stress–strain curves demonstrate similar deformation behavior for all specimens, especially in the elastic and plastic deformation regions. This similarity supports the reproducibility of the tensile test results and indicates that the mechanical response of the specimens is relatively uniform. Therefore, the obtained curves provide additional evidence for the low scatter of mechanical properties and reduced anisotropy under the selected processing conditions.



a) Tensile strength of ER70S-6 wire based on tensile test results



b) Stress–strain curves of the specimens obtained during the tensile test
Figure 7 – Mechanical properties of the specimens obtained from tensile testing

In the initial part of the graph (ε ≈ 0–0.02), the stress increases linearly, indicating the elastic deformation region. In this region, the stress rises to approximately 350–420 MPa, meaning that the material deforms according to Hooke's law. The elastic modulus of the material is determined in this region.

In the subsequent region (ε ≈ 0.02–0.10), the material transitions into the plastic deformation stage. During this stage, stress gradually increases and reaches its maximum value. According to the graph, the ultimate tensile strength of the specimens lies approximately within the range of 460–550 MPa. In particular, the third specimen reached a maximum stress of about 550 MPa, indicating relatively high strength characteristics of the material.

In the final stage of the test (ε ≈ 0.12–0.15), the stress decreases sharply, and fracture of the specimens occurs. Before fracture, the formation of necking in the material is observed. The elongation of the specimens was approximately 12–15%, which indicates a sufficient level of ductility typical for low-carbon steel.

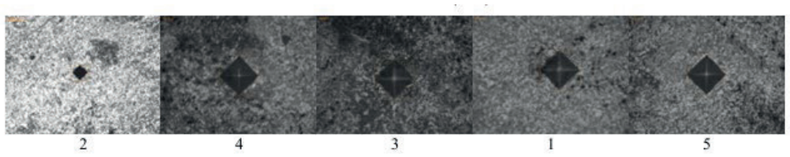
When comparing the obtained results with the mechanical properties specified by the manufacturer of ER70S-6 wire, it is known that the standard tensile strength values for this material usually fall within the range of 480–560 MPa. The results obtained in this study (460–550 MPa) are close to this range. This indicates that the mechanical properties of the samples produced by WAAM technology generally correspond to the initial properties of the welding material and that the process can maintain the strength characteristics of the material.

Microhardness Measurement. Figure 8a shows that, according to the measurement results, the microhardness values varied within the range of 154–166 HV1. The average

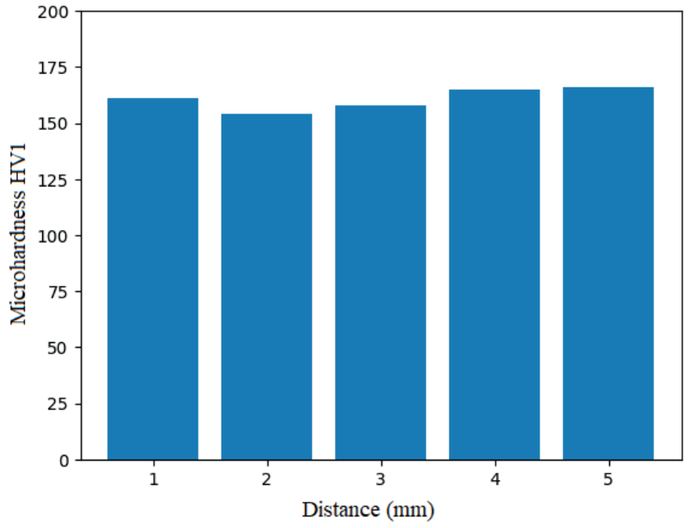
value was 161 HV1, with a standard deviation of 5 HV1, indicating a relatively uniform microstructure of the material.

Based on the results, the microhardness values ranged from 154 to 166 HV1, with an average value of 161 HV1, indicating a relatively uniform microstructure of the material. During statistical processing of these data, the mean values and standard deviations were determined, and the number of repeated tests was specified. Error bars and confidence intervals were included in the graphs, reflecting the variability of the measurements and enhancing the reliability of the results. Additionally, a reproducibility analysis was conducted, demonstrating a high degree of uniformity and stability in the results.

At the second measurement point, a decrease in microhardness to 154 HV1 was observed, which may be explained by local structural heterogeneity or variations in grain size. Figure 8b shows that in the remaining regions, a gradual increase in hardness was observed, reaching maximum values of 165–166 HV1 at points 4–5. Such an increase may be associated with grain refinement, the distribution of strengthening phases, or local differences in cooling rates. The obtained results indicate that ER70S-6 material exhibits favorable mechanical stability for WAAM and welding processes, and the level of structural anisotropy is relatively low. The assessment of anisotropy in the present study is limited and should be interpreted with caution. Mechanical testing was not conducted along multiple orientations relative to the build direction, and no detailed texture or crystallographic analysis was performed. Therefore, the anisotropy of the deposited material cannot be quantitatively evaluated. The relatively uniform microhardness distribution and the absence of pronounced directional features in the observed microstructure may suggest a limited degree of anisotropy under the selected processing conditions; however, these observations are indirect. A comprehensive evaluation of anisotropy in WAAM deposits requires directional mechanical testing and advanced characterisation techniques, such as EBSD, to analyse grain orientation and texture. These aspects are recommended for future investigation.



a) microstructural view of Vickers microhardness indentation marks obtained at different points of the sample



b) variation of microhardness (HV1) as a function of distance at different measurement points of the sample

Figure 8 – Distribution of microhardness (HV1) along the sample and its variation associated with microstructural heterogeneity

Figure 8b illustrates the variation of microhardness (HV1) values as a function of distance measured from the substrate–deposition interface along the build direction of the sample. The microhardness values measured along the build direction vary within the range of 154 to 166 HV1, indicating relatively uniform behavior. The average microhardness is approximately 161 HV1.

The presence of pores was also detected during the study. These pores were mainly located in the surface layer of the steel and were formed during the melting and solidification of the metal. Dekis et al. investigated ER70S-6 low-carbon steel produced by WAAM at different travel speeds [18]. Their results showed that the ultimate tensile strength of WAAM-produced ER70S-6 was slightly lower than the catalogued value of the wire, reaching approximately 93 % of the reference strength of ER70S-6.

Karamimoghadam et al. studied the effect of wire feed rate on the microstructure of ER70S-6 produced by single-line WAAM [19]. Their results showed that local microstructural characteristics and hardness distribution were strongly affected by wire feed rate, heat input, and bead/dilution zones. This supports the interpretation that the relatively uniform microhardness distribution observed in the present study is associated with controlled thermal cycling and layer-by-layer deposition conditions.

Zhai et al. reported the mechanical properties of WAAM-produced ER70S-6/S355 bimetal components [20]. In the as-built condition, the ER70S-6/S355 joint

exhibited a yield strength of 349 MPa, an ultimate tensile strength of 503.5 MPa, and an elongation of 30 %.

Financing information

The authors gratefully acknowledge that this work was financially supported by the research project AP23487120 of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (2024–2026).

Conclusions

This study provides insight into the relationship between the process, structure, and properties of ER70S-6 low-carbon steel manufactured by WAAM. It demonstrates that the thermal conditions inherent in layer-by-layer deposition promote directional solidification and the development of a coarse-grained ferrite-pearlite microstructure, highlighting the strong influence of heat flow and deposition strategy on microstructural evolution.

The work does not cover the full-scale industrial WAAM process in its entirety, but only considers a specific part, as presented in the methods section. The results also demonstrate that, despite the relatively coarse-grained microstructure, WAAM-processed material can exhibit stable and balanced mechanical properties. This suggests that this process is capable of producing structurally robust components without significant heterogeneity, provided processing parameters are properly controlled.

Importantly, the study clarifies that the combination of strength and ductility in ER70S-6 steel manufactured by WAAM is not random, but rather arises from the interaction of thermal cycles, solidification behavior, and phase distribution. This understanding confirms the possibility of optimizing material properties through process optimization, not just post-processing.

Overall, this work contributes to a deeper understanding of WAAM technology as a method for producing low-carbon steels, demonstrating that it can be used not only to create geometrically complex structures but also to achieve predictable and controllable material properties, which is important for its wider industrial application.

REFERENCES

1 **Jeyaprakash Natarajan, Muralimohan Cheepu, Che-Hua Yang.** Advances in Additive Manufacturing Processes. – Bentham : Science Publishers. – 2021. – http://dx.doi.org/10.2174/9789815036336121010 1

2 **Ji L., Lu J., Liu C., Jing C., Fan H., Ma S.** Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2017. – Vol. 128. – P. 03006. – https://doi.org/10.1051/matecconf/201712803006

3 **Qin, H., Zhu, W., Zhang, H.** Effect of process parameters on bead geometry and microstructure of the stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing // Journal of Alloys and Metallurgical Systems. – 2025. – 100231. – https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100231

4 **Dinovitzer M., Chen X., Laliberte J., Huang X., Frei H.** Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure//Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 26. – P. 138–146. – https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.013

5 **Wang, J., Huo, Y.** Influence of argon arc remelting process on surface qualities of WAAM parts for 316L stainless steel // Materials Chemistry and Physics. – 2025. – Art. 131594. – https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131594

6 **Gu J., Ding J., Williams S. W., Gu H., Ma P., Zhai Y.** The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys//Journal of materials processing technology. – 2016. – Vol. 230. – P. 26–34. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006

7 **Yildiz A. S., Davut K., Koc B., Yilmaz O.** Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 108. – P. 3391–3404. – https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9

8 **Li C., Gu H., Wang W., Wang S., Ren L., Wang Z., Zhai Y.** Effect of heat input on formability, microstructure, and properties of Al–7Si–0.6 Mg alloys deposited by CMT-WAAM process // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – Art. 70. – https://doi.org/10.3390/app10010070

9 **Wang S., Gu H., Wang W., Li C., Ren L., Wang Z., Ma P.** The influence of heat input on the microstructure and properties of wire-arc-additive-manufactured Al-Cu-Sn alloy deposits // Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – Art. 79. – https://doi.org/10.3390/met10010079

10 **Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P.** Wire+ arc additive manufacturing // Materials science and technology. – 2016. – Т. 32. – № 7. – P. 641–647. – https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073

11 **Ma, B. L., Wan, M., Zhang, H., Gong, X. L., Wu, X. D.** Evaluation of the forming limit curve of medium steel plate based on non-constant through-thickness normal stress // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 33. – P. 175–183. – https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.012

12 **Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., Wang, F.** Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – № 6. – P. 1377–1386. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002

13 **Sun, Y., Li, Y., Daniel, W. J., Meehan, P. A., Liu, Z., Ding, S.** Longitudinal strain development in Chain-die forming AHSS products : Analytical modelling, finite element analysis and experimental verification // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 243. – P. 322–334. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.019

14 **Jiang, W., Li, S., Luo, Y., Xu, S., Gong, J., Tu, S. T.** An analytical model to predict the equivalent creep strain rate of a lattice truss panel structure // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 661. – P. 152–159. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.028

15 **Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Britton, T. B., Gardner, L.** Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels // Materials & Design. – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544

16 **Чукенова, Э. С., Нугман, Е. З., Мустафа, А. К., Хошна, Ф., Дюсебаев, И. М.** Белсенді және инертті газдардың WAAM технологиясы арқылы өндірілген болаттың микроқұрылымына әсері // Қазақстан ғылымы мен техникасы. – 2025. – № 3. – P. 182–194. – https://doi.org/10.48081/PGVW6395

17 **Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., Williams, S.** Development of Wire+ Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Vol. 82. – P. 329–335. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009

18 **Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M.** Unveiling the characteristics of ER70S-6 low carbon steel alloy produced by wire arc additive manufacturing at different travel speeds // Metals and Materials International. – 2025. – Vol. 31. – № 2. – P. 325–338. – https://doi.org/10.1007/s12540-024-01766-x

19 **Karamimoghadam, M., Rezayat, M., Contuzzi, N., Denora, V., Mateo, A., Casalino, G.** Effect of wire feed rate on ER70S-6 microstructure of wire arc additive manufacturing process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 137. – № 5. – P. 2947–2961. – https://doi.org/10.1007/s00170-025-15334-z

20 **Zhai, W., Guo, Y., Canturri, C., Shandro, R., Zhou, W.** Wire arc additive manufacturing of ER70S-6/S355 bimetal component // Materials Science and Engineering : A. – 2024. – Vol. 900. – P. 146498. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146498

REFERENCES

1 **Jeyaprakash Natarajan, Muralimohan Cheepu, Che-Hua Yang.** Advances in Additive Manufacturing Processes. – Bentham : Science Publishers. – 2021. – http://dx.doi.org/10.2174/9789815036336121010 1

2 **Ji L., Lu J., Liu C., Jing C., Fan H., Ma S.** Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2017. – Vol. 128. – P. 03006. – https://doi.org/10.1051/matecconf/201712803006

3 **Qin, H., Zhu, W., Zhang, H.** Effect of process parameters on bead geometry and microstructure of the stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing // Journal of Alloys and Metallurgical Systems. – 2025. – 100231. – https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100231

4 **Dinovitzer M., Chen X., Laliberte J., Huang X., Frei H.** Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure//Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 26. – P. 138–146. – https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.013

5 **Wang, J., Huo, Y.** Influence of argon arc remelting process on surface qualities of WAAM parts for 316L stainless steel // Materials Chemistry and Physics. – 2025. – Art. 131594. – https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131594

6 **Gu J., Ding J., Williams S. W., Gu H., Ma P., Zhai Y.** The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys//Journal of materials processing technology. – 2016. – Vol. 230. – P. 26–34. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006

7 **Yildiz A. S., Davut K., Koc B., Yilmaz O.** Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 108. – P. 3391–3404. – https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9

8 **Li C., Gu H., Wang W., Wang S., Ren L., Wang Z., Zhai Y.** Effect of heat input on formability, microstructure, and properties of Al–7Si–0.6 Mg alloys deposited by CMT-WAAM process // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – Art. 70. – https://doi.org/10.3390/app10010070

9 **Wang S., Gu H., Wang W., Li C., Ren L., Wang Z., Ma P.** The influence of heat input on the microstructure and properties of wire-arc-additive-manufactured Al-Cu-Sn alloy deposits // Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – Art. 79. – https://doi.org/10.3390/met10010079

10 **Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P.** Wire+ arc additive manufacturing // Materials science and technology. – 2016. – Т. 32. – № 7. – P. 641–647. – https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073

11 **Ma, B. L., Wan, M., Zhang, H., Gong, X. L., Wu, X. D.** Evaluation of the forming limit curve of medium steel plate based on non-constant through-thickness normal stress // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 33. – P. 175–183. – https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.012

12 **Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., Wang, F.** Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – № 6. – P. 1377–1386. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002

13 **Sun, Y., Li, Y., Daniel, W. J., Meehan, P. A., Liu, Z., Ding, S.** Longitudinal strain development in Chain-die forming AHSS products : Analytical modelling, finite element analysis and experimental verification // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 243. – P. 322–334. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.019

14 **Jiang, W., Li, S., Luo, Y., Xu, S., Gong, J., Tu, S. T.** An analytical model to predict the equivalent creep strain rate of a lattice truss panel structure // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 661. – P. 152–159. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.028

15 **Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Britton, T. B., Gardner, L.** Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels // Materials & Design. – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544

16 **Chukenova, E. S., Nugman, E. Z., Mustafa, A. K., Hoshnau F., Dyusebaeyv I. M.** Belsendı jane inerttı gazdardyñ WAAM tehnologiasy arqyly ondırılgen bolattyn mikroqurylymyna aserı [Effect of active and inert gases on the microstructure of steel produced by waam technology] // Science and Technology of Kazakhstan. – 2025. – №. 3. – P. 182–194. – https://doi.org/10.48081/PGVW6395

17 **Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., Williams, S.** Development of Wire+ Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Vol. 82. – P. 329–335. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009

18 **Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M.** Unveiling the characteristics of ER70S-6 low carbon steel alloy produced by wire arc additive manufacturing at different travel speeds // Metals and Materials International. – 2025. – Vol. 31. – № 2. – P. 325–338. – https://doi.org/10.1007/s12540-024-01766-x

19 **Karamimoghadam, M., Rezayat, M., Contuzzi, N., Denora, V., Mateo, A., Casalino, G.** Effect of wire feed rate on ER70S-6 microstructure of wire arc additive manufacturing process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 137. – № 5. – P. 2947–2961. – https://doi.org/10.1007/s00170-025-15334-z

20 **Zhai, W., Guo, Y., Canturri, C., Shandro, R., Zhou, W.** Wire arc additive manufacturing of ER70S-6/S355 bimetal component // Materials Science and Engineering : A. – 2024. – Vol. 900. – P. 146498. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146498

Received 20.04.26.
Received in revised form 24.04.26.
Accepted for publication 19.07.26

Э. С. Чукенова[1], Е.З. Нугман[2], А. К. Мустафа[3], М. Қ. Сағынтай[4], Ф. Хошнау[5]
[1,2,3,4]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[5]Де Монфорт университеті, Ұлыбритания, Лестер қ.
20.04.26 ж. баспаға түсті.
24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
19.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТӨМЕН КӨМІРТЕКТІ БОЛАТТЫ WAAM ӘДІСІМЕН MIG ДӘНЕКЕРЛЕУ АРҚЫЛЫ ЭКВИВАЛЕНТТІ ЖАҒДАЙЛАРДА АЛУ

Бұл зерттеуде Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) аддитивті технологиясын пайдалану арқылы алынған төмен көміртекті болат үлгілерінің микроструктурасы мен механикалық қасиеттеріне дағалық процесс параметрлерінің әсері зерттелді. WAAM жүйесіне ұқсас қалыптастыру жағдайларын қамтамасыз ету үшін MIG/MAG дәнекерлеу қондырғысы мен токарлық станок қолданылды. MIG/MAG дәнекерлеу аппараты жылу көзі ретінде қызмет атқарса, токарлық станок қабаттарды тік бағытта біртіндеп қалыптастыру үшін негіздің қозғалысын қамтамасыз етті.

Үлгілер MIG/MAG режимінде Magnetta 220 S дәнекерлеу жүйесін қолдану арқылы дайындалды. Эксперимент барысында келесі технологиялық параметрлер пайдаланылды: дәнекерлеу тогы – 53 А, кернеу – 14,8 В, жанаргының жылжу жылдамдығы – 3,5 мм/с, сым беру жылдамдығы – 3 м/мин.

Металлографиялық талдау нәтижесінде алынған үлгілерде бағытталған кристалдану құрылымының қалыптасқаны анықталды. Микроструктура негізінен ферриттік матрицадан және перлит колонияларынан тұрады, бұл беріктік пен пластикалылықтың тиімді үйлесімін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, микрокаттылық мәндері 154–166 HV1 аралығында болып, орташа мәні 161 HV1 құрады.

Алынған нәтижелер WAAM технологиясы арқылы өндірілген төмен көміртекті болаттың салыстырмалы түрде біртекті микроструктурага және жоғары механикалық қасиеттерге ие екенін көрсетеді.

Кілтті сөздер: аддитивті өндіріс, WAAM технологиясы, төмен көміртекті болат, микроструктура, механикалық қасиеттер.

Э. С. Чукенова[1], Е. З. Нұгман[2], А.К. Мустафа[3], М. Қ. Сағынтай[4], Ф. Хошнау[5]
[1,2,3,4]Университет имени Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[5]Университет Де Монфорта, Великобритания, г. Лестер,
Поступило в редакцию 20.04.26.
Поступило с исправлениями 24.04.26.
Принято в печать 19.07.26.

WAAM НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MIG-СВАРКИ В ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УСЛОВИЯХ

В данном исследовании было изучено влияние параметров дугового процесса на микроструктуру и механические свойства образцов, полученных из низкоуглеродистой стальной проволоки с использованием технологии аддитивного производства Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Для формирования условий наплавления, аналогичных системе WAAM, были использованы установки MIG/MAG -сварки и токарный станок. Сварочный аппарат MIG/MAG выступал в качестве источника тепла, тогда как токарный станок обеспечивал перемещение подложки для реализации вертикального послойного формирования.

Образцы изготавливались в режиме MIG/MAG с использованием сварочной системы Magnetta 220 S. В ходе экспериментов применялись следующие технологические параметры: сварочный ток – 53 А, напряжение – 14,8 В, скорость перемещения горелки – 3,5 мм/с, скорость подачи проволоки – 3 м/мин.

Металлографический анализ показал формирование направленной структуры кристаллизации в наплавленных образцах. Микроструктура преимущественно состояла из ферритной матрицы с перлитными колониями, что обеспечивает благоприятное сочетание прочности и пластичности. Кроме того, значения микротвердости находились в диапазоне 154–166 HV1, при среднем значении 161 HV1.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что низкоуглеродистая сталь, изготовленная с применением технологии WAAM, характеризуется относительно однородной микроструктурой и высокими механическими свойствами.

Ключевые слова: аддитивное производство, технология WAAM, низкоуглеродистая сталь, микроструктура, механические свойства.

МРНТИ 55.53.13; 68.85.39

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/272-285

А. А. Шайкемелов[1], Ж. А. Бекмырза[2], Т. В. Бедыч[3]

[1,2]ТОО «Завод элеваторного оборудования «Астык»,
Республика Казахстан, г. Костанай;
[1,2]Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы,
Республика Казахстан, г. Костанай;
[3]Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова,
Республика Казахстан, г. Костанай.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0498-8338
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5086-4127
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3642-8917
*e-mail: adil_shaikemelov@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНО-РЕШЕТНЫХ СЕПАРАТОРОВ ЗЕРНА

В статье проанализированы современные конструкции воздушно-решётных зерноочистительных сепараторов, работающих в режимах первичной и вторичной очистки. Показано, что эффективность разделения зернового вороха существенно зависит от согласования аэродинамических характеристик компонентов с параметрами воздушного потока и кинематикой решёт. Предложена инженерная методика расчёта и оптимизации конструктивных и режимных параметров аспирационных каналов, позволяющая повысить полноту выделения лёгких и трудноотделимых примесей при минимальных потерях основной культуры.

На основе проведенного анализа научных исследований в области пневмосепарации и вибрационного разделения автором предлагается подход к оптимизации конструктивных и режимных параметров сепаратора, обеспечивающий повышение качества очистки и снижение потерь основной культуры. Формулируются принципы согласования параметров воздушного потока, геометрии аспирационных каналов и кинематики решётных поверхностей. Построен график распределения компонентов зернового вороха по скорости витания и положение рабочей скорости воздуха в пневмоканале. Визуально доказано, что именно различие в значениях «скорости витания» для полноценного зерна и примесей определяет возможность их разделения воздушным потоком.

Показано, что применение усовершенствованных схем аспирации и рациональных режимов работы позволяет повысить эффективность удаления лёгких и трудноотделимых примесей. Доказано, что комплексный учет аэродинамических и механических факторов является главным условием повышения производительности и качества очистки зерна.

Ключевые слова: зерноочистительные машины, аспирационный канал, эффективность очистки, сепаратор, скорость витания, примесь.

Введение

С 2023 по 2025 год Казахстан демонстрирует рекордные показатели производства зерна, с 16 млн га при средней урожайности 17 ц/га намолочено 27,1 млн тонн. В 2024 году этот показатель составлял 16,2 ц/га [1]. Учитывая нарастание производства зерна, остается актуальным вопрос дальнейшей урожайности посевов. Основными факторами влияющие на качество посевов являются сорт семян, высокая очистка, минимальные разрушения зёрен, климатические условия, правильное хранение и так далее [2; 3].

Современные требования к качеству семян и энергоэффективности диктуют необходимость перехода от многостадийных схем очистки к фракционным технологиям. Традиционные линии с последовательным удалением фракций увеличивают металлоёмкость и травмирование зерна [4]. В ответ на это прослеживается тенденция к интеграции процессов сепарации в одном устройстве. Развитие фракционного принципа, при котором ворох разделяется на целевую, фуражную и отходную фракции на ранней стадии, позволяет снизить нагрузку на последующие машины и повысить сохранность биологически полноценного зерна [2]. Ключевую роль в реализации этого подхода играют двухаспирационные воздушно-решётные машины. Сочетание дорешётной (удаление легких примесей) и послерешётной (выделение щуплого зерна) аспирации с решётным разделением позволяет достичь полноты очистки до 80–85 % за один проход [1; 5]. Как показывает анализ [3; 6; 7; 8; 9] научных работ, эффективность таких систем зависит от аэродинамики пневмоканалов. Однако в работе [10] трактуют поток как неоднородную газо-частичную среду с учетом числа Рейнольдса и концентрации фаз, то инженерные методики проектирования в работе [6] часто опираются на упрощенные модели. Разрыв между сложным CFD-моделированием и практическим расчетом геометрии, а именно площади решет, расхода воздуха остается значительным.

Применение кольцевых и зигзагообразных каналов обеспечивает многократное воздействие потока [3; 7], но требует выравнивания поля скоростей во избежание уноса полноценного зерна [11]. Дисковые распределители [8] повышают равномерность подачи, однако увеличение подачи материала свыше оптимальной снижает эффект очистки, что указывает на необходимость согласования производительности с критерием *Re*. Настоящая работа направлена на преодоление разрыва между обобщенными экспериментальными данными и инженерным расчетом. Авторами предложена методика оценки эффективности сепарации, основанная на аналитической модели движения частицы, дополненной эмпирическими коэффициентами для учета взаимовлияния частиц в плотном потоке.

Разработана инженерная методика расчёта и оптимизации параметров воздушно-решётных зерноочистительных сепараторов, объединяющая аналитическую модель движения частицы, вероятностную модель выделения промежуточной фракции и интегральный расчёт эффективности без применения CFD-моделирования. Методика отличается от существующих подходов

возможностью оперативного проведения вариантных инженерных расчётов с достаточной для практики точностью.

Материалы и методы

Исследование основано на анализе и обобщении современных научных работ, посвящённых процессам сепарации зерновых материалов в воздушных и воздушно-решётных системах [12; 13]. В качестве теоретической базы использованы результаты исследований по математическому моделированию движения зерна в воздушном потоке, представленные в работах [2; 8; 11; 14; 15].

Методика исследования включает:

– анализ аэродинамических свойств зернового вороха и примесей;

– рассмотрение закономерностей движения частиц в воздушном потоке на основе уравнений равновесия сил;

– оценку влияния скорости воздушного потока на процесс разделения.

В работе также применён сравнительный анализ конструктивных решений аспирационных каналов, что позволяет оценить влияние геометрии канала на устойчивость воздушного потока и эффективность сепарации [16].

Инженерная методика оценки эффективности сепарации

Разработанная авторами инженерная методика представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов расчета, обеспечивающую переход от аэродинамических характеристик отдельных компонентов вороха к показателям эффективности и производительности сепараторов. Все расчеты выполнены при стандартных атмосферных условиях: температура воздуха +20 °С; атмосферное давление 101,325 кПа, плотность воздуха $\rho_в$ = 1,204 кг/м^3. Для устранения противоречий, возникающих при использовании идеализированных моделей, разработана четырехэтапная инженерная методика.

Скорость витания одиночной частицы $v_в$ определяется по формуле

$$v_в = \sqrt{\frac{2gm}{k\rho_в S}} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения м/с^2, m – масса частицы, кг, k – коэффициент аэродинамического сопротивления, $\rho_в$ – плотность воздуха, S – площадь миделева сечения частицы, м^2 [5].

Для оценки подхода в условиях реального пневмоканала сепаратора необходимо оценить степень стесненности потока. Объемная доля твердой фазы α в рабочем сечении канала определяется соотношением:

$$\boldsymbol{\alpha = \frac{Q_m}{\rho_{нас} \cdot v_p \cdot A_c}} \quad (2)$$

где Q_m – массовая подача материала, $p_{нас}$ – насыпная плотность зернового слоя в движении, v_p – средняя скорость движения компонентов вороха вдоль канала, A_c – площадь поперечного сечения аспирационного канала.

При проведении инженерных расчётов принято допущение, что объёмная концентрация материала в канале не превышает 0,05, что позволяет использовать модель движения одиночной частицы с введением эмпирических поправок на стеснённость потока. Именно различие в значениях для полноценного зерна и примесей определяет возможность их разделения воздушным потоком [17; 18].

Рабочая скорость воздуха в канале принимается равной значению, при которой обеспечивается разделение фракций: лёгкие примеси уносятся восходящим потоком, а полноценное зерно осаждается. Для прогнозирования доли выделения фуражной фракции используется подход, основанный на нормальном распределении скоростей витания вокруг среднего значения вследствие турбулентных пульсаций (Re > 4000).

Расчет параметров потока и производительности. Характер течения в канале оценивается числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_в v_п d}{\mu} \quad (3)$$

где $v_п$ – характерная скорость потока, d – характерный размер частицы или канала, μ – динамическая вязкость воздуха.

При температуре +20 °С и нормальном атмосферном давлении μ=1,81х10^{-5} Па · с. Выбор этого значения обоснован стандартными условиями для инженерных расчётов пневмосистем зерноочистительного оборудования, где температура воздуха в каналах близка к комнатной, а отклонения в пределах 10–15 % не оказывают существенного влияния на число *Re* в турбулентном режиме.

Вероятность уноса частицы аппроксимируется функцией Лапласа от относительной разницы скоростей:

$$P \approx Ф\left(\frac{v_п - v_в}{\sigma}\right) \quad (4)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение скорости в канале, примем $\sigma \approx 1.2$ м/с. Для фуражного зерна: $P_{фур} = Ф((8.0 - 7.5)/1.2) = Ф(0.417) \approx 0.66$.

Общая эффективность очистки E рассчитывается как сумма выделенных масс по следующей формуле:

$$E = \frac{m_{легк} \cdot 1.0 + m_{фур} \cdot 0.66}{m_{исх}^{прим}} \quad (5)$$

При содержании сорной примеси 2 % и фуражного зерна 4 % что типично для вороха после комбайна, подставляя значения, получаем:

$$E = (0.02 \cdot 1.0 + 0.04 \cdot 0.66)/0.06 = (0.02 + 0.0264)/0.06 = 0.0464/0.06 \approx 0.77\ (77\%)$$

Дополнительный вклад решетной очистки от крупных примесей увеличивает итоговый показатель до 80–82 % [5].

Производительность сепаратора Q определяется пропускной способностью решетного стана:

$$Q = q_{уд} \cdot S_р \quad (6)$$

где $q_{уд}$ – допустимая удельная нагрузка, $S_р$ – площадь решет.

Для примера расчета геометрии машины примем $F \approx 6.0$ м², конструктивно обоснованная площадь для стационарного сепаратора средней мощности. Для режима предварительной очистки $q_{уд} \approx 12 - 14$ т/(ч·м²), следовательно: $Q = 13 \cdot 6.0 = 78 \approx 80$ т/ч, а в семенном режиме нагрузка снижается ($q_{уд} \approx 4$ т/(ч·м²)) для повышения селективности решет: $Q = 24$ т/ч.

Мощность привода вентилятора N оценивается через расход $Q_в$:

$$N = \frac{Q_в \cdot \Delta P}{\eta} \quad (7)$$

где $Q_в$ – расход воздуха, ΔP – полное сопротивление системы, $\eta_в$ – КПД вентилятора.

Оптимизация геометрии диффузора позволяет удерживать ΔP на низком уровне, что вкупе с уравнением динамики частиц $m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F$ учитывающим силу аэродинамического сопротивления и тяжести позволяет рассчитать траекторию и подтвердить, что частица не достигает стенок отвода до момента сепарации.

Дополнительно производительность сепаратора будет корректироваться с учётом изменения свойств исходного материала. Снижение производительности при увеличении влажности и засорённости объясняется изменением аэродинамических характеристик частиц (увеличение массы, изменение коэффициента сопротивления), что напрямую следует из формулы скорости витания и подтверждается исследованиями.

Результаты и обсуждение

Для зерновых смесей реализуется переходный или турбулентный режим течения, при котором распределение скоростей и взаимодействие частиц с потоком носят сложный неоднородный характер. Это требует обеспечения равномерного поля скоростей по сечению канала, что достигается конструктивными мерами и обосновывает выбранный расход воздуха и геометрию пневмоканала.

Для «идельных» условий очистки пшеницы зададим три класса частиц (Таблица 1). В таблице 1 приведены сравнения теоретических расчетов предложенной математической модели с экспериментальными данными.

Все инженерные расчёты эффективности сепарации в настоящей работе выполнены при стандартных атмосферных условиях: температура воздуха +20 °C, атмосферное давление 101,325 кПа, плотность воздуха $\rho_в$ = 1,204 кг/м³.

В данном случае является эмпирическим коэффициентом, учитывающим не только лобовое сопротивление, но и особенности парусности зерновки

в стесненных условиях. Среднее значение коэффициента для пшеницы 0.3–0.55; ячмень – 0.40–0.60; овес – 0.55-0.65; для примесей составляет от 0.45 до 1.20.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования разделения

Фракция	Масса m, мг	Площадь S, мм²	k (коэф. формы)	$v_в$ расч., м/с	$v_в$ эксп., м/с
Легкая примесь	5	10	0.45	4.26	4.2
Щуплое/фуражное зерно	25	18	0.40	7.52	7.5
Полноценное зерно	40	20	0.35	9.65	9.8

Значения расчётной и экспериментальной $v_в$, м/с скорости витания отражены в виде графика на Рисунке 1.

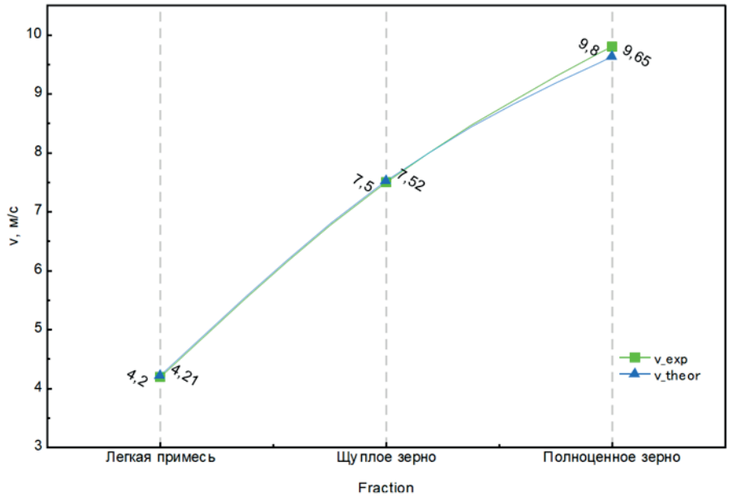


Рисунок 1 – График сравнения $v_в$, м/с скорости витания

Для зерна пшеницы типичная скорость витания составляет 8–10 м/с, для лёгких сорных примесей 3–5 м/с. При скорости $v_п = 8$ м/с и характерном размере канала $d = 0.15$ м, $Re \approx 8 \cdot 10^4$, что соответствует развитому турбулентному режиму. Это обосновывает необходимость конструктивных мер по выравниванию эпюры скоростей. Например, применение сеток или перфорации на входе заложенных в конструкцию современного сепаратора.

Для расчета параметров сепаратора использован подход, сочетающий фундаментальные уравнения аэродинамики единичной частицы с корректирующими коэффициентами, учитывающими стесненность потока и взаимовлияние фракций. Такая инженерная аппроксимация позволяет избежать громоздкого CFD (Computational Fluid Dynamics)-моделирования, сохраняя физическую обоснованность результата.

Примем скорость воздушного потока в канале $v_п = 8.0$ м/с. Очевидно, что легкая примесь (4.2 м/с < 8.0м/с) гарантированно уносится. Фуражное зерно (7.5м/с ≈ 8.0м/с) находится в зоне неопределенности: часть уйдет в отходы, часть выпадет в товарное зерно. Полноценное зерно (9.8м/с > 8.0м/с) должно осаждаться. Аэродинамические свойства зернового материала оценивались методом пневмоклассификации в вертикальном восходящем потоке. Полученная гистограмма на рисунке 2 отражает распределение компонентов после прохождения предварительной решетной очистки.

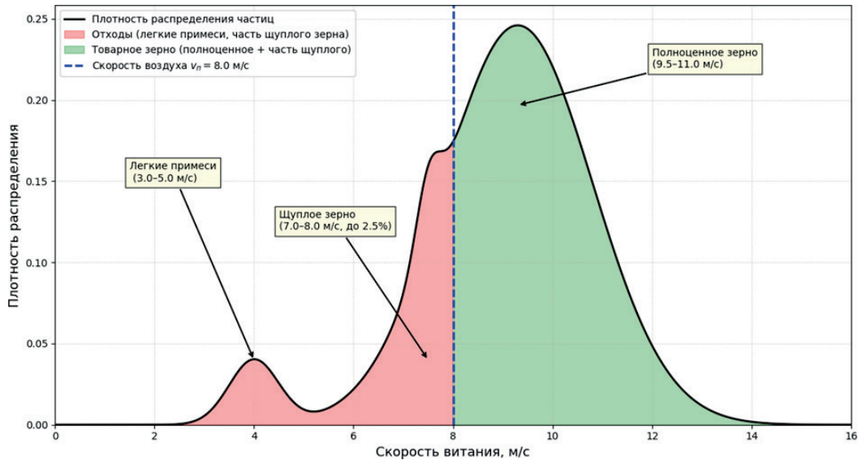


Рисунок 2 – Распределение компонентов зернового вороха по скорости витания и положение рабочей скорости воздуха в пневмоканале ($v_п = 8.0$ м/с). Красной линией обозначена установленная скорость воздушного потока в пневмосепарирующем канале

Основной модальный пик в диапазоне 9.5–11.0 м/с соответствует фракции биологически полноценного, выполненного зерна пшеницы, где плотность 1.3–1.4 г/см³, масса 1000 зёрен 40–45 г. Наличие локального пика в области 7.0–8.0 м/с (доля до 2.5 %) характеризует присутствие щуплого и дробленого зерна, а подъем кривой в области 3.0–5.0 м/с означает содержание легких органических примесей. Именно разница в модальных значениях этих пиков и скорости воздушного потока $v_п$=8.0 м/с является физической основой для расчета эффективности сепарации E≈80 %.

Сравнение с существующими CFD-подходами показывает, что предложенный метод имеет приницпиальные отличия показанные в таблице 2.

Таблица 2 – сравнение с CFD-подходами

Параметры	Предложенная модель	CFD-подход
Фундаментальная основа	Аналитико-эмпирический макроуровень на базе уравнения равновесия сил	Численное решение системы уравнений Навье-Стокса и движения частиц на микроуровне [10; 11]
Учет турбулентности и геометрии	Интегральный, через нормированную функцию Лапласа и среднеквадратичное отклонение потока	Прямой расчет локальных турбулентных вихрей, зон отрыва и противотока в каналах сложной формы [4; 8; 15]
Сложность	Оптимальная	Высокая [10; 11]
Применение	Расчет кинематических параметров, площади пневмоканала и мощности привода	Оптимизация аэродинамики, визуализация потоков [4; 15]

Преимущество разработанной методики заключается в отсутствии потребности в ресурсоемких вычислениях. При этом предложенная методика сохраняет строгую физическую обоснованность процесса сепарации благодаря использованию вероятностной функции распределения Лапласа. Это обеспечивает высокую сходимость результатов на макроуровне, исключая необходимость громоздкого вычисления траекторий движения каждой отдельной зерновки в потоке.

Выводы

Таким образом, повышение эффективности зерноочистительных сепараторов достигается за счёт комплексной оптимизации аэродинамических параметров воздушного потока, геометрии аспирационных каналов и кинематических характеристик решет.

Применение усовершенствованных аспирационных систем, включая многоканальные и кольцевые схемы, способствует повышению равномерности воздушного потока и снижению турбулентности, что положительно влияет на качество очистки. В свою очередь, сочетание пневматической и решётной сепарации позволяет эффективно удалять как лёгкие, так и трудноотделимые примеси.

Использование математического моделирования процессов движения зерна и примесей в воздушной среде является обоснованием параметров работы сепаратора. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных подходов при проектировании и модернизации зерноочистительных машин для различных технологических режимов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Итоги уборочной кампании-2025: намолочены рекордные объемы зерна благодаря господдержке и переходу на современные технологии – Официальный информационный ресурс Премьер-министра Республики Казахстан 05 Ноябрь 2025, 11:00. – [Электронный ресурс]. – https://primeminister.kz/ru/news/reviews/itogi-uborocnoi-kampaniia-2025-namoloceny-rekordnye-obieemy-zerna-blagodaria-gospodderzke-i-perexodu-na-sovremennye-texnologii-30788

2 **Orobinsky, V., Gievsky, A., Baskakov, I., Gulevsky, V., Chernyshov, A.** Analysis and features of operation of fractional grain cleaners and secondary seed cleaning separators. IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2021. – 845. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012064.

3 **Глушков, А. Л.** Анализ конструкций и технологического процесса зерноочистительных машин, работающих по пневмофракционной технологии (обзор) // Agricultural Science Euro-North-East. – 2025 – 26(3) – С. 519–535. – https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.519-535.

4 **Бауер, А. А., Стрикунов, Н. И., Леканов, С. В., Родин, Р. В.** Разработка пневмосепаратора с кольцевым многоярусным аспирационным каналом // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 11 (229). – https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-229-11-88-93.

5 **Giyevskiy, A., Orobinsky, V., Tarasenko, A., Chernyshov, A., & Kurilov, D.** Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 327. – https://doi.org/10.1088/1757-899x/327/4/042035.

6 **Тишанинов, К. Н.** Анализ конструкций пневмосепарирующих систем // Science in the central Russia. – 2023. – № 5 (65) – https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-86-95

7 **Бурков, А. И., Глушков, А. Л., Лазыкин, В. А., Мокиев, В. Ю.** Повышение эффективности пневмосепарирующего устройства машины предварительной очистки зерна // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24. – № 4. – С. 22–27. – https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-22-27

8 **Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R. Hryshchenko, V.** Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel // Journal of Central European Agriculture – 2023. – https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732

9 **Muratov, D., Muratova, E., Kravchenko, E., Sukhoveeva, A. Andreeva, O.** Innovative study on pneumatic separation of grain heap and economic feasibility of design versions. E3S Web of Conferences 2020. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021005010.

10 **Orobinsky, V., Baskakov, I., Chernyshov, A., Gulevsky, V., Gievsky, A.** Two-aspiration air-sieve grain cleaning machines of new generation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022 – 954. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012056

11 **Badretdinov, I., Mudarisov, S., Tuktarov, M., Dick, E., Arslanbekova, S.** Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – https://doi.org/10.5937/jaes17-22640

12 **Chernyakov, A., Koval, V., Yatsunov, A., Begunov, M., Shevchenko, A. and Evchenko, A.** Research of a conical pneumatic grain separator with a device for forced light fraction removal. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 659. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012041.

13 **Oleksii, V., Kateryna, V., Serhii, M., Mykola, E., Larysa, A.** The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. Inmateh Agricultural Engineering. – 2019. – 57(1). – P. 63–70.

14 **Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Aneliak, M., Volyk, D., Melnyk, V. Kalinichenko, R.** Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. Journal of Central European Agriculture. – 2025. – https://doi.org/10.5513/jcea01/26.2.4301.

15 **Andreev, V., Shilin, V., Ilichev, V. Holodenina, T.** Development of the pneumatic system with an annular aspiration channel for vibrating and rotation grain separator. BIO Web of Conferences. – 2022. – https://doi.org/10.1051/bioconf/20224203009.

16 **Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. and Stepanenko, S.** Experimental Study in a Pneumatic Microbiocature Separator with Apparatus Camera. Series II – Forestry – Wood Industry – // Agricultural Food Engineering. – 2020. – https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10

17 **Greyvensteyn, P., Koekemoer, O., Grobler, L. Vorster, D.** Design and Testing of a Pneumatic Grain Aspirator for Efficient Separation of Impurities. Proceedings of the 9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering. – 2023. – https://doi.org/10.11159/icmie23.141.

18 **Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. Stepanenko, S.** Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders // Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II Forestry – Wood Industry – Agricultural Food Engineering. – 2020. – 13. – P. 117–128. – https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11

REFERENCES

1 Itogi uborochnoj kampanii-2025 : namolocheny` rekordny`e ob``emy` zerna blagodarya gospodderzhke i perexodu na sovremenny`e texnologii [Results of the 2025 harvesting campaign: record volumes of grain were threshed thanks to state support and the transition to modern technologies]- Oficial`ny`j informacionny`j resurs Prem`er-ministra Respubliki Kazaxstan 05 Noyabr` 2025, 11:00. [Electronic resource]. – https://primeminister.kz/ru/news/reviews/itogi-uborocnoi-kampaniia-2025-namoloceny-rekordnye-obieemy-zerna-blagodaria-gospodderzke-i-perexodu-na-sovremennye-texnologii-30788

2 **Orobinsky, V., Gievsky, A., Baskakov, I., Gulevsky, V., Chernyshov, A.** Analysis and features of operation of fractional grain cleaners and secondary seed cleaning separators. IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2021. – 845. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012064.

3 **Glushkov, A. L.** Analiz konstrukcij i texnologicheskogo processa zernoochistitel`ny`x mashin, rabotayushhix po pnevmofrakcionnoj texnologii (obzor) [Analysis of the design and technological process of grain cleaning machines operating using pneumatic fractionation technology (review)] // Agricultural Science Euro-North-East. – 2025. – 26(3) – P. 519–535. – https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.519-535.

4 **Bauer, A. A., Strikunov, N. I., Lekanov, S. V., Rodin, R. V.** Razrabotka pnevmoseparatora s kol`cevy`m mnogoyarusny`m aspiracionny`m kanalom [Development of a pneumatic separator with a ring-shaped multi-tiered aspiration channel] // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – № 11 (229). – 2023. – https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-229-11-88-93

5 **Giyevskiy, A., Orobinsky, V., Tarasenko, A., Chernyshov, A., & Kurilov, D.** Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 327. – https://doi.org/10.1088/1757-899x/327/4/042035.

6 **Tishaninov, K. N.** Analiz konstrukcij pnevmosepariruyushhix sistem [Analysis of designs of pneumatic separation systems] // Science in the central Russia. – 2023. – № 5 (65). – 10.35887/2305-2538-2023-5-86-95.

7 **Burkov, A. I., Glushkov, A. L., Lazy`kin, V. A., Mokiev, V. Yu.** Povy`shenie e`ffektivnosti pnevmosepariruyushhego ustrojstva mashiny` predvaritel`noj ochistki zerna [Improving the efficiency of the pneumatic separation device of a grain pre-cleaning machine] // Agroinzheneriya. – 2022. – T. 24. – № 4. – C. 22–27. – https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-22-27.

8 **Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R. Hryshchenko, V.** Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel // Journal of Central European Agriculture – 2023. – https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732

9 **Muratov, D., Muratova, E., Kravchenko, E., Sukhoveeva, A. Andreeva, O.** Innovative study on pneumatic separation of grain heap and economic feasibility of design versions. E3S Web of Conferences 2020. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021005010.

10 **Orobinsky, V., Baskakov, I., Chernyshov, A., Gulevsky, V., Gievsky, A.** Two-aspiration air-sieve grain cleaning machines of new generation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022 – 954. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012056

11 **Badretdinov, I., Mudarisov, S., Tuktarov, M., Dick, E., Arslanbekova, S.** Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – https://doi.org/10.5937/jaes17-22640

12 **Chernyakov, A., Koval, V., Yatsunov, A., Begunov, M., Shevchenko, A. and Evchenko, A.** Research of a conical pneumatic grain separator with a device for forced light fraction removal. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 659. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012041.

13 **Oleksii, V., Kateryna, V., Serhii, M., Mykola, E., Larysa, A.** The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. Inmateh Agricultural Engineering. – 2019. – 57(1). – P. 63–70.

14 **Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Aneliak, M., Volyk, D., Melnyk, V. Kalinichenko, R.** Mathematical modeling of grain movement dynamics in

the processes of air-centrifugal separation of grain material. Journal of Central European Agriculture. – 2025. – https://doi.org/10.5513/jcea01/26.2.4301.

15 **Andreev, V., Shilin, V., Ilichev, V. Holodenina, T.** Development of the pneumatic system with an annular aspiration channel for vibrating and rotation grain separator. BIO Web of Conferences. – 2022. – https://doi.org/10.1051/bioconf/20224203009.

16 **Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. and Stepanenko, S.** Experimental Study in a Pneumatic Microbiocature Separator with Apparatus Camera. Series II – Forestry – Wood Industry – // Agricultural Food Engineering. – 2020. – https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10

17 **Greyvensteyn, P., Koekemoer, O., Grobler, L. Vorster, D.** Design and Testing of a Pneumatic Grain Aspirator for Efficient Separation of Impurities. Proceedings of the 9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering. – 2023. – https://doi.org/10.11159/icmie23.141.

18 **Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. Stepanenko, S.** Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders // Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II Forestry – Wood Industry – Agricultural Food Engineering. – 2020. – 13. – P. 117–128. – https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11

Поступило в редакцию 08.05.26.
Поступило с исправлениями 20.05.26.
Принято в печать 22.07.26.

А. А. Шайкемелов[1], Ж. А. Бекмырза[2], Т. В. Бедыч[3]
[1,2]«Астык» Элеватор қондырғылары зауыты» ЖШС,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.;
[1,2]Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.;
[3]М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.
08.05.26 ж. баспаға түсті.
20.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АУА-ЕЛЕКТІ АСТЫҚ СЕПАРАТОРЛАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУДЫҢ ЗАМАНАУИ ШЕШІМДЕРІ

Бұл мақалада бастапқы және қосымша тазалау тәртібінде жұмыс жасайтын ауа елегімен дән-дақылдарды тазалау сепараторларының заманауи құрылымдары талданады. Дәнді-дақылдарды бөліп ажырату тиімділігі компоненттердің аэродинамикалық сипаттамаларының ауа ағынының параметрлерімен және елек кинематикасымен үйлесіміне айтарлықтай байланысты екені көрсетілген. Аспирациялық арналарды жобалау, жұмыс параметрлерін есептеу және оңтайландырудың инженерлік әдістемесі

ұсынылған. Бұл негізгі дақылдың шығынын азайта отырып, жеңіл және қиын жойылатын қоспалардың бөлінуін арттыруға мүмкіндік береді.

Пневматикалық бөлу және вибрациялық бөлу саласындағы ғылыми зерттеулерді талдау негізінде автор сепаратордың жобалау және жұмыс параметрлерін оңтайландыру тәсілін ұсынады, бұл тазалау сапасын жақсартуды және негізгі дақылдың шығынын азайтуды қамтамасыз етеді. Ауа ағынының параметрлерін, аспирациялық арнаның геометриясын және елек бетінің кинематикасын үйлестіру принциптері тұжырымдалған. Дән үйіндісінің компоненттерінің қалқу жылдамдығы мен пневматикалық құбырдағы ауа жылдамдығының орны бойынша таралуын көрсететін график құрылды. Тұтас дән мен қоспалар арасындағы ауа жылдамдығының айырмашылығы олардың ауа ағынымен бөлінуін анықтайтыны көрнекі түрде көрсетілді.

Жақсартылған аспирациялық схемалар мен ұтымды жұмыс режимдерін пайдалану жеңіл және қиын жойылатын қоспалардың бөліну тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Аэродинамикалық және механикалық факторларды кешенді қарастыру дәнді тазалаудың өнімділігі мен сапасын жақсартудың кілті екені дәлелденген.

Кілтті сөздер: дән тазалау машиналары, аспирация арнасы, тазалау тиімділігі, сепаратор, қалқу жылдамдығы, қоспалар.

***A. A. Shaikemelov[1], Zh. A. Bekmyrza[2], T. V. Bedych[3]**

[1,2]Astyk elevator equipment plant LLP, Republic of Kazakhstan, Kostanay;
[1,2]Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly,
Republic of Kazakhstan, Kostanay;
[3]Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov,
Republic of Kazakhstan, Kostanay.

Received 08.05.26.
Received in revised form 20.05.26.
Accepted for publication 22.07.26.

MODERN SOLUTIONS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF AIR-SIEVE GRAIN SEPARATORS

This article analyzes modern designs of air-sieve grain cleaning separators operating in primary and secondary cleaning modes. It is shown that the efficiency of grain separation depends significantly on the coordination of the aerodynamic characteristics of the components with the airflow parameters and sieve kinematics. An engineering methodology for calculating and optimizing the design and operating parameters of aspiration channels is proposed, allowing for increased separation of light and difficult-to-separate impurities while minimizing losses of the main crop.

Based on an analysis of scientific research in the field of pneumatic separation and vibration separation, the author proposes an approach to optimizing the design and operating parameters of the separator, ensuring improved cleaning quality and reduced losses of the main crop. Principles for coordinating airflow parameters, aspiration channel geometry, and sieve surface kinematics are formulated. A graph

was constructed showing the distribution of grain heap components by their air velocity and the position of the operating air velocity in the pneumatic duct. It was visually demonstrated that it is the difference in air velocity between whole grain and impurities that determines their separation by the air flow.

It is shown that the use of improved aspiration schemes and rational operating modes allows for increased removal efficiency of light and difficult-to-separate impurities. It has been proven that comprehensive consideration of aerodynamic and mechanical factors is the key to improving the productivity and quality of grain cleaning.

Keywords: grain cleaning machines, aspiration channel, cleaning efficiency, separator, floating speed, impurities.

ҒТАМР 55.03.35

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/286-297

***К. Т. Шеров[1], Н. Б. Тулиева[2], Д. З. Мухамедьяров[3],**
Е. Р. Маякин[4], А. Б. Бөбеев[5]
[1,2,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3,4]А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0209-180X
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6625-9545
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5367-7617
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9222-407X
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3378-2949
*e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz

HARDOX БОЛАТЫН БАЛҚИТЫН ЭЛЕКТРОДПЕН ЭЛЕКТРЛІ ДОҒАЛЫ ДӘНЕКЕРЛЕУ ҮРДІСІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада HARDOX болатының балқитын электродпен қолмен электрдоғалық дәнекерлеу кезіндегі дәнекерлену қасиеттерін эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу әдістемесі дәнекерлеу процестерінің теориясы, дәнекерлеу технологиясы мен жабдықтары, машина бөлшектерін жөндеу дәнекерлеу және балқытып қаптау технологиясы, металдар технологиясы сияқты ғылымдар негізінде әзірленді. Дәнекерленген жіктерге жүргізілген визуалды және ультрадыбыстық талдау нәтижесінде оңтайлы температуралық режим сақталған жағдайда (атап айтқанда, дәнекерленетін табақтың қалыңдығына сәйкес ток күшінің оңтайлы мәнін таңдау) ақаулары барынша аз, сапалы дәнекерленген қосылысты алуға болатыны анықталды. Сонымен қатар, технология талаптары бұзылған жағдайда жарықшақтардың пайда болуы және жіктің аймағында металдың құрылымдық өзгеруі мүмкін екені анықталды.

Сонымен қатар, ток күшінің артуымен шағылған дыбыстық импульс деңгейінің де жоғарылайтыны анықталды. Бұл көрсеткіш біртексіздік көлемінің ұлғаюына байланысты конструкцияның морттануын сипаттайды. 80 А ток күшінде шағылған сигналдың көлемі 24%, ал 100 А ток күшін қолдана отырып дәнекерленген үлгіде бұл көрсеткіш 27% болды.

Алынған нәтижелер жоғары температураға төзімді материалдармен, атап айтқанда, HARDOX типті болаттармен жұмыс істеу кезінде дәнекерлеу параметрлерін қатаң бақылау және бетті алдын ала дайындау қажеттілігін растайды. Бұл материалдың тиісті механикалық қасиеттерін сақтау үшін аса маңызды, әсіресе олар жоғары механикалық жүктеме және абразивті тозу жағдайларында қолданылған кезде.

Жұмыстың эксперименттік бөлігі HARDOX болатын дәнекерлеудің ерекшеліктерін, атап айтқанда, материалдың жылулық әсерге және дәнекерленген қосылыстың беріктік сипаттамаларына әсер етуі мүмкін жылу әсер ету аймақтарының пайда болуына сезімталдығын анықтауға мүмкіндік берді.

Кілтті сөздер: HARDOX болаты, электрдоғалық дәнекерлеу, дәнекерленген жігі, ток күші, дәнекерленген қосылыстың беріктігі, визуалды талдау, ультрадыбыстық талдау.

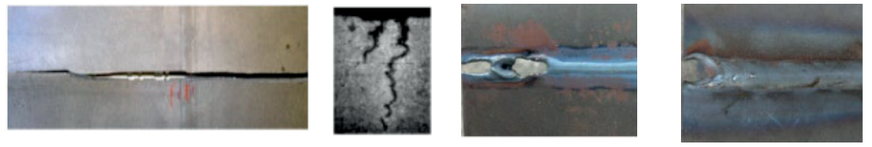
Кіріспе

Дәнекерленгіштік (дәнекерлену қабілеті) – материалдың дәнекерлеу технологиялық процесі нәтижесінде пісірілген, ажырамайтын қосылыс түзу қабілеті, бұл ретте оның қасиеттері мен құрылымы бастапқы материалдан айтарлықтай ерекшеленбейді [1].

Алайда барлық материалдар жақсы дәнекерленіп, сапалы ажырамайтын қосылыстар түзбейді. Осындай материалдардың бірі – ыстыққа төзімді болаттар мен қорытпалар. Ыстыққа төзімді болаттарды дәнекерлеудің негізгі мәселелері – ыстық және суық жарықшақтардың түзілуі, ішкі кернеулердің пайда болуы және тігістің құрылымының тұрақсыздығы.

Бұл мәселелер болаттың қыздырылу кезінде кернеулердің пайда болуына жоғары бейімділігімен, карбид түзуші элементтердің болуымен, сондай-ақ сутектің әсерімен байланысты, сондықтан дәнекерлеу барысында арнайы жағдайларды талап етеді, оған температураны бақылау, материалдар мен режимдерді дұрыс таңдау кіреді. Дәнекерленген қосылыстардағы ақаулардың пайда болуы дәнекерлеу кезіндегі физика-химиялық құбылыстармен де, сондай-ақ технологиялық ауытқулармен де байланысты болуы мүмкін [2; 3].

Дәнекер тігістеріндегі ақауларды жою көп еңбекті қажет ететін операциялар болып табылады және дайын бөлшектің құнын едәуір арттыруы мүмкін. Сондықтан ақаулардың пайда болу ықтималдығын азайту көп жағдайда экономикалық жағынан тиімді болып табылады. 1-суретте қызып кетуден туындаған металл жарықшақтары мен күйіктері көрсетілген.



а) *б)* *в)* *г)*

а – ақаудың сыртқы көрінісі (10ХСНД болат); б – жарықшақтың макрошлифі (10ХСНД болат); в, г – күйік іздері (09Г2С болат)

1-сурет – Қыздырылып кеткен металлдағы жарықшақтар мен күйіктер

Сондай-ақ HARDOX-450 болатынан жасалған бұйымдарды дәнекерлеп дайындағаннан кейін, жабын қабатын жағу процесінде, кей жерлерінде

жарықшақтар пайда болып, тіпті кейбір бөліктері үгітіліп түсіп кеткен жағдайлар да болған. (2 сур қараңыз) [4].



2-сурет – Жабын жағу барысында дәнекерленген бұйымдағы жарықшақтар мен сынықтар

[5; 6] еңбектерінде болаттардың суық сыну шегінің дән шекаралық әсерлердің болуына байланысты жоғарылайтыны анықталған, мысалы, дән өлшемдерінің іріленуі, фосфор мен оттегінің болуы нәтижесінде дән аралық шекаралардың әлсіреуі. [7] еңбегінде беріктік шегі 400 МПа-дан жоғары болаттарда шамадан тыс қыздыру салдарынан дән өлшемдерінің өсуі байқалатындықтан, тігіс маңы аймақтарында морттылықтың артуы орын алатыны және дәнекерлеу қуатын 5 кДж/см-ден аспау қажеттігі атап өтіледі. Мұндай ерекшеліктер бұйым шетіне жылулық ағынның шағылысуы әсер ететін қызып кеткен аймақтардағы дәнекер тігістерінің шеткі бөліктеріне тән.

Термикалық циклді реттеу және жарықшақтардың алдын алу үшін екі доғалы дәнекерлеу әдісі кеңінен қолданылады – ол флюспен, сондай-ақ қорғаныс газдарында жеке ванналарда жүргізіледі [8; 9].

[10] еңбегінде 45Л және 40Х болаттарынан жасалған жетекші тісті доңғалақты дайындау кезінде екі доғалы дәнекерлеу әдісін қолдану мүмкіндігі қарастырылған. Эксперимент барысында дәнекерлеу қорғаныс газдарында жүргізілді. Доғаның арақашықтығы 40 және 80 мм болды. Металл тігісінің және термиялық әсер ету аймағының (ТӘА) шаршау беріктігіне сынақтар жүргізілді, олар негізгі металдың шаршау беріктігімен салыстырмалы жоғары көрсеткіштер берген.

Екі доғалы дәнекерлеуді қолданудың тігістің механикалық қасиеттеріне оң әсері [11; 12] еңбектерінде де атап өтілген.

Дәнекерлеу кезінде жылудың таралу процестері пісірілген қосылыстың геометриясын, құрылымын және механикалық қасиеттерін қалыптастыруда шешуші рөл атқарады. Сонымен қатар, бұл процестерді зерттеу ғылыми тұрғыда күрделі мәселе болып табылады, себебі олар өте жылдам өтеді, тіркеу қиын және көптеген факторлардың әсеріне ұшырайды. Осыған байланысты, жүріп жатқан жылулық процестерді сипаттайтын математикалық модельдер құру және оларды кейіннен эксперименттік тексеру ғылыми және практикалық тұрғыдан қызығушылық тудырады. Жылудың таралуын аналитикалық әдістермен анықтау тек айтарлықтай жорамалдармен мүмкін, ол нәтижелерді едәуір бұрмалауы мүмкін. Сандық әдістер мұндай шектеулерге аз ұшырайды және күрделі есептерде де қолданыла алады. Компьютерлік техниканың дамуы жылулық процестерді модельдеу кезінде сандық әдістердің қолданылуын арттырды.

Материалдар мен әдістері

Тәжірибелік зерттеу әдістері – дәнекерлеу үдерістерінің теориясы, дәнекерлеу технологиясы мен жабдықтары, машиналардың бөлшектерін жөндеу дәнекерлеу және жабу технологиялары, металдар технологиясы, оңтайлы жағдайларды іздеу кезінде корреляция және эксперименттерді жоспарлау теориясы сияқты ғылымдардың негізгі қағидаттарына негізделеді.

Hardox 450 болатын дәнекерлеу бойынша бастапқы эксперименттік зерттеулер жүргізілді.

3-суретте Hardox 450 болатынан жасалған үлгілерді дайындау процесі және дәнекерлеу бекеті көрсетілген.



а) *б)* *в)* *г)*

а – Hardox 450 табағы; б, в – дәнекерлеуге арналған үлгілерді дайындау процесі; г – ВДМ–2х313 дәнекерлеу орны

3-сурет – Hardox 450 болатынан жасалған үлгілерді дайындау процесі және дәнекерлеу орны

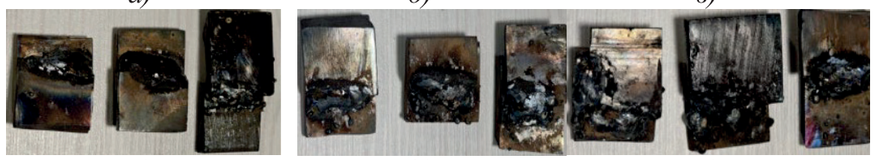
Эксперименттік зерттеулер үшін өлшемдері 50х20 мм, қалыңдығы 10 мм болатын Hardox 450 болатынан жасалған пластиналар пайдаланылды (3б-суретке қараңыз). Үлгілер 180х1,6 мм кескіш абразивті дискісі бар бұрыштық тегістеуішпен кесіліп, алдын ала тегістеуден өтті. Дәнекерлеу әдісі ретінде балқитын электродпен қолмен электр доғалық дәнекерлеу таңдалды (3г-суретке қараңыз).

Қосымша материал ретінде ГОСТ Р ISO 2250–А Е7015–G (AWS5.5) [1] стандартына сәйкес, диаметрі 3 мм УОНИИ жалпы техникалық мақсаттағы электродтары қолданылды. Әрбір дәнекерлеу режимі үшін 3 қайталау жүргізілді.

4-суретте дәнекерленген үлгілер көрсетілген.



а) б) в)



г) д) е)

а, б, в – түйістіріп дәнекерленген үлгілер; г, д, е – айқастырып (жөнкейтіп) дәнекерленген үлгілер;а – дәнекерлеу тогы 80 А;
б – дәнекерлеу тогы 100 А; в – дәнекерлеу тогы 120 А.
4-сурет – Дәнекерленген үлгілер

Деформация көлемін бақылау негізгі қабырғада және зерттелетін үлгінің дәнекер тігісі аймағында разрушаусыз бақылау әдісімен ультрадыбыстық ақау тапқыш A1212 MASTER (4.8-сурет) және онымен бірге келетін тік S3568 және көлбеу S5096 пьезоауысқыштар (ПЭП) (5-сурет) көмегімен жүргізілді.



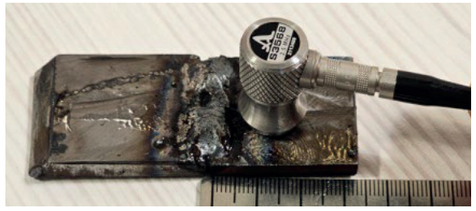
а)



б)

а – Ультрадыбыстық ақау тапқыш AKSYS A1212 Master;
б – ПЭП: көлбеу (S5096 және S5182) және тік (S3568).
5-сурет – ПЭП бар AKSYS A1212 Master ультрадыбыстық ақау анықтағышы

6-суретте үлгілердің дәнекерлеу сапасын бақылау процесі көрсетілген.



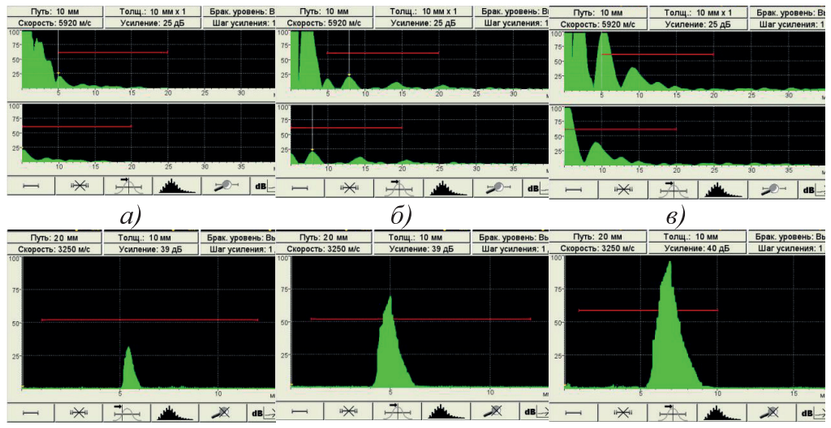


а) б)

а – үлгінің негізгі қабырғасын зерттеу; б – дәнекерлеу жігін зерттеу
6-сурет – Үлгілердің дәнекерлеу сапасын бақылау

Нәтижелер және талқылау

7-суретте AKSYS A1212 Master ультрадыбыстық ақау анықтағышы және түрлендіргіштері арқылы дәнекерленген үлгілерді бақылау нәтижелері көрсетілген.



а) б) в)

г) д) е)

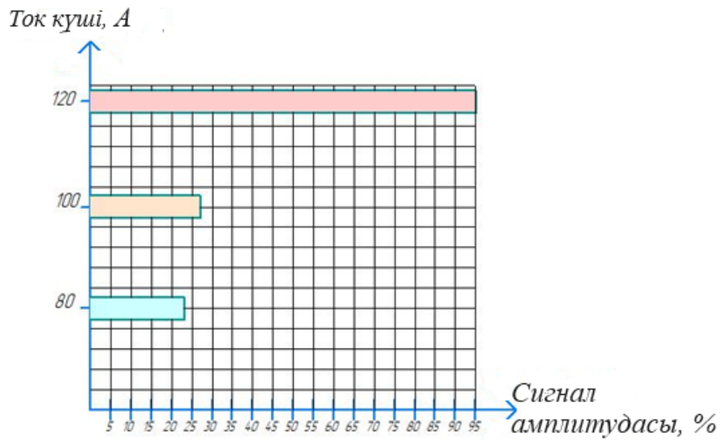
а, б, в – түйістіріп дәнекерленген үлгілер;
г, д, е – айқастыра (нахлёст) дәнекерленген үлгілер;
а – ток күші 80 А; б – ток күші 100 А; в – ток күші 120 А

7-сурет – AKSYS A1212 Master ультрадыбыстық ақау анықтағышы мен түрлендіргіштерді қолдана отырып дәнекерленген үлгілерді бақылау нәтижелері

Үлгілерден алынған деректер 80 А ток күшімен дәнекерленген қосылыстардың (7а-суретке қараңыз) бүкіл ұзындығы бойынша ең аз деформация көлеміне

ие екенін көрсетеді. Дефектілердің көлемі мен сипаттамасы шағылған сигнал амплитудасының биіктігі (ордината осі, пайыздық көрсеткіш) және орналасу тереңдігі (абсцисса осі, мм/тереңдік) бойынша анықталады. Графиктің басындағы жоғары сигнал пьезоөзгерткіштің өлі аймағымен (координат нөлінен 4 мм-ге дейінгі аймақ) түсіндіріледі. Бақылау нәтижелері бойынша дәнекерлеу болат құрылымында айтарлықтай өзгерістер туғызып, қаттылығы төмен кең аймақтарды қалыптастыратыны белгілі болды.

8-суретте үлгінің негізгі қабырғасындағы шағылған сигнал деңгейінің тәуелділігін көрсететін жинақталған диаграмма берілген.



8-сурет – Үлгінің негізгі қабырғасындағы шағылған сигнал деңгейінің тәуелділігінің жиынтық диаграммасы

Негізгі материал қабырғасының микроструктурасындағы анық деформация № 1 үлгіде (7а-суретке қараңыз) жіктен 5 мм қашықтықтағы аймақта байқалады (тереңдігі 5,5 мм-де амплитудасы 24 %, бірақ оның ұзындығы салыстырмалы түрде аз). №2 үлгі (7б-сурет) 5-тен 6 мм-ге дейінгі аймақтарда деформацияны көрсетеді, сондай-ақ 7-ден 9 мм-ге дейінгі ұзындықта микроструктураның өзгеруі орын алады, ол 27% амплитудамен сипатталады. № 3 үлгі (7в-сурет) негізгі металл қабырғаларының микроструктурасында бүкіл ұзындығы бойынша айтарлықтай өзгерістер бар екенін көрсетеді, бұл материалға жылулық әсер ету аймағының кең екендігін және сәйкесінше механикалық қасиеттерінің айтарлықтай нашарлауын білдіреді.

8-суреттегі диаграмма ток күші артқан сайын (осыған сәйкес жеткізілетін жылу энергиясы да артады) шағылған дыбыстық импульс деңгейінің өсетінін көрсетеді. Бұл көрсеткіш құрылымның морттануына және гетерогенділіктің артуына әсер етеді (ток күші 120 А болғанда шағылған сигналдың көрсеткіші 95 % құрайды, бұл ЗТВ-дағы материал сипаттамаларының айтарлықтай өзгеруін

білдіреді). 80 А жағдайында шағылған сигнал көлемі 24 %, ал 100 А ток күшінде дәнекерленген үлгіде – 27 %.

Дәнекерленген жіктегі үлкен біртектілікті 7 г-суреттегі дефектоскоп нәтижелеріндегі 27 % амплитуда көрсетеді. Қалған пластиналарда шағылған сигнал деңгейі 69 % және 98 % (100 А және 120 А ток күші болған жағдайда, тиісінше 7д және 7е-суреттерге қараңыз), бұл дәнекер тігісінің өзінде айтарлықтай дефектілер бар екенін білдіреді.

Қорытынды

1 Дәнекерленген жіктерді визуалды және ультрадыбыстық талдау нәтижесінде, егер оңтайлы температуралық режим (яғни дәнекерленетін пластинаның қалыңдығына сәйкес ток күшін дұрыс таңдау) сақталса, минималды дефектілері бар сапалы дәнекерленген қосылысты алуға болатыны анықталды. Алайда, технология бұзылған жағдайда жікте жарықшақтар мен металл құрылымының өзгеруі мүмкін екені де тіркелді.

2 Алынған деректер дәнекерлеу параметрлерін қатаң бақылау және бетті алдын ала дайындаудың қажеттігін растайды, әсіресе жоғары механикалық жүктеме мен абразивті тозу жағдайында қолданылатын HARDOX сияқты ыстыққа төзімді материалдармен жұмыс істегенде материалдың механикалық қасиеттерін сақтау үшін маңызды.

3 Тәжірибелік зерттеулер HARDOX болатын дәнекерлеу ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік берді, атап айтқанда, материалдың термиялық әсерге сезімталдығын және дәнекерленген қосылыстың беріктік сипаттамаларына әсер етуі мүмкін жылулық әсер ету аймақтарының пайда болуын көрсетті.

4 Осылайша жүргізілген жұмыс HARDOX сияқты ыстыққа төзімді болаттарды дәнекерлеу кезінде жүретін үдерістерді терең түсінуге және ыстыққа төзімді болаттан жасалған дәнекерленген конструкциялардың сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін арттыру бойынша одан арғы зерттеулерге негіз қалады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Кархин, В. А.** Тепловые процессы при сварке. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. – 2015. – 572 с.

2 **Королев, Н. В.** Расчеты тепловых процессов при сварке, наплавке и термической резке: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ, 2016. 156 с.

3 Теория сварочных процессов. Учебник для вузов / В.М. Неровный [и др.] М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2007. – 752 с.

4 **İrsel, G., Özturan, A. B.** Study of the microstructure and mechanical property relationships of gas metal arc welded dissimilar Hardox 450 and S355J2C+N steel joints, Trakya University. – 2022. – Vol. 849. – Art. 143486. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143486

5 О причинах возникновения трещин в сварных швах листа настила ортотропных плит / В. С. Агеев [и др.] // Транспортное строительство. – 2002. – № 11. – С. 18–20. –139.

6 **Гуляев А. П.** Ударная вязкость и хладноломкость конструкционной стали. М. : Машиностроение. – 2014. – 71 с.

7 **Ларионов В. П.** Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. Новосибирск : Наука. – 2017. – 256 с.

8 Влияние термического цикла двухдуговой сварки в СО2 на стойкость стали 20ХГСНМ против образования холодных трещин / С.Н. Гончаров [и др.]// Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 14–15.

9 **Царюк А. К., Бреднев В. И.** Проблема предупреждения холодных трещин (Обзор) // Автоматическая сварка. – 1996. – № 1. – С. 3–10.

10 **Царюк А. К., Иваненко В. Д., Бреднев В. И.** Двухдуговая сварка под флюсом роторов турбин из стали 25Х2НМФА // Автоматическая сварка. – 1994. – № 11. – С. 34–37.

11 **Касаткин Б. С., Плющенко К. С., Царюк А. К.** Двухдуговая сварка под флюсом толстолистовых сталей в узкий зазор // Автоматическая сварка. – 1991. – № 8. – С. 52–55.

12 Влияние погонной энергии сварки на сопротивляемость соединений высокопрочных закаливающихся сталей образованию холодных трещин / А. А. Гайворонский [и др.] // Автоматическая сварка. – 1995. – № 7. – С. 3–8.

REFERENCES

1 **Karkhin V. A.** Teplovyye protsessy pri svarke.[Thermal Processes during Welding] 2-ye izd., pererab. i dop. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. 572 s.

2 **Korolev N. V.** Raschety teplovykh protsessov pri svarke, naplavke i termicheskoy rezke [Calculations of Thermal Processes during Welding, Surfacing, and Thermal Cutting] : Uchebnoye posobiye. Yekaterinburg : UGTU, 2016. 156 p.

3 Teoriya svarochnykh protsessov. [Theory of Welding Processes]: Uchebnik dlya vuzov / V.M. Nerovnyy [i dr.] M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. – 2007. – 752 p.

4 **İrsel, G., Özturan, A. B.** Study of the microstructure and mechanical property relationships of gas metal arc welded dissimilar Hardox 450 and S355J2C+N steel joints, Trakya University. – 2022. – Vol. 849. – Art. 143486. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143486

5 O prichinakh vozniknoveniya treshchin v svarnykh shvakh lista nastila ortotropnykh plit [On the Causes of Cracks in Welded Seams of Orthotropic Slab Deck Sheets]: / V. S. Ageyev [i dr.] // Transportnoye stroitel'stvo. 2002. № 11. S. 18-20.139

6 **Gulyayev A. P.** Udarnaya vyazkost' i khladnolomkost' konstruktsionnoy stali. [Impact Toughness and Cold Brittleness of Structural Steel] M. : Mashinostroyeniye. – 2014. – 71 p.

7 **Larionov V. P.** Elektrodugovaya svarka konstruktsiy v severnom ispolnenii. Novosibirsk: [Electric Arc Welding of Northern Design Structures. Novosibirsk]: Nauka. – 2017. – 256 p.

8 Vliyaniye termicheskogo tsikla dvukhdugovoy svarki v SO_2 na stoykost' stali 20KHGSNM protiv obrazovaniya kholodnykh treshchin / S. N. Goncharov [i dr.] [Effect of the Thermal Cycle of Twin-Arc Welding in CO_2 on the Resistance of 20KhGSNM Steel to Cold Cracks]: // Avtomaticheskaya svarka. – 1982. – № 7. – P. 14–15.

9 **Tsaryuk A. K., Brednev V. I.** Problema preduprezhdeniya kholodnykh treshchin (Obzor) [Problem of Cold Crack Prevention (Review]: // Avtomaticheskaya svarka. – 1996. – № 1. – P. 3–10.

10 **Tsaryuk A. K., Ivanenko V. D., Brednev V. I.** Dvukhdugovaya svarka pod flyusom rotorov turbin iz stali 25KH2NMFA [Double-arc submerged-arc welding of turbine rotors made of 25Kh2NMFA steel]: // Avtomaticheskaya svarka. – 1994. – № 11. – P. 34–37.

11 **Kasatkin B. S., Plyushchenko K. S., Tsaryuk A. K.** Dvukhdugovaya svarka pod flyusom tolstolistovykh staley v uzkiy zazor [Double-arc submerged-arc welding of thick-plate steels in a narrow gap]:// Avtomaticheskaya svarka. – 1991. – № 8. – P. 52–55.

12 Vliyaniye pogonnoy energii svarki na soprotivlyayemost' soyedineniy vysokoprochnykh zakalivayushchikhsya staley obrazovaniyu kholodnykh treshchin / A. A. Gayvoronskiy [i dr.] [The influence of linear welding energy on the resistance of high-strength hardening steel joints to cold cracking]: // Avtomaticheskaya svarka. – 1995. – № 7. – P. 3–8.

24.08.26 ж. баспаға түсті.
25.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. Т. Шеров[1], Н. Б. Тулиева[2], Д. З. Мухамедяров[3], Е. Р. Маякин[4], А. Б. Бобеев[5]

[1,2,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;

[3,4]Карагандинский технический университет имени академика А. С. Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.

Поступило в редакцию 24.08.26.
Поступило с исправлениями 25.08.26.
Принято в печать 31.08.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ СТАЛИ HARDOX ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКОЙ С ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

В данной статье приводится результаты экспериментального исследования свариваемости стали HARDOX ручной электродуговой сваркой с плавящимся электродом. Методика исследования базируется на основе таких наук, как теория сварочных процессов, сварочные технологии и оборудование, технология ремонтной сварки и наплавка деталей машин, технология металлов. В результате визуального и ультразвукового анализа сварных швов установлено, что при соблюдении оптимального температурного режима (а именно подбора оптимального значения силы тока

к толщине свариваемого листа) возможно получение качественного сварного соединения с минимальными дефектами. Однако также было зафиксировано, что при нарушении технологии могут возникать трещины и изменение структуры металла в зоне шва.

Также установлено, что с увеличением силы тока растёт и уровень отраженного звукового импульса. Этот показатель подразумевает под собой охрупчивание конструкции ввиду увеличения объёма неоднородности. Объём отражённого сигнала в случае 80 А равен 24%, а у образца, сваренного с применением силы тока 100 А – 27%.

Полученные данные подтверждают необходимость строгого контроля параметров сварки и предварительной подготовки поверхности при работе с жаропрочными материалами, в частности со сталями типа HARDOX для сохранения должного уровня механических свойств материала, что особенно важно при их использовании в условиях высокой механической нагрузки и абразивного износа.

Экспериментальная часть работы позволила выявить особенности сваривания стали HARDOX, в частности, чувствительность материала к термическому воздействию и возникновению зон термического влияния, которые могут влиять на прочностные характеристики сварного соединения.

Ключевые слова. Сталь HARDOX, электродуговая сварка, сварной шов, сила тока, прочность сварного соединения, визуальный анализ, ультразвуковой анализ.

K. T. Sherov[1], N. B. Tulieva[2], D. Z. Mukhamedyarov[3],
E. R. Mayakin[4], A. B. Bobeev[5]
[1,2,5]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3,4]A. Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 24.08.26.
Received in revised form 25.08.26.
Accepted for publication 31.08.26.

STUDY OF THE WELDABILITY OF HARDOX STEEL BY MANUAL ARC WELDING WITH A CONSUMABLE ELECTRODE

This article presents the results of an experimental study of the weldability of HARDOX steel by manual arc welding with a consumable electrode. The research methodology is based on the following fields of science: the theory of welding processes, welding technologies and equipment, repair welding technology and hardfacing of machine parts, and the technology of metals. As a result of visual and ultrasonic analysis of the welds, it was found that, provided the optimal temperature regime is maintained (namely, the selection of the optimal current value corresponding to the thickness of the sheet being welded), it is possible to obtain a high-quality weld joint with minimal defects. However, it was also recorded that violations of the technology may cause cracks and changes in the metal structure within the weld zone.

It was also established that an increase in the welding current leads to a rise in the level of the reflected sound pulse. This indicator implies embrittlement of the structure due to an increase in the volume of inhomogeneity. The volume of the reflected signal is 24 % at 80 A, and 27 % for the specimen welded using a current of 100 A.

The data obtained confirm the need for strict control of the welding parameters and preliminary surface preparation when working with heat-resistant materials, in particular with steels of the HARDOX type, in order to maintain the proper level of mechanical properties of the material. This is especially important when they are used under conditions of high mechanical load and abrasive wear.

The experimental part of the study made it possible to reveal the specific features of welding HARDOX steel, in particular the sensitivity of the material to thermal exposure and the occurrence of heat-affected zones, which can affect the strength characteristics of the weld joint.

Keywords. HARDOX steel, arc welding, weld joint, welding current, strength of the weld joint, visual analysis, ultrasonic analysis.

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 53.01.05

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/298-314

***Л. С. Баймолданова[1], Р. Б. Абылкалыкова[2]**

[1,2]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3671-9503

*e-mail: baimoldals@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ (TIALSIY)N/CRN

В работе представлены результаты комплексного исследования структурно-фазового состояния, трибологических и механических свойств нанокомпозитных многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN, полученных методом вакуумно-дугового осаждения. Целью исследования являлось установление взаимосвязи между технологическими параметрами осаждения, особенностями формирования структуры покрытий и их эксплуатационными свойствами при термомеханическом воздействии. Покрытия формировались на подложках из нержавеющей стали и исследовались методами наноиндентирования, скретч-тестирования, акустической эмиссии и энергодисперсионного рентгеновского анализа. Дополнительно проводились испытания износостойкости в условиях контактного нагружения (резания/шлифования), моделирующих эксплуатацию металлических материалов при повышенных нагрузках и температурах. Определены коэффициент трения, критические нагрузки разрушения, а также особенности механизмов изнашивания и деградации поверхностных слоёв. Установлено, что покрытия второй серии осаждения характеризуются наиболее высокими эксплуатационными характеристиками, включая минимальную интенсивность износа, стабильный коэффициент трения (μ≈0,35–0,45) и повышенную адгезионную прочность. Формирование первых трещин в покрытии наблюдалось при нагрузке порядка LC_1≈21,7 Н, тогда как разрушение, связанное с потерей адгезионного сцепления покрытия с металлической подложкой, фиксировалось лишь при значительно более высокой нагрузке LC_5≈150 Н. Интенсивность акустической эмиссии сохранялась на низком и стабильном уровне вплоть до значений нагрузки LC_4≈85 Н, что свидетельствует о высокой структурной стабильности покрытия и отсутствии преждевременного локального разрушения. Показано, что повышенная износостойкость покрытий (TiAlSiY)N/CrN обусловлена их многослойной нанокомпозитной архитектурой, способствующей эффективной диссипации механической энергии, торможению распространения трещин и повышению сопротивления деградации поверхностных слоёв. Полученные результаты представляют практический интерес для металлургии покрытий и технологий поверхностной модификации металлических материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях повышенных термомеханических нагрузок.

Ключевые слова: нанокомпозитные покрытия; вакуумно-дуговое осаждение; поверхностная модификация; металлургия покрытий; нитридные покрытия; износостойкость металлических материалов.

Введение

В современной металлургии и инженерии поверхности особое внимание уделяется разработке наноструктурированных и многослойных покрытий, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик металлических материалов и сплавов. Использование многокомпонентных нитридных систем на основе Ti, Al, Si, Cr и Y рассматривается как перспективное направление металлургии покрытий благодаря их высокой твёрдости, термической стабильности, сопротивлению окислению и способности сохранять работоспособность в условиях интенсивного термомеханического нагружения.

Одним из актуальных направлений современной физической металлургии и инженерии поверхности является разработка многофункциональных защитных покрытий для повышения эксплуатационных свойств металлических материалов и сплавов [1; 2; 3]. В этой связи особый интерес представляют многослойные и нанокомпозитные нитридные покрытия, в которых за счёт архитектуры «твёрдый слой/вязкий слой», а также за счёт контролируемой наноструктуры удаётся существенно повысить сопротивление изнашиванию по сравнению с однослойными системами. Обзорные и экспериментальные исследования показывают, что ключевыми факторами повышения износостойкости являются наноструктурное упрочнение, рост параметров H/E и H^3/E^2, формирование устойчивых трибослоёв и снижение склонности к адгезионному схватыванию [4].

Среди PVD-покрытий класса TiAlN (Ti–Al–N) интенсивно исследуются модификации, легированные Si и/или Y. Добавка Si приводит к формированию нанокомпозитной структуры, состоящей из нанокристаллитов (Ti,Al)N, окружённых аморфной матрицей SiNx, что обеспечивает повышение твёрдости и термической стабильности [5; 6]. Легирование Y рассматривается как эффективный способ повышения жаростойкости и сопротивления окислению за счёт стабилизации оксидных плёнок и подавления диффузионных процессов при повышенных температурах [7]. Это особенно важно для трибосопряжений, где износ существенно ускоряется под действием термомеханических нагрузок и окислительного разрушения поверхностных слоёв.

Дополнительный рост эксплуатационных характеристик достигается при переходе к многослойным системам, в которых чередование слоёв с различной кристаллографией, упругими модулями и механизмами деформации позволяет тормозить распространение трещин на межслойных границах, снижать уровень остаточных напряжений, повышать сопротивление усталостному разрушению и управлять трибологическим откликом за счёт оптимального периода модуляции [8]. Показано, что многослойные покрытия на основе

TiAlSiN и Cr-содержащих нитридов обладают повышенной износостойкостью и окислительной стабильностью по сравнению с однослойными аналогами, что связывают как с барьерной ролью межслойных границ, так и с формированием защитных трибооксидных плёнок [9; 10].

В этом контексте нанокомпозитные покрытия (TiAlSiY)N/CrN представляют собой перспективную систему, сочетающую высокотвёрдую фазу Ti–Al–Si–Y–N и слои CrN, обеспечивающие повышение сопротивления окислению, благоприятные механизмы деформации и повышение трещиностойкости многослойной архитектуры [11; 12; 13]. Экспериментальные исследования с применением рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии указывают на возможность формирования выраженной слоистой структуры без интенсивного перемешивания на границах, что является ключевым условием реализации наноламинатного механизма упрочнения [14].

Несмотря на значительный объём исследований многослойных нитридных покрытий, вопросы взаимосвязи между структурно-фазовым состоянием покрытий (TiAlSiY)N/CrN и их трибологическим поведением в условиях контактного и термомеханического нагружения остаются недостаточно изученными [15; 16; 17]. В связи с этим в настоящей работе основное внимание уделено исследованию адгезионной прочности, износостойкости, коэффициента трения и механизмов разрушения покрытий, полученных при различных технологических режимах вакуумно-дугового осаждения.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния технологических параметров вакуумно-дугового осаждения на трибологические, механические и эксплуатационные свойства многослойных нанокомпозитных покрытий (TiAlSiY)N/CrN.

Материалы и методы

В качестве исходных подложек применялись пластины из нержавеющей стали размером 2,2×2,0 см при толщине 2 мм. Перед нанесением покрытий образцы из нержавеющей стали подвергались последовательной механической обработке, включающей шлифование абразивными бумагами различной зернистости (от Р800 до Р2500), после чего выполнялась полировка с использованием алмазных суспензий с размером частиц 3 и 1 мкм до получения зеркальной поверхности. После механической обработки образцы промывались в ультразвуковой ванне в ацетоне и этиловом спирте в течение 10–15 минут для удаления остатков абразива и органических загрязнений.

Непосредственно перед осаждением покрытий проводилась ионно-плазменная очистка поверхности в атмосфере аргона при отрицательном потенциале смещения подложки. Данная процедура обеспечивала удаление адсорбированных загрязнений и оксидных плёнок, активацию поверхности и повышение адгезии формируемого покрытия к подложке. После нанесения покрытий выполнялась финишная полировка поверхности до достижения средней арифметической шероховатости Ra=0,02–0,15 мкм. Контроль шероховатости осуществлялся методом контактной профилометрии.

Формирование многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN осуществлялось методом вакуумно-дугового испарения на установке ионно-плазменного напыления с использованием катодов высокой степени чистоты (не ниже 99,8 %), работающих в чередующемся режиме. В качестве реакционной среды применялся азот высокой чистоты.

Толщина отдельных функциональных слоёв в составе покрытия составляла порядка 18–20 нм, при этом общая толщина осаждённого покрытия превышала 4 мкм. Процесс осаждения реализовывался в импульсном режиме с попеременной активацией катодов TiAlSiY и Cr.

Для определения твёрдости покрытий наиболее информативным методом является наноиндентирование. В отличие от макро- и микроиндентирования, в наноиндентирующих системах осуществляется непрерывная регистрация перемещения индентора h и приложенной нагрузки P как на этапе нагружения, так и при разгрузке, что обеспечивает высокую точность определения механических характеристик. Наноиндентирование представляет собой метод локального испытания материалов путём вдавливания индентора в наномасштабный объём поверхности образца; подробное описание метода приведено в работах [18; 19; 20].

Основной механический параметр – твёрдость, определялась методом наноиндентирования и рассчитывалась по выражению:

$$H = \frac{P_{max}}{A_{\text{pc}}} \qquad (1)$$

где, P_{max} – максимальная приложенная нагрузка, A_{pc} – площадь проекции отпечатка индентора.

Наиболее широко применяемым индентором в наноиндентировании является алмазный индентор Берковича, подробное описание которого приведено в [20]. Для индентора Берковича площадь проекции отпечатка A_{pc} может быть выражена геометрическим соотношением [20]:

$$(A_{\text{pc}})_{Berkovich} = \frac{1}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4}a^2 = \frac{\sqrt{3}}{4}(2\sqrt{3}h_c tan65.27)^2 = 24.494h_c^2 \approx 24.5h_c^2 \qquad (2)$$

где a – длина стороны остаточного отпечатка в форме равностороннего треугольника, h_c – контактная глубина внедрения индентора при нагрузке.

В данной работе измерение механических характеристик покрытий методом наноиндентирования проводилось при комнатной температуре с использованием установки Hysitron TriboIndenter 950. Прибор был оснащён алмазным индентором Берковича с конусным углом 142,8° и радиусом вершины 100 нм. Перед проведением экспериментов система была откалибрована по стандартному образцу плавленого кремния. Определение значений твёрдости и модуля упругости осуществлялось на основе общепринятого подхода, предложенного Оливером и Фарром.

Для исследования механических свойств покрытий методом наноиндентирования, скретч-тестирования и EDS использовались образцы из нержавеющей стали размером 22×20×2 мм³, поверхность которых была предварительно механически отполирована. На образцы наносились многослойные покрытия (TiAlSiY)N/CrN одинаковой толщины. В соответствии с технологическими режимами, представленными в таблице 1, для серий 1, 3 и 4 перед основным осаждением формировался подслой Cr продолжительностью 5 мин с целью повышения адгезии покрытия к подложке. Для образцов второй серии подслой Cr не наносился, что позволило оценить влияние данного технологического параметра на эксплуатационные свойства покрытия. Эксплуатационные испытания на износостойкость проводились на режущих пластинах из поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN) с нанесённым покрытием (TiAlSiY)N/CrN в условиях резания (шлифования).

Адгезионная и когезионная прочность покрытий, а также характер их разрушения исследовались методом скретч-тестирования на установке Revetest (CSM Instruments). Развитие повреждений в процессе царапания фиксировалось визуально с помощью оптического микроскопа с цифровой камерой, а также контролировалось по изменениям сигналов акустической эмиссии и коэффициента трения. В ходе испытаний определялась минимальная критическая нагрузка LC, при которой начиналось разрушение покрытия. Для повышения воспроизводимости результатов на каждом образце выполнялось не менее трёх параллельных скретч-испытаний. Значения критических нагрузок определялись по совокупности полученных результатов.

В зависимости от характера повреждений критические нагрузки классифицировались следующим образом: LC1 – появление первых микротрещин в зоне контакта; LC2 – развитие и распространение трещин вдоль царапины; LC3 – разрушение когезионно-адгезионного типа; LC4 – локальное отслаивание фрагментов покрытия; LC5 – пластическое истирание покрытия вплоть до подложки, сопровождающееся полной потерей адгезионной прочности.

Для оценки эксплуатационной износостойкости покрытия в условиях, приближённых к реальной эксплуатации, покрытия (TiAlSiY)N/CrN наносились на режущие пластины из поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN). Испытания проводились в процессе резания (шлифования) закалённой инструментальной стали CRWMN (ХВГ, Т31507) твёрдостью HRC≈53. В данном случае пластины PCBN служили режущим инструментом, тогда как сталь CRWMN являлась обрабатываемым материалом.

Каждое трибологическое испытание проводилось не менее трёх раз при одинаковых условиях, после чего рассчитывались средние значения коэффициента трения и параметров износа.

Анализ элементного состава покрытий до и после трибологических испытаний проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). Исследования выполнялись с использованием энергодисперсионного

спектрометра JEOL 100 mm² Silicon Drift Detector (SDD), интегрированного в электронно-микроскопический комплекс JEOL F200.

Результаты и обсуждения

Структурно-фазовое состояние и морфология многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN были ранее исследованы авторами с использованием рентгенофазового анализа (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM) [20]. Установлено формирование нанокристаллической структуры на основе нитридных фаз TiAlSiYN и CrN, а также выраженной многослойной архитектуры покрытия. Поскольку структурно-фазовое состояние покрытий подробно исследовано авторами ранее [20], в настоящей работе эти результаты используются как исходная основа для интерпретации трибологических и механических свойств.

Трибологические свойства нанокомпозитных покрытий на основе (TiAlSiY)N/CrN, включая их износостойкость в процессе резания, адгезионные характеристики, а также изменения акустической эмиссии и коэффициента трения, были исследованы в ходе эксплуатационных испытаний [20].

Для проведения испытаний на износостойкость при резании параметры осаждения покрытий приведены в таблице 1. Как следует из представленных данных, покрытия отличаются разнообразием технологических маршрутов и условий подготовки образцов до нанесения, что позволяет оценить влияние физико-технологических параметров осаждения на их эксплуатационные и трибологические характеристики.

Таблица 1 – Технологические режимы формирования покрытий (TiAlSiY)N/CrN, применяемые при испытаниях износостойкости в условиях резания

№	Покрытие	Iд, А	Iф, А	Us, В	P, торр	Примечание	Время осаждения
1	(TiAlSiY)N/ CrN	90 90	0,5	-280	$4,5 \times 10^{-3}$	-очистка в атмосфере азота - 30 мин. -Uсм=1000 В. -Подслой Cr=5мин.	1 час
2	(TiAlSiY)N/ CrN	90 90	0,5	-280	$4,5 \times 10^{-3}$	- очистка в атмосфере азота 30 мин. -Uсм=1000 В. - Cr без подслоя	1 час
3	(TiAlSiY)N/ CrN	90 90	0,5	-280	$4,5 \times 10^{-3}$	- очистка в атмосфере азота 20 мин. -Uсм=1000 В. - Подслой Cr=5мин.	1 час
4	(TiAlSiY)N/ CrN	90 90	0,5	-280	$4,5 \times 10^{-3}$	- очистка в атмосфере азота 20 мин. -Uсм=500 В. - Подслой Cr=5мин.	1 час

Выбор технологических параметров осаждения осуществлялся на основе предварительных экспериментальных исследований, а также анализа литературных данных по формированию многослойных покрытий TiAlSiYN/CrN методом вакуумно-дугового осаждения. В рамках настоящей работы

исследовалось влияние времени предварительной очистки поверхности, величины отрицательного смещения подложки и наличия подслоя Cr на механические и трибологические свойства покрытий. Одним из исследуемых технологических факторов являлось наличие или отсутствие подслоя Cr, что позволило оценить его влияние на адгезионную прочность и трибологические характеристики покрытий. Полноценное математическое планирование эксперимента не проводилось, а исследование носило сравнительный характер.

Сравнительный анализ результатов эксплуатационных испытаний показал, что покрытия второй серии характеризуются наиболее благоприятным сочетанием адгезионной прочности, трибологических характеристик и сопротивления износу. Это согласуется с результатами скретч-тестирования и исследования механизмов разрушения покрытий. В связи с этим дальнейшие исследования в рамках данной работы проводились с использованием покрытий, полученных по параметрам второй серии.

Согласно литературным данным, интенсивность изнашивания многослойных нанокомпозитных покрытий в значительной степени определяется уровнем их адгезионной прочности, твёрдостью и особенностями межслоевой архитектуры [6; 10; 15]. Развитые межзеренные и межслоевые интерфейсы способны эффективно препятствовать распространению трещин и обеспечивать дополнительную диссипацию механической энергии, что способствует повышению трещиностойкости и механической надёжности покрытия [6, 10]. В результате наблюдается увеличение долговечности покрытия и эксплуатационного ресурса режущего инструмента в условиях циклических термомеханических нагрузок [9; 15].

После проведения трибологических испытаний установлено изменение элементного состава покрытий в зоне канавки износа и в прилегающих областях. По мере увеличения глубины износа наблюдается перераспределение элементного состава покрытия. В центральной части канавки износа уменьшается содержание титана, тогда как изменение концентраций других элементов связано с разрушением поверхностных слоёв покрытия и частичным вовлечением материала подложки в процесс трения, что подтверждается результатами EDS-анализа.

На рисунке 1 представлены зависимости коэффициента трения (μ) и интенсивности акустической эмиссии (AE) от приложенной нагрузки F при скретч-тестировании покрытия (TiAlSiY)N/CrN второй серии. Вертикальными линиями обозначены критические нагрузки LC1–LC5, соответствующие различным стадиям разрушения покрытия.

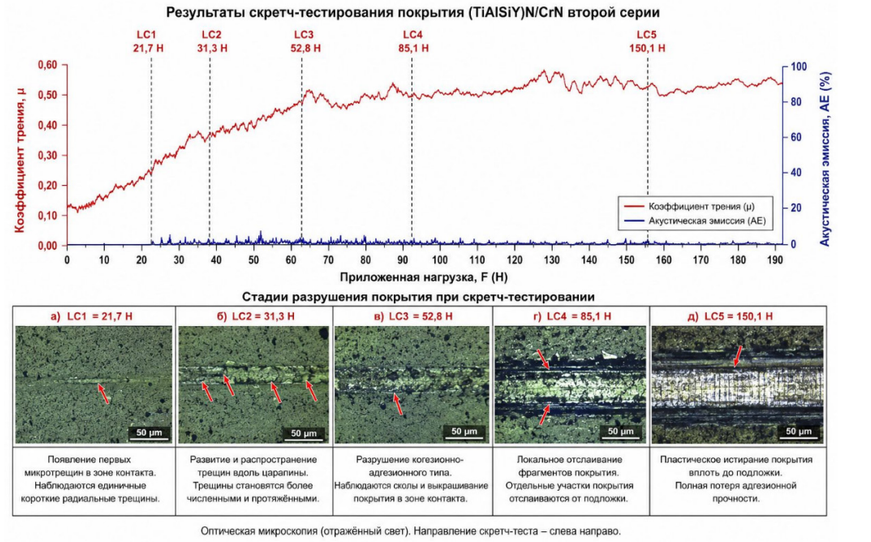


Рисунок 1 – Изменение сигналов акустической эмиссии и коэффициента трения в зависимости от приложенной нагрузки для покрытия (TiAlSiY)N/CrN второй серии, характеризующее стадии структурного разрушения покрытия

Анализ изменения амплитуды акустической эмиссии (AE) позволяет оценить интенсивность процессов зарождения трещин в покрытии и особенности их дальнейшего развития. Для нанокомпозитных покрытий (TiAlSiY)N/CrN в ходе всего эксперимента зафиксирован низкий и практически стабильный уровень акустической эмиссии. Такая динамика сигнала AE указывает на отсутствие выраженных разрушений, связанных с ранним трещинообразованием в покрытии.

В результате скретч-испытаний была установлена минимальная критическая нагрузка LC, при которой начинается разрушение покрытия. Наблюдаемое истирание покрытия до подложки в ряде случаев связано с резким возрастанием силы трения и коэффициента трения, обусловленным проникновением индентора в материал подложки.

Формирование первых трещин в покрытии отмечено при нагрузке LC1=21,7 H и сопровождалось заметным увеличением интенсивности акустической эмиссии, что свидетельствует о начальной стадии отслаивания покрытия от подложки. Разрушение, зафиксированное при нагрузке LC3=52,8 H, носит когезионно-адгезионный характер. Локальное отслоение участков покрытия с обнажением материала подложки в зоне царапины наблюдалось только при нагрузке LC4=85,1 H, что указывает на высокую адгезионную прочность и надёжное сцепление покрытия с подложкой. Пластическое истирание покрытия вплоть до подложки было выявлено лишь при нагрузке LC5=150,1 H, что соответствует полной утрате адгезионной прочности.

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента трения, силы трения, температуры покрытия и температуры печи от глубины проникновения для нанокомпозитных покрытий (TiAlSiY)N/CrN. Представленные кривые отражают сложный характер термомеханических процессов, протекающих в зоне контакта при нагружении.

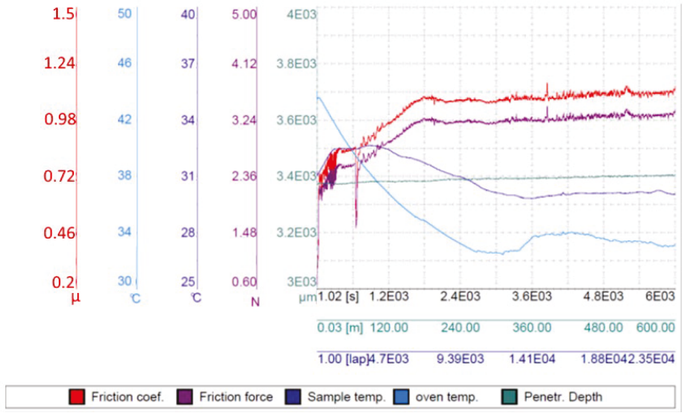


Рисунок 2 – Влияние глубины проникновения на фрикционные и температурные характеристики покрытий (TiAlSiY)N/CrN при термомеханическом воздействии

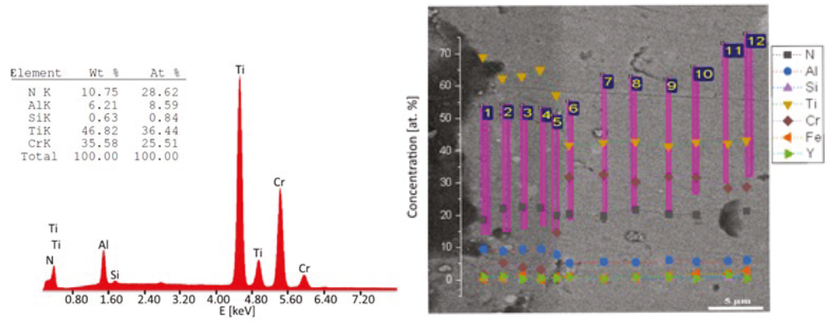
На начальной стадии испытаний наблюдается рост коэффициента трения, сопровождающийся пропорциональным увеличением силы трения. Данное поведение может быть связано с процессом приработки контактирующих поверхностей, увеличением реальной площади контакта и активацией адгезионных взаимодействий между покрытием и контртелом. В этот период происходит интенсивная перестройка поверхностного слоя покрытия, включая сглаживание микронеровностей и формирование первичных трибологических слоёв. Одновременно с ростом коэффициента трения фиксируется снижение температуры покрытия, что, по-видимому, обусловлено эффективным отводом тепла за счёт теплопроводности многослойной нанокомпозитной структуры и перераспределения теплового потока вглубь покрытия и подложки. В то же время температура печи на начальном этапе демонстрирует рост, что свидетельствует о переносе тепловой энергии из зоны трения во внешнюю среду. Дальнейшее снижение температуры печи с последующими незначительными колебаниями указывает на установление квазистационарного теплового режима.

По результатам EDS-анализа, выполненного вдоль поперечного профиля канавки износа (рисунок 3б), установлено перераспределение основных элементов покрытия. В центральной части зоны износа наблюдается снижение содержания титана и хрома, сопровождающееся увеличением концентрации железа, что

свидетельствует о частичном разрушении покрытия и локальном вовлечении материала подложки в процесс трения.

Таким образом, полученные зависимости подтверждают, что трибологическое поведение покрытий (TiAlSiY)N/CrN определяется совокупным влиянием механических, тепловых и структурных факторов, а многослойная нанокомпозитная структура обеспечивает адаптивный отклик покрытия в условиях сложного термомеханического нагружения.

Энергодисперсионные рентгеновские спектры, представленные на рисунке 3а, подтверждают формирование многокомпонентного нитридного покрытия заданного состава с преобладанием титана и хрома, а также присутствием алюминия, кремния и азота. Зафиксированное соотношение элементов свидетельствует о корректности выбранных технологических параметров осаждения и формировании нанокомпозитной структуры покрытия.



а) б)

Рисунок 3 – а) EDS-спектры (элементный состав) покрытий (TiAlSiY)N/CrN до изнашивания;
б) распределение элементного состава покрытий (TiAlSiY)N/CrN вдоль ширины канавки износа и в прилегающих к ней зонах

Анализ распределения элементного состава вдоль ширины канавки износа и в прилегающих зонах (рисунок 3б) выявил выраженное перераспределение компонентов покрытия после трибологического нагружения. В центральной области канавки наблюдается снижение концентраций Ti и Cr, что связано с механическим изнашиванием верхних слоёв покрытия и частичным разрушением нитридной матрицы. Одновременно фиксируется увеличение содержания Fe, указывающее на локальное обнажение материала подложки и его вовлечение в процесс трения.

В периферийных областях канавки износа сохраняется более равномерное распределение элементов Ti, Cr, Al и Si, что свидетельствует о меньшей степени повреждённости покрытия в этих зонах. Наличие азота по всей анализируемой области подтверждает относительную стабильность нитридной основы покрытия даже при воздействии повышенных контактных нагрузок.

Выявленные изменения химического состава обусловлены совокупным действием механических, тепловых и диффузионных процессов, протекающих в зоне трения. Перераспределение элементов и формирование модифицированного поверхностного слоя играют ключевую роль в адаптивном трибологическом поведении нанокомпозитных покрытий (TiAlSiY)N/CrN и способствуют повышению их износостойкости в условиях интенсивного термомеханического нагружения.

Выводы

В настоящей работе проведено комплексное исследование структурно-фазового состояния, трибологических и механических свойств нанокомпозитных многослойных покрытий (TiAlSiY)N/CrN, полученных методом вакуумно-дугового осаждения. Установлены закономерности влияния технологических параметров осаждения, архитектуры покрытия и межфазных границ на формирование эксплуатационных свойств поверхностных слоёв металлических материалов в условиях термомеханического нагружения.

Показано, что повышенные эксплуатационные характеристики покрытий (TiAlSiY)N/CrN обусловлены их многослойной нанокомпозитной структурой, сочетающей высокие значения твёрдости, структурную стабильность и способность к эффективной диссипации механической энергии. Наличие развитых межслоевых и межзеренных интерфейсов способствует торможению распространения трещин, снижению вероятности локального разрушения и повышению долговечности покрытия при циклическом нагружении.

Экспериментально установлено, что свойства покрытий существенно зависят от физико-технологических параметров вакуумно-дугового осаждения. Среди исследованных серий наиболее высокие эксплуатационные характеристики продемонстрировали покрытия второй серии, для которых характерны минимальная интенсивность износа, стабильный коэффициент трения и высокие значения критических нагрузок при скретч-испытаниях. Полученные результаты свидетельствуют о высокой адгезионной и когезионной прочности покрытия, а также о его устойчивости к деградации поверхностных слоёв. Анализ сигналов акустической эмиссии показал отсутствие раннего трещинообразования и локальных разрушений вплоть до высоких нагрузок, что подтверждает высокую структурную стабильность покрытий.

Исследование элементного состава методом EDS выявило перераспределение компонентов в зоне износа, сопровождающееся снижением концентраций Ti и Cr и увеличением содержания Fe по мере роста глубины повреждения. Установленные изменения связаны с активацией диффузионных, окислительных и структурных процессов в поверхностных слоях покрытия при термомеханическом воздействии.

Установлено, что изменение коэффициента трения сопровождается перераспределением тепловых потоков между покрытием, подложкой и окружающей средой, что отражается в изменении температурных характеристик системы при увеличении глубины проникновения. Полученные результаты

подтверждают сложный характер термомеханических процессов, определяющих поведение многослойных покрытий в условиях контактного нагружения.

В целом результаты исследования подтверждают перспективность нанокомпозитных покрытий (TiAlSiY)N/CrN для применения в металлургии покрытий и технологиях поверхностной модификации металлических материалов. Выявленные структурно-фазовые и эксплуатационные закономерности могут быть использованы при разработке износостойких многослойных покрытий с повышенной термической и механической стабильностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Holmberg K., Matthews A.** Tribology of thin coatings // Thin Solid Films. – 1994. – Vol. 253. – P. 173–178. – https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)90945-3

2 **Hutchings I. M., Shipway P.** Tribology : Friction and Wear of Engineering Materials. – 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. – 390 p.

3 **Voevodin A. A., Zabinski J. S.** Nanocomposite and nanostructured tribological materials // Tribology International. – 2005. – Vol. 38. – P. 829–836. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.01.005

4 **Veprek S.** The search for novel superhard materials // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1999. – Vol. 17. – P. 2401–2420. – https://doi.org/10.1116/1.581977

5 **Chang C. L., Lee J. W., Chen C. H.** TiAlSiN nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 5238–5243. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.152

6 **Zhang S., Sun D., Fu Y. Q.** Toughening mechanisms in multilayer coatings // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. – P. 1739–1744. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.12.015

7 **Fox-Rabbinovich G. S., Yamamoto K., Beake B. D.** Self-organization during friction // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – P. 3524–3534. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.080

8 **Beake B. D., Fox-Rabbinovich G. S.** High-temperature nanomechanical testing // Wear. – 2011. – Vol. 271. – P. 1020–1028. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.044

9 **Tillmann W., Vogli E., Stangier D.** Tribological behavior of TiAlSiN/CrN coatings // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 260. – P. 391–401. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.041

10 **Pogrebnjak A. D., Smyrnova K. V., Beresnev V. M.** Multilayer nitride coatings // Materials Chemistry and Physics. – 2013. – Vol. 147. – P. 1079–1091. – https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.09.019

11 **Smyrnova K. V., Pogrebnjak A. D., Beresnev V. M.** Ion-induced phase transformations // Vacuum. – 2017. – Vol. 146. – P. 47–54. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.023

12 **Rakhadilov B. K., Kengesbekov A., Baimoldanova L.** TiAlSi-based coatings // Vacuum. – 2019. – Vol. 168. – Article 108823. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108823

13 **Harrington G. F.** Intensity corrections for grazing-incidence XRD // Journal of Applied Crystallography. – 2021. – Vol. 54. – P. online. – https://doi.org/10.1107/S1600576721003036

14 **Ziegler J. F., Biersack J. P., Manoyan J. M.** Universal scattering potential method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 1986. – Vol. 15. – P. 93–100. – https://doi.org/10.1016/0168-583X(86)90322-2

15 **Musil J.** Flexible hard nanocomposite coatings // Vacuum. – 2015. – Vol. 111. – P. 52–64. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.08.006

16 **Fox-Rabbinovich G. S., Totten G. E.** Self-adaptive tribological coatings // Wear. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 1274–1285. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.063

17 **Oliver W. C., Pharr G. M.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7. – Iss. 6. – P. 1564–1583.

18 ISO 14577-1: Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Geneva, 2015.

19 **Баймолданова Л. С., Погребняк А. Д., Уазырханова Г. К.** Молекулалық динамика әдісімен (TiAlYSi)N/CrN нанокомпозиттік жабынының араластыру энергиясы мен құрылым тұрақтылығын зерттеу // ҚазҰТЗУ хабаршысы. – 2021. – № 3 (139). – С. 704–711.

20 **Баймолданова Л. С., Погребняк А. Д., Баяндинова М. Б., Сакенова Р. Е.** Структурно-фазовые превращения в нанослоистых покрытиях (TiAlSiY)N/CrN после ионной имплантации ионами золота // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 3. – С. 525–533.

REFERENCES

1 **Holmberg K., Matthews A.** Tribology of thin coatings // Thin Solid Films. – 1994. – Vol. 253. – P. 173–178. – https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)90945-3

2 **Hutchings I. M., Shipway P.** Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. – 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. – 390 p.

3 **Voevodin A. A., Zabinski J. S.** Nanocomposite and nanostructured tribological materials // Tribology International. – 2005. – Vol. 38. – P. 829–836. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.01.005

4 **Veprek S.** The search for novel superhard materials // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1999. – Vol. 17. – P. 2401–2420. – https://doi.org/10.1116/1.581977

5 **Chang C. L., Lee J. W., Chen C. H.** TiAlSiN nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 5238–5243. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.152

6 **Zhang S., Sun D., Fu Y. Q.** Toughening mechanisms in multilayer coatings // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. – P. 1739–1744. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.12.015

7 **Fox-Rabbinovich G. S., Yamamoto K., Beake B. D.** Self-organization during friction // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – P. 3524–3534. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.080

8 **Beake B. D., Fox-Rabbinovich G. S.** High-temperature nanomechanical testing // Wear. – 2011. – Vol. 271. – P. 1020–1028. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.044

9 **Tillmann W., Vogli E., Stangier D.** Tribological behavior of TiAlSiN/CrN coatings // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 260. – P. 391–401. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.041

10 **Pogrebnjak A. D., Smyrnova K. V., Beresnev V. M.** Multilayer nitride coatings // Materials Chemistry and Physics. – 2013. – Vol. 147. – P. 1079–1091. – https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.09.019

11 **Smyrnova K. V., Pogrebnjak A. D., Beresnev V. M.** Ion-induced phase transformations // Vacuum. – 2017. – Vol. 146. – P. 47–54. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.023

12 **Rakhadilov B. K., Kengesbekov A., Baimoldanova L.** TiAlSi-based coatings // Vacuum. – 2019. – Vol. 168. – Article 108823. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108823

13 **Harrington G. F.** Intensity corrections for grazing-incidence XRD // Journal of Applied Crystallography. – 2021. – Vol. 54. – P. online. – https://doi.org/10.1107/S1600576721003036

14 **Ziegler J. F., Biersack J. P., Manoyan J. M.** Universal scattering potential method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 1986. – Vol. 15. – P. 93–100. – https://doi.org/10.1016/0168-583X(86)90322-2

15 **Musil J.** Flexible hard nanocomposite coatings // Vacuum. – 2015. – Vol. 111. – P. 52–64. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.08.006

16 **Fox-Rabbinovich G. S., Totten G. E.** Self-adaptive tribological coatings // Wear. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 1274–1285. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.063

17 **Oliver W. C., Pharr G. M.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7. – Iss. 6. – P. 1564–1583.

18 ISO 14577-1: Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Geneva, 2015.

19 **Baimoldanova, L. S., Pogrebnyak, A. D., Uazyrkhanova, G. K.** Molekulalyk dinamika adisi men (TiAlYSi)N/CrN nanokompozittik jabynyn aralastyru energiasy men kurylym turaktylygyn zertteu. [Study of mixing energy and structural stability of (TiAlYSi)N/CrN nanocomposite coating by molecular dynamics method] [Text] – KazUTZU Khabarshysy. – 2021. – № 3 (139). – P. 704–711.

20 **Baimoldanova, L. S., Pogrebnyak, A. D., Bayandinova, M. B., Sakenova, R. E.** Strukturno-fazovye prevrashcheniya v nanosloistykh pokrytiyakh (TiAlSiY)N/CrN posle ionnoy implantatsii ionami zolota [Structural-phase transformations in nanoscale multilayer (TiAlSiY)N/CrN coatings after gold ion implantation] [Text] – Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3. – P. 525–533.

Поступило в редакцию 12.03.26.
Поступило с исправлениями 14.05.26.
Принято в печать 22.07.26.

***Л. С. Баймолданова[1], Р. Б. Абылкалыкова[2]**
[1,2]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
12.03.26 ж. баспаға түсті.
14.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

(TIALSIY)N/CRN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ПАЙДАЛАНУ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ВАКУУМДЫҚ-ДОҒАЛЫҚ ТҰНДЫРУДЫҢ ӘСЕРІ

Жұмыста вакуумдық-доғалық тұндыру әдісімен алынған (TiAlSiY)N/CrN нанокомпозитті көпқабатты жабындарының құрылымдық-фазалық күйі, трибологиялық және механикалық қасиеттері кешенді түрде зерттелді. Зерттеудің мақсаты тұндырудың технологиялық параметрлері, жабын құрылымының қалыптасу ерекшеліктері мен олардың термомеханикалық әсер жағдайындағы пайдалану қасиеттері арасындағы өзара байланысты анықтау болды. Жабындар тот баспайтын болаттан жасалған төсеніштерге қалыптастырылып, наноиндентирлеу, скретч-тестілеу, акустикалық эмиссия және энергиядисперсиялық рентгендік талдау әдістерімен зерттелді. Сонымен қатар, жоғары жүктемелер мен температуралар жағдайында металл материалдардың пайдалану режимдерін модельдейтін контактілі жүктеме (кесу/ажарлау) жағдайында тозуға төзімділік сынақтары жүргізілді. Үйкеліс коэффициенті, бұзылудың критикалық жүктемелері, сондай-ақ тозу механизмдері мен беткі қабаттардың деградация ерекшеліктері анықталды. Тұндырудың екінші сериясына жататын жабындардың ең жоғары пайдалану сипаттамаларына ие екендігі анықталды, оның ішінде тозу қарқындылығының төмен болуы, үйкеліс коэффициентінің тұрақтылығы (μ≈0,35–0,45) және адгезиялық беріктігінің жоғары болуы байқалды. Жабындағы алғашқы жарықшақтардың түзілуі LC_1≈21,7 Н жүктемесінде тіркелсе, жабынның металл төсеніштен адгезиялық байланысының бұзылуына байланысты қирау тек LC_5≈150 Н шамасындағы айтарлықтай жоғары жүктемеде байқалды. Акустикалық эмиссия қарқындылығы LC_4≈85 Н жүктемесіне дейін төмен әрі тұрақты деңгейде сақталды, бұл жабынның жоғары құрылымдық тұрақтылығын және мерзімінен бұрын жергілікті бұзылулардың болмауын көрсетеді.

(TiAlSiY)N/CrN жабындарының жоғары тозуға төзімділігі олардың механикалық энергияны тиімді диссипациялауға, жарықшақтардың таралуын тежеуге және беткі қабаттардың деградациясына төзімділікті арттыруға ықпал ететін көпқабатты нанокомпозиттік архитектурасымен түсіндірілетіні көрсетілді. Алынған нәтижелер жоғары термомеханикалық жүктемелер жағдайында пайдаланылатын металл материалдардың бетін модификациялау технологиялары мен жабындар металлургиясы үшін практикалық қызығушылық тудырады.

Кілтті сөздер: нанокомпозитті жабындар; вакуумдық-доғалық тұндыру; бетті модификациялау; жабындар металлургиясы; нитридті жабындар; металл материалдардың тозуға төзімділігі.

***L. S. Baimoldanova[1], R. B. Abylkalykova[2]**
[1,2]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 12.03.26.
Received in revised form 14.05.26.
Accepted for publication 22.07.26.

INFLUENCE OF VACUUM ARC DEPOSITION ON THE STRUCTURE AND PERFORMANCE PROPERTIES OF (TIALSIY)N/CRN COATINGS

This paper presents the results of a comprehensive investigation of the structural-phase state, tribological, and mechanical properties of nanocomposite multilayer (TiAlSiY)N/CrN coatings deposited by the vacuum arc deposition method. The aim of the study was to establish the relationship between the technological deposition parameters, the features of coating structure formation, and their operational properties under thermomechanical loading conditions. The coatings were deposited onto stainless steel substrates and characterized using nanoindentation, scratch testing, acoustic emission analysis, and energy-dispersive X-ray spectroscopy. In addition, wear resistance tests were carried out under contact loading conditions (cutting/grinding) simulating the operation of metallic materials under elevated temperatures and mechanical stresses. The coefficient of friction, critical failure loads, as well as the mechanisms of wear and degradation of surface layers were determined. It was found that the coatings obtained under the second deposition regime exhibited the best performance characteristics, including minimal wear intensity, a stable coefficient of friction (μ≈0.35–0.45), and enhanced adhesion strength. The initiation of crack formation in the coating was observed at a load of LC_1≈21,7 N, whereas coating failure associated with the loss of adhesion to the metallic substrate occurred only at a significantly higher load of LC_5≈150 N. The acoustic emission intensity remained low and stable up to LC_4≈85 N, indicating high structural stability of the coating and the absence of premature local failure. It was demonstrated that the enhanced wear resistance of the (TiAlSiY)N/CrN coatings

is associated with their multilayer nanocomposite architecture, which promotes effective dissipation of mechanical energy, suppresses crack propagation, and increases resistance to degradation of the surface layers. The obtained results are of practical interest for coating metallurgy and surface modification technologies of metallic materials intended for operation under severe thermomechanical loading conditions.

Keywords: nanocomposite coatings; vacuum arc deposition; surface modification; coating metallurgy; nitride coatings; wear resistance of metallic materials.

МРНТИ 53.43.33

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/315-325

А. В. Богомолов[1], Ж. Б. Кажмухамбетов[2], А. А. Каменов[3], С. С. Спанов[4], А. К. Жунусова[5]

[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

*e-mail: bogomolov71@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

Проведён сравнительный анализ современных технологических методов производства стальных мелющих шаров диаметром 120–140 мм, основанных на базовых процессах обработки металлов давлением. В частности, сравнивали достоинства и недостатки кузнечно-прокатного метода (быстрая ковка с последующей прокаткой в профильных валках), поперечно-винтовой прокатки на специализированных шаропрокатных станах и горячей ковки на ковочных прессах. Оценка выполнена по критериям производительности, механических свойств (твёрдость HRC, ударная вязкость KCU), износостойкости, точности геометрических размеров, экономической эффективности и применимости в условиях казахстанских горнодобывающих предприятий. Целью исследования является объективное сопоставление трёх современных промышленных методов производства стальных мелющих шаров данного диаметра и выбору наиболее эффективной технологии, рекомендуемой для применения на предприятиях Республики Казахстан. Научная новизна работы состоит в сравнении конкурирующих технологий производства стальных мелющих шаров большого диаметра по комплексу основных критериев удовлетворенности потребителя.

Показано, что кузнечно-прокатный метод при работе с исходным горячекатаным прутком с коэффициентом обжатия ε не менее 10 обеспечивает наилучший комплекс механических свойств и является оптимальным решением для производства шаров данного размерного диапазона. При объёмах производства свыше 60 000 т/год целесообразно рассмотреть комбинированную компоновку: шаропрокатный стан для шаров диаметром 40–100 мм и кузнечно-прокатная линия для диаметров 100–140 мм.

Ключевые слова: шар, прокат, сталь, шаропрокатный стан, ковка, твёрдость, ударная вязкость, износостойкость.

Введение

Мелющие шары диаметром 120–140 мм относятся к наиболее нагруженной категории шаровых мельничных тел и применяются на стадии первичного дробления и полусамоизмельчения (SAG/AG) руд цветных и чёрных металлов. Спрос на такие шары в Казахстане обусловлен деятельностью крупнейших горнометаллургических комплексов – Жезказганского медного комбината, Риддерского полиметаллического завода, Коунрадского рудника (АО «Казахмыс»), предприятий крупных корпораций ERG и «Казцинк».

К шарам данного класса предъявляются жёсткие требования: твёрдость по Роквеллу не менее 58–60 HRC по поверхности при допустимом перепаде к сердцевине не более 4–6 HRC, ударная вязкость KCU более 12 Дж/см² и скорость износа не более 120–150 г/т применительно к мокрому помолу медносульфидных руд. [1, с.1373].

Анализ зарубежных источников [2, с. 220], также показывает, что проблема производства стальных мелющих тел для шаровых мельниц остается актуальной.

Кузнечно-прокатные технологии, основанные на сочетании ковки и последующей прокатки в профильных валках постепенно внедряются в производство [3, с.3043]. Метод представляет собой двухстадийный непрерывный процесс. На первой стадии нагретая до 1050–1150 °С заготовка подвергается быстрой (импульсной) ковке на радиально-ковочной или гидравлической ковочной машине с усилием 250–800 тонн. Задача ковки – разбить литую карбидную сетку, обеспечить равномерное распределение карбидов по объёму и сформировать мелкозернистую исходную структуру с размером зерна 7–9 баллов по ГОСТ 5639.

На второй стадии поковка (заготовка, близкая к цилиндру) в горячем состоянии подаётся в профильные валки шаропрокатного блока, где за один-три прохода формируется точная сферическая форма. Температура прокатки поддерживается в диапазоне 900–1000 °С с последующей закалкой в масляной или водо-воздушной среде.

При этом исходный горячекатаный пруток должен иметь коэффициент обжатия ε не менее 10 по отношению к слитку. Это обеспечивает разрушение первичной дендритной структуры, устранение сегрегационных зон и формирование плотного, однородного металла с высокой конструктивной прочностью – основы для последующего ковочного обжатия. [3, с. 3050].

Известно [4; 5; 6; 7; 8], что в современных условиях наиболее массовым технологическим процессом производства шаров является поперечно-винтовая прокатка на специальных шаропрокатных станах. Метод отличается максимальной производительностью в диапазоне шаров до диаметра 110–125 мм. Однако, при переходе к диаметрам 120–140 мм возникают технологические ограничения: усилие разрыва на пережиме резко возрастает, а неравномерность деформации по сечению приводит к появлению внутренних разрыхлений и усадочных зон в центральной части шара. Для противодействия этому явлению требуются дополнительные технологические меры (повышение температуры, подогрев

инструмента, специальные профили ручьёв), усложняющие и удорожающие процесс [9, с. 230].

В этих условиях получает определенные преимущества традиционный метод горячей объёмной штамповки шаров в закрытых или открытых штампах, который применяется для широкого диапазона диаметров от 40 до 150 мм и более. Нагретая заготовка деформируется за 2–5 ударов молота или прессом, принимая форму полусфер в двух половинах штампа. Метод обеспечивает хорошую прорабатываемость структуры металла и высокую гибкость по сменяемости штампов. Однако, производительность существенно ниже прокатных методов, выход облоя снижает коэффициент использования металла, а точность формы зависит от степени износа штампа и квалификации оператора. Кроме того, ударные нагрузки на инструмент приводят к повышенным эксплуатационным расходам.

Целью исследования является объективное сопоставление трёх современных промышленных методов производства стальных мелющих шаров данного диаметра и выбору наиболее эффективной технологии, рекомендуемой для применения на предприятиях Республики Казахстан.

Материалы и методы

В таблице 1 указана марка стали, рекомендуемая базовым предприятием для производства шаров диаметром 120–125 мм. Химический состав исходных непрерывнолитых заготовок должен соответствовать указанным пределам.

Таблица 1 –Химический состав стали для шаров

Химические элементы, %		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Требуемый состав для шара	min	0,57	0,25	0,75	-	-	0,20	-	-
	max	0,63	0,32	0,90	0,025	0,025	0,30	0,2	0,2

При проведении исследований использовались действующие стандартные методы исследования химического состава стали (ГОСТ 12344, ГОСТ 12345, ГОСТ 12346, ГОСТ 12347, ГОСТ 12348, ГОСТ 12350, ГОСТ 12351, ГОСТ 12355), методы определения твердости мелющих шаров (ГОСТ 9013, ГОСТ 9012), современное лабораторное оборудование, установленное в лабораториях кафедры «Металлургия» Торайгыров университета: Портативный рентгенофлуоресцентный анализатор, твердомер ТК (по Роквеллу), лупа Бринеля МПБ-2, принятые в науке математические методы обработки результатов экспериментов. Шлифы образцов из стали перед визуальным контролем протравливали 1 мин в 4 %-ном растворе азотной кислоты.

Сравнительный анализ выполняли по критериям производительности, уровня механических свойств и дефектов структуры металла, а также экономической эффективности.

Результаты и обсуждение

Выполнен сравнительный анализ макроструктуры мелющих шаров для оценки влияния коэффициента обжатия заготовки на свойства шара. На рисунке 1 приведен темплет шара после закалки.



Рисунок 1 – Макроструктура шара, поперечный темплет, травление

Горячекатаный пруток с коэффициентом обжатия ε ≥ 10 является оптимальным исходным материалом для кузнечно-прокатного метода. Данный параметр характеризует степень суммарного обжатия при прокатке в потоке стана от непрерывнолитой заготовки до товарного проката и определяет ряд важных показателей (степень дробления карбидов, текстура металла, наличие дефектов и химическую неоднородность).

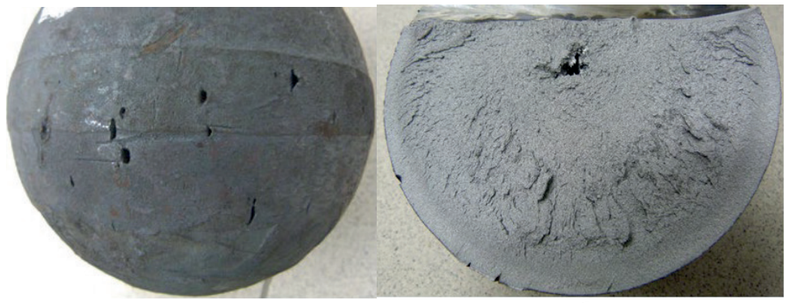
При ε более 10 карбидная сетка по границам зёрен практически полностью разрушается; при ε менее 6 – сохраняется и является источником хрупкого разрушения при ударных нагрузках.

Высокая степень обжатия формирует ориентированную волокнистую структуру вдоль оси прутка, что при ковке обеспечивает изотропию свойств в радиальных направлениях шара.

Усадочные раковины, флокены и газовые поры закрываются при ε более10; ковочные процессы завершают «залечивание» дефектов. Ликвационные зоны сплющиваются и перераспределяются равномерно по сечению. Экспериментальные данные подтверждают, что переход от ε = 6 к ε = 10 и выше увеличивает ударную вязкость готового шара на 25–35% и снижает разброс твёрдости по сечению с ΔHRc = 8 до ΔHRc = 3–4.

Вместе с тем у шаров, полученных ковкой на прессах, дефектность исключить не всегда удается. На рисунке 2 показан металлографический анализ шара Ø120 мм в связи с образованием поверхностных и осевых дефектов. Шары произведены по стандарту предприятия СТ ТОО 40985885-004-2010 в условиях кузнечного цеха (штамповка), термообработка – закалка с ковочного нагрева, самоотпуск. При внешнем осмотре на поверхности доставленных целых шаров наблюдаются раскрытые разрывы поверхности в виде округлых, вытянутых в продольном направлении полостей с неровными краями (рисунок 2а). Выполнен продольный

излом. В центре шара наблюдается осевая раковина, стенки раковины чистые, неокисленные, имеют крупнокристаллическое строение (рисунок 2б).



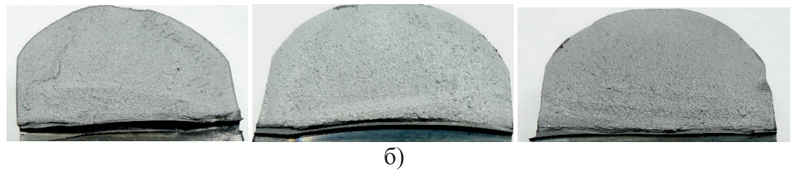
а б

Рисунок 2 – Шар диаметром 120 мм, полученный ковкой на прессе
а) внешний вид дефекта, б) макроструктура на продольном изломе

Исследование микроструктуры в области поверхностных разрывов выявило наличие дефекта, представляющего собой полость в виде мешка, содержащего окалину. Глубина распространения дефекта составляет 5,3 мм. Прилегающий металл насыщен частицами диффузионных оксидов и мелких неметаллических включений сложного состава, местами в виде цепочек по границе аустенитного зерна. Вместе с тем сравнительный анализ макроструктуры группы шаров, полученных на шаропрокатном стане таких дефектов не выявил (рисунок 3).



а)



б)

Рисунок 3 – Шары, полученные на шаропрокатном стане:
а) внешний вид, б) макроструктура на продольном изломе

Анализ механический свойств показывает, что кузнечно-прокатный метод обеспечивает наиболее высокую поверхностную твёрдость (60–64 HRC) при минимальном перепаде к сердцевине (Δ ≤ 4 HRC). Это объясняется комбинированным термомеханическим воздействием: ковка создаёт равномерную мелкозернистую структуру, а последующая прокатка в горячем состоянии с последующей масляной закалкой формирует мартенситную матрицу с равномерным распределением дисперсных карбидов.

Шаропрокатный стан для диаметров свыше 120 мм не всегда обеспечивает прокатку сердцевины – в центральных слоях деформация минимальна, что приводит к пониженной твёрдости сердцевины (55–58 HRC) и повышенному перепаду твердости по сечению [10, с.45]. При работе с технологией масляного охлаждения этот недостаток частично компенсируется.

По показателю ударной вязкости наилучший результат также у кузнечно-прокатного метода (15–25 Дж/см²), обусловленный максимальной проработкой структуры и разрушением хрупкой карбидной сетки. Для шаров, эксплуатируемых в мельницах с высокой энергией удара (SAG-мельницы), именно ударная вязкость является критическим параметром, определяющим долю скалывания в общем балансе износа.

Минимальная скорость износа (80–120 г/т) у кузнечно-прокатных шаров обусловлена высокой твёрдостью в сочетании с достаточной вязкостью, что минимизирует оба механизма убыли металла – абразивный износ и скалывание. Шаропрокатные шары показывают несколько худший результат (100–140 г/т) именно из-за повышенной доли скалывания при недостаточной ударной вязкости крупных типоразмеров [11].

В таблице 2 сведены данные для сравнения трех вариантов технологии производства стальных мелющих шаров. Данные таблицы 2 основаны на опубликованных промышленных результатах, технической документации производителей оборудования и нормах ГОСТ 7524–2015. Значения ударной вязкости – для материала класса В3 (C 0.61–0.65%, Si 1.73–1.80%, Cr 0.80–0.88%) после закалки в масле.

По критерию производительности лидирует шаропрокатный стан – непрерывный процесс без промежуточных операций позволяет достигать 60–120 шт/мин. Однако в диапазоне Ø120–140 мм реальная производительность шаропрокатного стана снижается на 30–40% по сравнению с оптимальными размерами (Ø80–100 мм) вследствие необходимости снижения скорости деформации для предотвращения внутренних дефектов [12, с.20]. Таким образом, эффективная производительность шаропрокатного стана для шаров Ø125–140 мм составляет не более 40–60 шт/мин.

Кузнечно-прокатная линия работает в диапазоне 30–60 шт/мин при устойчивом качестве продукции без ограничений по диаметру. Ковочный пресс в качестве основного оборудования значительно уступает обоим методам и целесообразен лишь для мелкосерийного производства или нестандартных типоразмеров.

Таблица 2 – Сравнительные данные трех технологий производства мелющих шаров

Параметр	Кузнечно-прокатный метод	Поперечно-винтовая прокатка	Горячая ковка / штамповка
Диаметр, мм	120–140	До 120–125 (ограничение)	80–150
Производительность	30–60 шт/мин (~18 000–36 000 шт/ч)	60–120 шт/мин (~36 000–72 000 шт/ч)	5–20 шт/мин (~3 000–12 000 шт/ч)
Исходная заготовка	Горячекатаный круг, ε ≥ 10	Горячекатаный круг, ε ≥ 6	Поковка / прессовка
Твёрдость HRC (поверхность)	60–64	58–63	56–62
Твёрдость HRC (сердцевина)	57–62 (Δ ≤ 4 HRC)	55–60 (Δ 4–6 HRC)	50–58 (Δ 6–10 HRC)
Ударная вязкость KCU, Дж/см²	15–25	12–20	10–18
Износостойкость, г/т	80–120	100–140	120–180
Сферичность / допуск	±0,5–1,0 мм	±0,3–0,8 мм	±1,0–2,0 мм
Скол / трещинообразование	Низкое	Низкое	Среднее
Капиталовложения (линия)	Средние (3–8 млн USD)	Высокие (5–12 млн USD)	Низкие (0,5–3 млн USD)
Энергопотребление, кВт·ч/т	130–160	120–150	160–220
Выход годного, %	96–98	97–99	90–95
Гибкость по типоразмерам	Высокая (смена за 1–2 ч)	Средняя (смена за 4–8 ч)	Высокая (смена штампа)
Соответствие ГОСТ 7524	Полное (кат. 1–2)	Полное (кат. 1–2)	Частичное (кат. 3–4)

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту AP26198363 «Повышение потребительских свойств стали и ферросплавов на этапе комплексного металлургического передела в условиях замкнутого цикла производства».

Выводы

1 Для новых производственных линий на территории Казахстана (объём 15 000–50 000 т/год) рекомендуется кузнечно-прокатный метод как обеспечивающий наилучший баланс качества, производительности и инвестиционной нагрузки. При объёмах свыше 60 000 т/год целесообразно рассмотреть комбинированную компоновку: шаропрокатный стан для шаров Ø40–100 мм и кузнечно-прокатная линия для Ø100–140 мм.

2 Итоговое сравнение подтверждает преимущество кузнечно-прокатного метода для производства шаров Ø120–140 мм. Метод уступает шаропрокатному стану только по показателю производительности, однако превосходит его по показателям качества продукции – что принципиально важно для горнодобывающих потребителей, оценивающих шары не по цене за тонну, а по стоимости помола на единицу переработанной руды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Matsanga, N., Nheta, W., Chimwani, N.** A Review of the Grinding Media in Ball Mills for Mineral Processing. [Текст] // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – Art. 1373. – https://doi.org/10.3390/min13111373

2 **Байдин, В. В., Уманский А. А.** Моделирование и разработка технологических режимов производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости. [Текст] // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2025. – № 68(3). – С. 218–227. – https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-218-227

3 **Zurnadzhy V.** Quen ching and partitioning–based heat treatment for rolled grin ding steel balls. / V. Zurnadzhy, V. Efremenko, K. Wu, A. Lekatou, K. Shimizu, Y. G. Chabak, D. S. Zotov, E. V. Dunayev. [Текст] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2020. –№ 51– С. 3042–3053. – https://doi.org/10.1007/s11661-020-05737-w

4 **Pater, Z.** A helical wedge rolling process for producing a ball pin / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk [Текст] // Procedia Manufacturing 27. – 2019. – P. 27–32. – https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.039

5 **Быков, П. О., Касимгазинов, А. Д.** Исследование и апробация технологии получения катаных помольных шаров 5 группы твердости в условиях ПФ ТОО «Кастинг». [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2018. – № 1. – С. 31–40.

6 **Sokhan, D.** Modeling ball rolling in spiral rolls / D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko [Текст] // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Vol 83. – № 2. – P. 24–30. – https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.117012

7 **Рубцов, В. Ю.** Обзор зарубежных исследований в области поперечно-винтовой прокатки при производстве стальных мелющих шаров и осесимметричных профилей / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко [Текст] // Калибровочное бюро. – 2019. – № 15. – С. 24–36.

8 **Найзабеков А. Б.** Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства / А. Б. Найзабеков, Б. С. Мухаметкалиев, А. С. Арбуз, С. Н. Лежнев. [Текст] // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – № 4 (46). – С. 78–86.

9 **Богомолов А. В.** Совершенствование технологии прокатного передела помольных шаров диаметром 125 мм /А. В. Богомолов, А. К. Жунусов, Ж. Б. Кажмухамбетов, С. С. Спанов, А. К. Жунусова [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2025. – № 3. – С. 226–235. – https://doi.org/10.48081/APSR7381.

10 **Протасьев В. Б.** Проектирование валков для горячей поперечно винтовой прокатки заготовок без дефектов в осевой зоне / В. Б. Протасьев, Н. Н. Батова [Текст] // Черные металлы. – 2020. – № 3 (1059). – С. 42–47.

11 **Pourgharibshahi, M, Mahmoudi, M.** Failure analysis of hot-forged 70Cr2 steel balls used in semi-autogenous grinding mills [Текст] // Engineering Failure Analysis. – 2026. – Vol. 194. – 110951. – https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110951

12 **Шведов, К. Н.** Получение мелющих шаров с высокой поверхностной и нормированной объемной твердостью / К. Н. Шведов, И. К. Галимьянов, М. А. Казаковцев [Текст] // Металлург. – 2020. – № 6. – С. 16–22.

REFERENCES

1 **Matsanga, N., Nheta, W., Chimwani, N.** A Review of the Grinding Media in Ball Mills for Mineral Processing. [Текст] // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – Art. 1373. – https://doi.org/10.3390/min13111373

2 **Baidin V. V., Umanskii A. A.** Modeling and development of technological modes for production of grinding balls of increased hardness and impact resistance. [Text] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2025. – Vol 68 (3). – P. 218–227. – https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-218-227

3 **Zurnadzhy V.** Quen ching and partitioning–based heat treatment for rolled grin ding steel balls. / V. Zurnadzhy, V. Efremenko, K. Wu, A. Lekatou, K. Shimizu, Y. G. Chabak, D. S. Zotov, E. V. Dunayev. [Текст] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2020. –№ 51– С. 3042–3053. – https://doi.org/10.1007/s11661-020-05737-w

4 **Pater, Z.** A helical wedge rolling process for producing a ball pin / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk [Текст] // Procedia Manufacturing 27. – 2019. – P. 27–32. – https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.039

5 **Bykov P. O., Kasimgazinov A. D.** Issledovanie i aprobaciya texnologii polucheniya katany`x pomol`ny`x sharov 5 gruppy` tverdosti v usloviyax PF TOO «Kasting». [Research and approbation of production technology for rolled grinding balls 5-th group of hardness in the PB LLP «Casting»]. [Text] // Science and Technology of Kazakhstan. – 2018. – Vol 1. – P. 31–40.

6 **Sokhan, D.** Modeling ball rolling in spiral rolls / D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko [Текст] // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Vol 83. – № 2. – P. 24–30. – https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.117012

7 **Rubczov, V. Yu.** Obzor zarubezhny`x issledovanij v oblasti poperechno-vintovoj prokatki pri proizvodstve stal`ny`x melyushhix sharov i osesimmetrichny`x profilej / V. Yu. Rubczov, O. I. Shevchenko [Review of foreign research in the field of transverse screw rolling in the production of steel grinding balls and axisymmetric profiles] [Text] // Calibration Bureau. – 2019. – № 15. – P. 24–36.

8 **Najzabekov A. B.** Snizhenie rasxoda stal`ny`x melyushhix sharov putem uluchsheniya texnologii ix proizvodstva A. B. Najzabekov, B. S. Muxametkaliev, A. S. Arbuz, S. N. Lezhnev. [Reducing the consumption of steel grinding balls by improving their production technology] [Text] // Vesti vy`sshix uchebny`x zavedenij Chernozem`ya. – 2016. – № 4(46). – P. 78–86.

9 **Bogomolov A. V.** Sovershenstvovanie texnologii prokatnogo peredela pomol`ny`x sharov diametrom 125 mm [Improving the technology of rolling grinding balls with a diameter of 125 mm] / A. V. Bogomolov, A. K. Zhunussov, Zh. B. Kazhmukhambetov, S. S. Spanov, A. K. Zhunusova [Text] // Science and

Technology of Kazakhstan. – 2025. – Vol 3. – P. 226–235. – https://doi.org/10.48081/APSR7381

10 **Protas`ev V. B.** Proektirovanie valkov dlya goryachej poperechno vintovoj prokatki zagotovok bez defektov v osevoj zone / V. B. Protas`ev, N. N. Batova [Design of rolls for hot cross-helical rolling of billets without defects in the axial zone] [Text] // Cherny`e metally`. – 2020. – № 3 (1059). – P. 42–47.

11 **Pourgharibshahi, M, Mahmoudi, M.** Failure analysis of hot-forged 70Cr2 steel balls used in semi-autogenous grinding mills [Текст] // Engineering Failure Analysis. – 2026. – Vol. 194. – 110951. – https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110951

12 **Shvedov, K. N.** Poluchenie melyushhix sharov s vy`sokoj poverxnostnoj i normirovannoj ob``emnoj tverdost`yu / K. N. Shvedov, I. K. Galim`yanov, M. A. Kazakovcev [Production of grinding balls with high surface and normalized volume hardness] [Text] // Metallurgist. – 2020. – № 6. – P. 16–22.

Поступило в редакцию 08.06.26.
Поступило с исправлениями 17.06.26.
Принято в печать 23.07.26.

***А. В. Богомолов[1], Ж. Б. Қажмұхамбетов[2], А. А. Каменов[3],
С. С. Спанов[4], А. Қ. Жүнісова[5]**
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
08.06.26 ж. баспаға түсті.
17.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
23.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҰНТАҚТАҒЫШ ШАРЛАРДЫ ӨНДІРУДІҢ ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Металдарды қысыммен өңдеудің негізгі процестеріне негізделген, диаметрі 120–140 мм ұнтақтағыш болат шарларды өндірудің заманауи технологиялық әдістеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Атап айтқанда, үш әдістің: соғу-илемдеу әдісінің (жедел соғудан кейін профильді біліктерде илемдеу), мамандандырылған шар илемдеу стандарындағы көлденең-бұрандалы илемдеудің және соғу престерінде ыстықтай соғудың артықшылықтары мен кемшіліктері салыстырылды. Бағалау өнімділік, механикалық қасиеттер (HRC қаттылығы және KCU соққы тұтқырлығы), тозуға төзімділік, геометриялық өлшемдердің дәлдігі, экономикалық тиімділік және Қазақстанның тау-кен өндіру кәсіпорындарында қолдану мүмкіндігі сияқты критерийлер бойынша жүргізілді.

Зерттеудің мақсаты – аталған диаметрдегі ұнтақтағыш болат шарларды өндірудің үш заманауи өнеркәсіптік әдісін объективті түрде салыстыру және Қазақстан Республикасының өнеркәсіп кәсіпорындарында қолдануға ең тиімді технологияны таңдау. Жұмыстың ғылыми жаңалығы тұтынушы талаптарын қанағаттандырудың негізгі критерийлері бойынша үлкен диаметрлі ұнтақтағыш болат шарларды өндірудің бәсекелес технологияларын кешенді түрде салыстырудан тұрады.

Нәтижелер көрсеткендей, бастапқы ыстықтай илемделген шыбықты пайдаланған кезде, қысу коэффициенті (ε) кемінде 10 болатын соғу-илемдеу әдісі механикалық қасиеттердің ең жақсы жиынтығын қамтамасыз етеді және осы өлшемдік диапазондағы шарларды өндіру үшін оңтайлы шешім болып табылады. Өндіріс көлемі жылына 60 000 тоннадан асқан жағдайда құрамдастырылған өндіріс жүйесін қарастыру ұсынылады: диаметрі 40–100 мм шарлар үшін шар илемдеу станы және диаметрі 100–140 мм шарлар үшін соғу-илемдеу желісі.

Кілтті сөздер: шар, илемдеу, болат, шар илемдеу станы, соғу, қаттылық, соққы тұтқырлығы, тозуға төзімділік.

***A. V. Bogomolov[1], Zh. B. Kazhmukhambetov[2], A. A. Kamenov[3],
S. S. Spanov[4], A. K. Zhunusova[5]**
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 08.06.26.
Received in revised form 17.06.26.
Accepted for publication 23.07.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF GRINDING BALLS

A comparative analysis of modern technological methods for producing steel grinding balls (120–140 mm in diameter) based on the fundamental processes of metal forming was conducted. Specifically, the study compared the advantages and disadvantages of three methods: the forging-and-rolling method (rapid forging followed by rolling in shaped rolls), helical rolling on specialized ball-rolling mills, and hot forging on forging presses. The assessment was based on several criteria: productivity, mechanical properties (Rockwell hardnes HRC and impact toughness KCU), wear resistance, dimensional accuracy, economic efficiency, and applicability for mining enterprises in Kazakhstan.

This research aims to objectively compare three modern industrial methods for producing steel grinding balls of the specified diameter and to select the most effective technology for industrial application in the Republic of Kazakhstan. The scientific novelty of this work lies in the comprehensive comparison of competing technologies for producing large-diameter steel grinding balls based on key end-user requirements.

The results demonstrate that the forging-and-rolling method, using an initial hot-rolled bar with a reduction ratio (ε) of at least 10, provides the best combination of mechanical properties and is the optimal solution for producing balls in this size range. For production volumes exceeding 60,000 tonnes/year, a combined production layout is recommended: a ball-rolling mill for 40–100 mm balls and a forging-and-rolling line for 100–140 mm balls.

Keywords: ball, rolling, steel, ball-rolling mill, forging, hardness, impact toughness, wear resistance.

SRSTI 53.31.17

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/326-341

P. O. Bykov[1], M. M. Suyundikov[2], *A. B. Kuandykov[3], R. B. Mukanov[4], S. Pochinok[5]

[1]Innovative University of Eurasia, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[1,2,3]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[4]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]«Incom Company» LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7540-7882
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1352-5821
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6075-1603
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-0513
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9113-4508
*e-mail: azeka200892@mail.ru

THERMODYNAMIC MODELING OF ADDITIONAL IRON RECOVERY FROM KAZAKHSTANI BAUXITES USING ALTERNATIVE REDUCING AGENTS

The authors analyzed the feasibility of recycling iron-containing waste generated during alumina production from bauxite in Kazakhstan using reducing agents alternative to carbon (C and CO) – hydrogen (H_2) and methane (CH_4).

This article presents a thermodynamic analysis of the reduction of iron minerals found in ferrous sands and waste sludge using reducing agents – C, CO, H_2, and CH_4. HSC Chemistry 9.0 software from Outotec Technologies was used for the thermodynamic calculations. The temperature range studied was 100–1500°C, and the pressure was 101.33 kPa.

The thermodynamic analysis in the studied temperature and pressure range clearly demonstrates the feasibility of using hydrogen-based reducing agents alternative to carbon for iron recovery from alumina production waste in Kazakhstan, which will contribute to the achievement of the UN Sustainable Development Goals and carbon neutrality in the metallurgy industry. *The research was conducted under a grant from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the competition for grant funding for scientific and/or scientific-technical projects for 2024–2026 under project AP23487674, «Comprehensive Processing of Kazakhstan's Bauxites with Additional Iron Extraction Using Alternative Reductants in the Implementation of a Low-Carbon Development Strategy».*

Keywords: bauxite, iron, carbon neutrality, hydrogen, methane, recycling.

Introduction

In its new Environmental Code, approved in 2021, and other regulatory documents, the Republic of Kazakhstan promotes sustainable development issues, including the development of closed-loop production cycles, "the continuous circulation of materials during production and consumption, eliminating the generation of waste that accumulates in the environment," and paths to achieving carbon neutrality by 2060 [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7].

In the Pavlodar region of the Republic of Kazakhstan, the main types of industrial waste from ore processing and the combustion of thermal coal are ash and slag waste from thermal power plants, waste from metallurgical plants from the production of steel, alumina, aluminum, and ferroalloys, and chemical production. A number of research teams are working on the integrated use of ores and the recycling of industrial waste. They have successfully conducted research and proposed options for the further use of waste in metallurgy for additional metal extraction and in the construction industry for the production of concrete and concrete products [8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15].

Analysis shows that the proposed options for recycling metal-containing waste for additional metal extraction use carbon-containing materials as reducing agents, which negatively impact the environment by generating CO and CO_2 emissions, thereby preventing Kazakhstan from successfully achieving carbon neutrality by 2060.

Globally, carbon remains the primary reducing agent for metals, requiring the development of new, more environmentally friendly options for metal production to achieve the UN Sustainable Development Goals and carbon neutrality in metallurgy. The Pavlodar Aluminum Smelter uses a "series-parallel Bayer sintering" process to produce alumina from low-grade bauxite from Kazakhstan. This method is dictated by the chemical composition of the bauxite received for processing [20]. To reduce the negative impact of bauxite impurities on alumina production processes, the introduction of which into the production cycle has increased severalfold with the processing of Krasnooktyabrsky bauxite using the Bayer process, two bauxite enrichment processes have been developed and implemented at the milling stage: a process for removing the kaolinite component and a process for removing ferrous sand [20].

Currently, the resulting ferrous sand is sent to slurry fields and is considered waste.

Materials and methods

The authors analyzed the feasibility of recycling iron-containing waste generated during alumina production from Kazakhstan's bauxite using reducing agents alternative to carbon (C and CO) – hydrogen (H_2) and methane (CH_4).

The composition of iron-containing waste from alumina production at the Pavlodar Aluminum Smelter is shown in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of iron-containing sludge from the Pavlodar Aluminum Plant [20]

Components, %	Al_2O_3	Na_2O	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	TiO_2	CO_2	SO_3
Ferruginous sands	17–20	0,5–0,8	52–56	4,6–5,6	6,2–8,2	2–3	9–12,0	2,2–3,0

Waste sludge	4,3-5,0	0,9-1,5	27-32	39-44	19-21	≤2	0,8–1,0	

The volume of ferruginous sands produced is determined by the level of alumina production at Aluminum of Kazakhstan JSC. At the current level of production at Aluminum of Kazakhstan JSC (~1.6 million tons of alumina per year), up to 220,000 tons of Fe_2O_3, which comes with bauxite, and up to 75,000 tons of Al_2O_3 are lost with ferruginous sands. The grain size distribution of ferruginous sands ranges from 0.15 to 5 mm and is determined by the process parameters of their removal during the implementation of the bauxite enrichment scheme with the removal of ferruginous sands at Aluminum of Kazakhstan JSC [20]. The main minerals of the ferruginous sands recovered during the enrichment of Krasnooktyabrsky bauxite at Aluminum of Kazakhstan JSC are hematite (Fe_2O_3), siderite ($FeCO_3$), pyrite (FeS_2), magnetite (FeO Fe_2O_3), goethite (FeO(OH)), calcite ($CaCO_3$), gibbsite ($Al(OH)_3$), and others [20].

The volume of waste sludge generated is significantly greater than that of the ferruginous sands, but their iron oxide content is significantly lower. The waste sludge contains minerals similar to those found in the ferruginous sands [20].

This study conducted a thermodynamic analysis of the reduction of minerals comprising the ferruginous sands and waste sludge using the following reducing agents: C, CO, H_2, and CH_4. HSC Chemistry 9.0 software from Outotec Technologies was used for the calculations. In the calculations, the temperature range under study was taken to be within 100–1500 °C, and the pressure within 101.33 kPa.

Table 2 – Chemical formulas for calculations for the reduction of the main minerals included in ferruginous sands and waste sludge from the alumina production of JSC Aluminum of Kazakhstan using reducing agents C, CO, H_2, CH_4

Minerals	Restorers			
	C	CO	H_2	CH_4
hematite (Fe_2O_3)	$2Fe_2O_3 + 3C = 4Fe + 3CO_2(g)$	$Fe_2O_3 + 3CO(g) = 3CO_2(g) + 2Fe$	$Fe_2O_3 + 3H_2(g) = 3H_2O + 2Fe$	$Fe_2O_3 + CH_4(g) = 2Fe + CO_2(g) + H_2O + H_2(g)$
siderite ($FeCO_3$)	$2FeCO_3 + C = 2Fe + 3CO_2(g)$	$FeCO_3 + CO(g) = Fe + 2CO_2(g)$	$FeCO_3 + H_2(g) = Fe + H_2O + CO_2(g)$	$4FeO + CH_4(g) = 4Fe + 2H_2O + CO_2(g)$
pyrite (FeS_2)	$FeS_2 + 2C = Fe + 2CS(g)$	$FeS_2 + 2CO(g) = Fe + 2COS(g)$	$FeS_2 + H_2(g) = FeS + H_2S(g)$	$2FeS_2 + CH_4(g) = 2FeS + 2H_2S(g) + C$
magnetite ($FeO{\cdot}Fe_2O_3$, Fe_3O_4)	$Fe_3O_4 + 4C = 3Fe + 4CO$	$Fe_3O_4 + 4CO(g) = 3Fe + 4CO_2(g)$	$Fe_3O_4 + 4H_2(g) = 3Fe + 4H_2O$	$3Fe_3O_4 + 4CH_4(g) = 9Fe + 8H_2O + 4CO(g)$
goethite (FeO(OH))	It turns into hematite at a temperature of about 200°C			
calcite ($CaCO_3$)	Decomposes at temperatures around 900 - 1000°C			

Results and discussion

Table 3 and Figure 1 show the calculated Gibbs free energy (ΔG) values for the chemical reactions of hematite (Fe_2O_3) reduction with reducing agents C, CO, H_2, and CH_4.

Analysis of the calculated Gibbs free energy values ΔG confirms that at atmospheric pressure and temperatures from 100 to 1500 °C, the thermodynamic probability of

hematite (Fe_2O_3) reduction depends significantly on the nature of the reducing agent. For the carbon reduction reaction ($2Fe_2O_3 + 3C = 4Fe + 3CO_2$), the Gibbs free energy values ΔG range from – 260.934 to–449.021 kJ, with an increase in the absolute value of the negative Gibbs free energy observed with increasing temperature, indicating an increase in the thermodynamic favorability of the process. During reduction with carbon monoxide ($Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$), the ΔG values ΔG vary from – 29.619 to –17.869 kJ, remaining negative throughout the entire temperature range studied, which also indicates the possibility of spontaneous reaction, but its thermodynamic efficiency is lower compared to reduction with carbon. For reduction with hydrogen ($Fe_2O_3 + 3H_2 = 3H_2O + 2Fe$), the ΔG values ΔG are positive and increase from 46.817 to 132.006 kJ, indicating the thermodynamic unfavorability of the reaction in the temperature range under consideration. In the case of reduction with methane ($Fe_2O_3 + CH_4 = 2Fe + CO_2 + H_2O + H_2$), the Gibbs energy changes from 146.793 to –213.774 kJ, moving into the region of negative values ΔG at temperatures above 700–800 °C, which indicates an increase in the thermodynamic probability of the reaction with increasing temperature.

Table 3 – Calculated values of ΔG for chemical reactions of hematite (Fe_2O_3) reduction by reducing agents C, CO, H_2, CH_4

Parameter	Chemical reaction	Design temperature range, ºC (at a pressure of 101.33 kPa)													
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C	1300 °C	1400 °C	1500 °C
ΔG (kJ)	$2Fe_2O_3 + 3C = 4Fe + 3CO_2(g)$	260,934	206,366	152,895	100,433	48,862	-1,924	-52,002	-101,926	-151,978	-202,147	-252,018	-301,593	-350,911	-399,903	-449,021
	$Fe_2O_3 + 3CO(g) = 3CO_2(g) + 2Fe$	-29,619	-30,096	-29,957	-29,368	-28,445	-27,265	-25,878	-24,560	-23,451	-22,539	-21,612	-20,663	-19,707	-18,702	-17,869
	$Fe_2O_3 + 3H_2(g) = 3H_2O + 2Fe$	46,817	65,549	82,386	96,713	108,246	117,367	124,384	129,293	132,177	133,222	132,788	131,006	127,967	123,803	118,373
	$Fe_2O_3 + CH_4(g) = 2Fe + CO_2(g) + H_2O + H_2(g)$	146,793	125,746	103,868	81,081	57,365	32,897	7,815	-18,017	-44,630	-71,931	-99,640	-127,702	-156,083	-184,711	-213,774

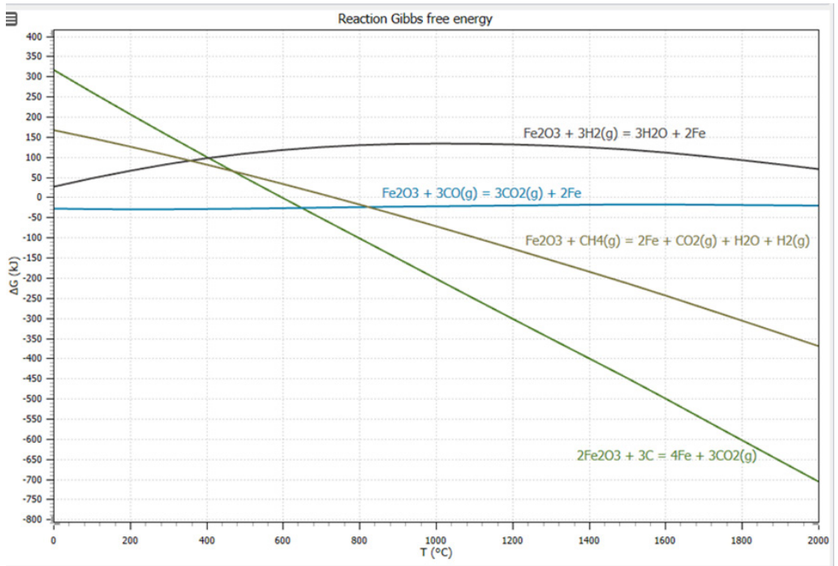


Figure 1 – Graph of the change in Gibbs energy (ΔG) for chemical reactions of hematite (Fe_2O_3) reduction with reducing agents C, CO, H_2, CH_4 depending on temperature

Table 4 and Figure 2 present the calculated Gibbs free energy (ΔG) values ΔG for the chemical reactions of siderite ($FeCO_3$) reduction with reducing agents C, CO, H_2, and CH_4.

Analysis of the calculated Gibbs free energy values ΔG confirms that, at atmospheric pressure and temperatures from 100 to 1500 °C, the thermodynamic feasibility of siderite ($FeCO_3$) reduction depends significantly on the nature of the reducing agent and the process temperature. For the carbon reduction reaction ($2FeCO_3 + C = 2Fe + 3CO_2$), the Gibbs free energy values ΔG range from 112.536 to –507.640 kJ. As temperature increases, ΔG transitions from positive to negative, starting at approximately 400 °C, indicating an increase in the thermodynamic probability of the reaction and its high efficiency at elevated temperatures. During reduction with carbon monoxide ($FeCO_3 + CO = Fe + 2CO_2$), the ΔG values ΔG change from 2.906 to –184.939 kJ. After 200 °C, the Gibbs free energy becomes negative, and with a further increase in temperature, its absolute value increases, indicating an increase in the thermodynamic efficiency of the process.

Table 4 – Calculated values of ΔG for chemical reactions of siderite ($FeCO_3$) reduction by reducing agents C, CO, H_2, CH_4

Parameter	Chemical reaction	Range of design temperatures, ºC (at a pressure of 101.33 kPa)													
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C	1300 °C	1400 °C	1500 °C
ΔG, (kJ)	$2FeCO_3 + C = 2Fe + 3CO_2(g)$	112,536	62,680	13,424	-35,138	-82,943	-129,958	-176,182	-221,660	-266,249	-309,841	-352,153	-393,120	-432,703	-470,817	-507,640
	$FeCO_3 + CO(g) = Fe + 2CO_2(g)$	2,906	-13,086	-28,756	-44,097	-59,097	-73,747	-88,050	-102,029	-115,612	-128,742	-141,278	-153,182	-164,435	-174,992	-184,939
	$FeCO_3 + H_2(g) = Fe + H_2O + CO_2(g)$	28,385	18,795	8,691	-2,070	-13,534	-25,536	-37,963	-50,744	-63,736	-76,822	-89,811	-102,626	-115,211	-127,490	-139,525
	$4FeO + CH_4(g) = 4Fe + 2H_2O + CO_2(g)$	155,311	149,715	142,720	133,877	122,948	110,108	95,422	78,839	60,660	41,098	20,713	-0,382	-22,126	-43,019	-60,257

For the hydrogen reduction reaction ($FeCO_3 + H_2 = Fe + H_2O + CO_2$), the ΔG values vary from 28.385 to –139.525 kJ. At temperatures up to 300–400 °C, the process is characterized by positive Gibbs free energy values; however, a further increase in temperature leads to a transition of ΔG into the negative region, indicating the possibility of spontaneous reaction at high temperatures. In the case of methane reduction ($4FeO + CH_4 = 4Fe + 2H_2O + CO_2$), the Gibbs free energy decreases from 155.311 to –60.257 kJ, becoming negative at temperatures above 1200 °C, indicating the thermodynamic feasibility of using methane only in the high-temperature region.

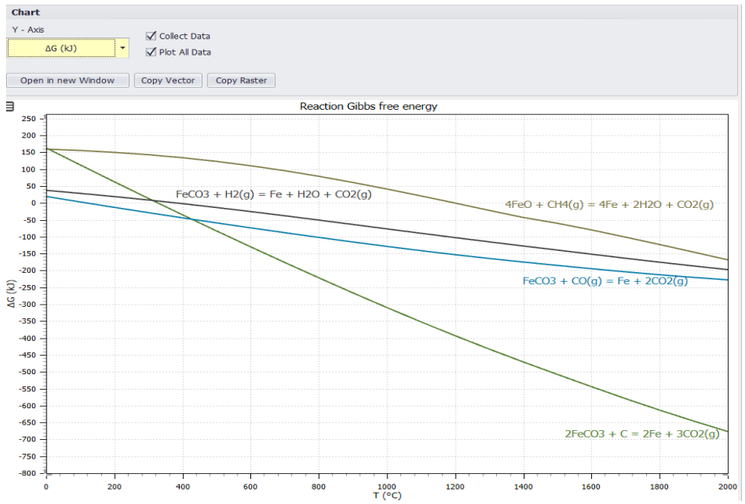


Figure 2 – Graph of the change in Gibbs energy (ΔG) for chemical reactions of siderite ($FeCO_3$) reduction by reducing agents C, CO, H_2, CH_4 depending on temperature

Table 5 and Figure 3 show the calculated values of the Gibbs energy (ΔG) for the chemical reactions of pyrite (FeS_2) reduction by reducing agents C, CO, H_2, CH_4

An analysis of the calculated Gibbs free energy values ΔG confirms that, at atmospheric pressure and temperatures ranging from 100 to 1500 °C, the thermodynamic feasibility of pyrite (FeS_2) reduction depends significantly on the nature of the reducing agent and the process temperature. For the carbon reduction reaction ($FeS_2 + 2C = Fe + 2CS$), the Gibbs free energy values ΔG vary from 585.434 to 58.079 kJ. With increasing temperature, a gradual decrease in ΔG is observed; however, its values ΔG remain positive over the entire studied temperature range, indicating the thermodynamic unfavorability of this reaction. During reduction with carbon monoxide ($FeS_2 + 2CO = Fe + 2COS$), the ΔG values decrease from 93.033 to 35.371 kJ, remaining positive over the entire temperature range, which also indicates the absence of thermodynamic prerequisites for the spontaneous process. For the hydrogen reduction reaction ($FeS_2 + H_2 = FeS + H_2S$), the Gibbs free energy values ΔG vary from 18.712 to 129.376 kJ. Only at a temperature of about 300 °C is a slightly negative ΔG value observed (–1.272 kJ), whereas at other temperatures the Gibbs free energy remains positive and increases with increasing temperature, indicating a low thermodynamic probability of the reaction. In the case of methane reduction ($2FeS_2 + CH_4 = 2FeS + 2H_2S + C$), the ΔG values ΔG vary from 81.634 to 362.309 kJ. Despite a brief transition of the Gibbs free energy to the negative region at a temperature of about 400 °C (–7.825 kJ), a further increase in temperature is accompanied by an increase in positive ΔG values, indicating a thermodynamic unfavorability of the process in the studied temperature range.

Table 5 – Calculated values of ΔG for chemical reactions of pyrite (FeS_2) reduction by reducing agents C, CO, H_2, CH_4

Parameter	Chemical reaction	Range of design temperatures, ºC (at a pressure of 101.33 kPa)													
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C	1300 °C	1400 °C	1500 °C
ΔG, (kJ)	$FeS_2 + 2C = Fe + 2CS(g)$	585,434	547,042	508,788	470,698	432,759	394,938	357,188	319,441	281,729	244,070	206,569	169,231	132,046	95,033	58,079
	$FeS_2 + 2CO(g) = Fe + 2COS(g)$	93,033	89,157	85,411	81,709	77,987	74,192	70,273	66,165	61,903	57,509	53,100	48,684	44,263	39,861	35,371
	$FeS_2 + H_2(g) = FeS + H_2S(g)$	18,712	8,909	-1,272	-11,595	-21,877	-32,082	-42,215	-52,288	-62,321	-72,334	-82,356	-92,594	-104,878	-117,139	-129,376
	$2FeS_2 + CH_4(g) = 2FeS + 2H_2S(g) + C$	81,634	52,925	22,896	-7,825	-38,758	-69,749	-100,742	-131,716	-162,670	-193,625	-224,609	-256,027	-291,524	-326,955	-362,309

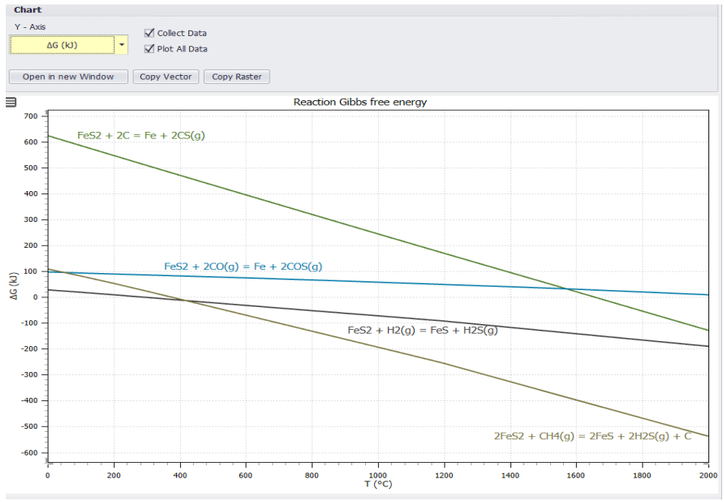


Figure 3 – Graph of the change in Gibbs energy (ΔG) for chemical reactions of pyrite (FeS_2) reduction by reducing agents C, CO, H_2, CH_4 depending on temperature

Table 6 and Figure 4 show the calculated values of the Gibbs energy (ΔG) for chemical reactions of magnetite reduction (FeO Fe_2O_3, Fe_3O_4) with reducing agents C, CO, H_2, CH_4

An analysis of the calculated Gibbs free energy values ΔG confirms that, at atmospheric pressure and temperatures ranging from 100 to 1500 °C, the thermodynamic feasibility of magnetite (Fe_3O_4) reduction depends significantly on the nature of the reducing agent and the process temperature. For the carbon reduction reaction (Fe_3O_4 + 4C = 3Fe + 4CO), the Gibbs free energy values ΔG range from 410.909 to –508.949 kJ. With increasing temperature, a gradual decrease in ΔG is observed, with the Gibbs free energy becoming negative around 800 °C, indicating an increase in the thermodynamic probability of the reaction. A further increase in temperature is accompanied by an increase in the absolute value of the negative Gibbs free energy, indicating an increase in the thermodynamic favorability of the process. When reduced by carbon monoxide (Fe_3O_4 + 4CO = 3Fe + 4CO_2), the ΔG values change from –15.988 to 42.095 kJ.

Table 6 – Calculated values of ΔG for chemical reactions of magnetite reduction (FeO Fe_2O_3, Fe_3O_4) by reducing agents C, CO, H_2, CH_4

Parameter	Chemical reaction	Range of design temperatures, °C (at a pressure of 101.33 kPa)														
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C	1300 °C	1400 °C	1500 °C
ΔG, (kJ)	Fe_3O_4 + 4C = 3Fe + 4CO	410,909	341,102	272,083	203,962	136,875	71,007	5,868	-59,145	-124,080	-188,966	-253,521	-317,762	-381,719	-445,338	-508,949
	Fe_3O_4 + 4CO(g) = 3Fe + 4CO_2(g)	-15,988	-14,309	-11,663	-8,264	-4,127	0,864	6,197	11,263	16,022	20,459	24,872	29,260	33,612	37,995	42,095
	Fe_3O_4 + 4H_2(g) = 3Fe + 4H_2O	85,927	113,217	138,129	159,844	178,127	193,707	206,546	216,401	223,526	228,140	230,738	231,486	230,510	228,001	223,751
	$3Fe_3O_4$ + 4CH_4(g) = 9Fe + 8H_2O + 4CO(g)	759,602	707,967	650,103	585,113	513,113	436,083	353,714	265,101	170,854	71,493	-31,634	-138,146	-247,774	-360,046	-475,680

In the temperature range up to 600 °C, the Gibbs free energy remains negative or close to zero, indicating the possibility of spontaneous reaction. However, with a further increase in temperature, ΔG becomes positive, as a result of which the thermodynamic probability of the process decreases. For the hydrogen reduction reaction (Fe_3O_4 + 4H_2 = 3Fe + 4H_2O), the Gibbs free energy values ΔG vary from 85.927 to 223.751 kJ and remain positive throughout the studied temperature range, indicating the thermodynamic

unfavorability of this reaction. In the case of methane reduction ($3Fe_3O_4$ + 4CH_4 = 9Fe + 8H_2O + 4CO), the Gibbs free energy decreases from 759.602 to – 475.680 kJ. At temperatures above 1100 °C, the ΔG values become negative, indicating the thermodynamically favorable nature of the reduction of magnetite by methane in the high-temperature region.



Figure 4 – Graph of the change in Gibbs energy (ΔG) for chemical reactions of magnetite reduction (FeO Fe_2O_3, Fe_3O_4) by reducing agents C, CO, H_2, CH_4 depending on temperature

Financing information

The research was conducted within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the competition for grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under project AP23487674 «Complex processing of bauxites of Kazakhstan with additional iron extraction using alternative reducing agents in the implementation of the low-carbon development strategy».

Conclusions

Thermodynamic analysis in the studied temperature and pressure range clearly demonstrates the possibility of using hydrogen-based reducing agents as an alternative to carbon for the additional extraction of iron from alumina production waste in Kazakhstan, which will contribute to the achievement of the UN Sustainable Development Goals and carbon neutrality in metallurgy.

REFERENCES

1 Экологический кодекс Республики Казахстан, утвержденный Президентом РК от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК.

2 Концепция развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20 декабря 2018 года № 846.

3 Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121.

4 Казахстан 2019: Добровольный национальный обзор о реализации Повестки до 2030 года в области устойчивого развития, 2019. – 160 с.

5 Казахстан 2022: Добровольный национальный обзор о реализации Повестки до 2030 года в области устойчивого развития, 2022. – 258 с.

6 Завтра было поздно. Экологические риски Казахстана / под рук. Сатпаева Д. А., Януш-Павлетта Б. – Алматы : 2021. – 300 с.

7 Диагностика горнорудного сектора – Казахстан: Отчет. – The World Bank, 2023. – 123 с.

8 **Abdrakhmanov, Y. S., Bykov, P. O., Bogomolov, A. V.** Thermal Capacity of Enriched Fuel Briquets Produced from the Fine of Ekibastuz Coal // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 731–736.

9 **Kaliakparov, A. G., Suslov, A. V., Nurmaganbetova, B. N., Yaroshenko Y. G., Zhdanov A. V., Nurmaganbetov Z. O.** Smelting of high-carbon ferrochrome from chromium agglomerate produced with alumina-silica flux // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47, № 1. – P. 65–69.

10 **Zhunusov, A., Tolymbekova, L., Abdulabekov, Ye., Zholdubayeva, Zh. Bykov, P.** Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // Metalurgija. – 2021. – Vol. 60, № 1–2. – P. 101–103.

11 **Ibraev, I. K., Ibraev,a O. T., Suyundikov, M. M.** Recycling chromium-bearing wastes // Metallurgist. – 2013. – Vol. 56. – № 9–10. – P. 727–730.

12 **Торпищев, Ш. К.** Легкие бетоны с использованием бокситовых шламов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М. : Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона Госстроя СССР, 1991.

13 **Арынгазин, К. Ш., Ларичкин, В. В., Алдунгарова, А. К., Свидерский, А. К., Богомолов, А. В., Быков, П. О., Тлеулесов, А. К., Маусымбаева, Д. К.** Инновационное использование твердых техногенных отходов предприятий теплоэнергетики и металлургии Павлодарской области в производстве строительных материалов // Наука и техника Казахстана. – 2016. – № 3–4. – С. 34–39.

14 **Zhunusov, A. K., Bykov, P. O., Kenzhebekova, A. Ye., Zhunussova A. K., Rahmat Azis Nabawi.** Study of the isothermal kinetics of reduction from mill scale // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra. – 2024. – №1(328). – P. 59–67.

15 **Zhunussova, A. K., Bykov, P. O., Zhunusov, A. K., Kenzhebekova, A. Ye.** Research of the production of iron ore sinter from bauxite processing waste // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra. – 2024. – № 2(329). – P. 73–81.

16 **Spreitzer D., Schenk J.** Reduction of Iron Oxides with Hydrogen – A Review // Steel research. – 2019. – https://doi.org/10.1002/srin.201900108

17 **Rukini A., Rhamdhani M. A., Brooks G. A., Van den Bulck A.** Metals Production and Oxides Reduction Using Hydrogen : A Review // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2022. – Vol. 8. – P. 1–24. – https://doi.org/10.1007/s40831-021-00486-5.

18 **Zenkov V. S., Pasichnyi V. V., Red'ko V. P.** Reduction of iron-conyaaining metallurgical waste to obtain hydrogen with iron vapor method // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2008. – Vol. 47. – № 11–12. – P. 733–742.

19 **Plaul J. F., Krieger W., Back E.** Reduction of Fine Ores in Argon-Hydrogen Plasma // Steel Research. – 2005. – Vol. 76. – № 8.

20 **Ибрагимов А. Т., Будон С. В.** Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана. – Павлодар, 2010. – 304 с.

REFERENCES

1 Ecologicheskii kodeks Respubliki Kazakhstan ot 02.01.2021 №400-VI ZRK (s izmeneniyami ot 05.07.2023 №17-VIII) [Environmental Code of the Republic of Kazakhstan, approved by the President of the Republic of Kazakhstan on January 2, 2021 No. 400-VI ЗРК.].

2 Koncepciya razvitiya obrabatyvayuscheii promyshlennosti Respubliki Kazakhstan na 2023 – 2029 gody, utverzhdennaya Pravitelstvom Respubliki Kazakhstan ot 20 decabriya 2018 goda № 846 [The concept of development of the manufacturing industry of the Republic of Kazakhstan for 2023–2029, approved by the Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan dated December 20, 2018 No. 846].

3 Strategiya dostizheniya uglerodnoi ntitralnosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda, utverzhdennaya Ukazom Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 2 fevraliya 2023 goda № 121 [On approval of the Strategy for achieving carbon neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060, Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated February 2, 2023 No. 121].

4 Kazakhstan 2019: Dobrovolnyi nacionalnyi obzor o realizacii Povestki do 2030 goda v oblasty ustoichivogo razvitiya, 2019. – 160 p [Kazakhstan 2019: Voluntary National Review on the Implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2019. – 160 p.].

5 Kazakhstan 2022: Dobrovolnyi nacionalnyi obzor o realizacii Povestki do 2030 goda v oblasty ustoichivogo razvitiya, 2022. – 258 p. [Kazakhstan 2022: Voluntary National Review on the Implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development, 2022. – 258 p.]

6 Zavtra bylo pozdno. Ecologicheskie ryski Kazakhstana / pod ruk. Satpaeva D. A., Yanush-Pavletta B. – Almaty : 2021. – 300 p [Tomorrow was too late. Environmental risks of Kazakhstan / edited by Satpaev D. A., Janusz-Pavletta B. – Almaty: 2021. – 300 p.].

7 Diagnostika gornorydnogo sektora – Kazakhstan: Otchet. – The World Bank, 2023. – 123 p [Mining Sector Diagnostic – Kazakhstan: Report. – The World Bank, 2023. – 123 p.].

8 **Abdrakhmanov, Y. S., Bykov, P. O., Bogomolov, A. V.** Thermal Capacity of Enriched Fuel Briquets Produced from the Fine of Ekibastuz Coal // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 731–736.

9 **Kaliakparov, A. G., Suslov, A. V., Nurmaganbetova, B. N., Yaroshenko Y. G., Zhdanov A. V., Nurmaganbetov Z. O.** Smelting of high-carbon ferrochrome from chromium agglomerate produced with alumina-silica flux // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47, № 1. – P. 65–69.

10 **Zhunusov, A., Tolymbekova, L., Abdulabekov, Ye., Zholdubayeva, Zh. Bykov, P.** Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // Metalurgija. – 2021. – Vol. 60, № 1–2. – P. 101–103.

11 **Ibraev, I. K., Ibraev,a O. T., Suyundikov, M. M.** Recycling chromium-bearing wastes // Metallurgist. – 2013. – Vol. 56. – № 9–10. – P. 727–730.

12 **Torpischev Sh. K.** Legkie betony s ispolzovaniem boksitovyh shlamov: dissertaciya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tehnicheskih nauk [Lightweight concrete using bauxite slurry: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. – Moscow : Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete of the USSR Gosstroy, 1991.

13 **Aryngazin K. Sh., Larichkin V. V., Aldungarova A. K., Sviderskii A. K., Bogomolov A. V., Bykov P. O., Tleulessov A. K., Mausymbayeva D. K.** Innovacionnoe ispolzovanie tverdyh tehnogennyh othodov predpriyatii teploenergetiki I metalurgii Pavlodarskoi oblasti v proizvodstve stroitelnyh materialov [Innovative use of solid man-made waste from thermal power and metallurgy enterprises of the Pavlodar region in the production of building materials] // Science and Technology of Kazakhstan. – 2016. – № 3–4. – С. 34–39.

14 **Zhunusov, A. K., Bykov, P. O., Kenzhebekova, A. Ye., Zhunussova A. K., Rahmat Azis Nabawi.** Study of the isothermal kinetics of reduction from mill scale // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra. – 2024. – №1(328). – P. 59–67.

15 **Zhunussova, A. K., Bykov, P. O., Zhunusov, A. K., Kenzhebekova, A. Ye.** Research of the production of iron ore sinter from bauxite processing waste // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syra. – 2024. – № 2(329). – P. 73–81.

16 **Spreitzer D., Schenk J.** Reduction of Iron Oxides with Hydrogen – A Review // Steel research. – 2019. – https://doi.org/10.1002/srin.201900108

17 **Rukini A., Rhamdhani M. A., Brooks G. A., Van den Bulck A.** Metals Production and Oxides Reduction Using Hydrogen : A Review // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2022. – Vol. 8. – P. 1–24. – https://doi.org/10.1007/s40831-021-00486-5.

18 **Zenkov V. S., Pasichnyi V. V., Red'ko V. P.** Reduction of iron-conyaaining metallurgical waste to obtain hydrogen with iron vapor method // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2008. – Vol. 47. – № 11–12. – P. 733–742.

19 **Plaul J. F., Krieger W., Back E.** Reduction of Fine Ores in Argon-Hydrogen Plasma // Steel Research. – 2005. – Vol. 76. – № 8.

20 **Ibragimov A. T., Budon S. V.** Razvitie tehnologii proizvodstva glinozema iz boksitov Kazakhstana [Development of technology for the production of alumina from bauxites of Kazakhstan]. – Pavlodar, 2010. – 304 p.

Received 14.07.26.
Received in revised form 28.07.26.
Accepted for publication 03.08.26.

П. О. Быков[1], М. М. Сүйіндіков[2], *А. Б. Куандыков[3], Р. Б. Муканов[4], С. Починок[5]

[1]Инновациялық Еуразия университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1,2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[4]Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті. Қ. И. Сәтбаева, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[5]«Incom Company» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

14.07.26 ж. баспаға түсті.
28.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БАЛАМАЛЫ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРҒЫШТАРМЕН ҚАЗАҚСТАН БОКСИТТЕРІНЕН ТЕМІРДІ ТОЛЫҚ ӨНДІРУДІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Авторлар көміртегіге (С және СО) балама тотықсыздандырғыштар – сутегі (H_2) және метан (CH_4) пайдалана отырып, Қазақстан бокситтерінен алюминий тотығын өндіру кезінде түзілетін құрамында темір бар қалдықтарды өңдеуге тарту мүмкіндігіне талдау жүргізді.

Бұл мақалада С, СО, H_2, CH_4 тотықсыздандырғыштары бар без құмдары мен үйінді шламдарының құрамына кіретін минералдардың тотықсыздану процесіне термодинамикалық талдау жасалды. Есептеу үшін Outotec Technologies компаниясының HSC Chemistry 9.0 бағдарламалық құралы пайдаланылды. Есептеулерде зерттелетін температура диапазоны 100 – 1500 °С шегінде, қысым 101,33 кПа шегінде қабылданды.

Зерттелген температура мен қысым диапазонындағы термодинамикалық талдау Қазақстанның алюминий өндірісі қалдықтарынан темірді толық алу үшін сутегі негізіндегі көміртегіге балама тотықсыздандырғыштарды пайдалану мүмкіндігін айқын көрсетеді, бұл БҰҰ-ның Тұрақты даму мақсаттарына және металлургиядағы көміртегі бейтараптығына қол жеткізуге ықпал ететін болады.

Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің 2024–2026 жылдарға арналған ғылыми және (немесе) ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыруға арналған конкурс бойынша гранттық қаржыландыру шеңберінде «Төмен көміртекті даму стратегиясын іске асыру кезінде баламалы тотықсыздандырғыштармен Темірді толық ала отырып, Қазақстан бокситтерін кешенді қайта өңдеу» AP23487674 жобасы бойынша жүргізілді.

Кілтті сөздер: боксит, темір, көміртегі бейтараптығы, сутегі, метан, қайта өңдеу.

П. О. Быков[1], М. М. Сүйіндіков[2], *А. Б. Куандыков[3],
Р. Б. Муканов[4], С. Починок[5]
[1]Инновационный Евразийский университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар;
[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[4]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[5]ТОО «Incom Company», Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 14.07.26.
Поступило с исправлениями 28.07.26.
Принято в печать 03.08.26.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ БОКСИТОВ КАЗАХСТАНА АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ

Авторами проведен анализ возможности вовлечения в переработку железосодержащих отходов, образующихся при производстве глинозема из бокситов Казахстана с использованием альтернативных углероду (С и СО) восстановителей – водорода (H_2) и метана (CH_4).

В данной статье проведен термодинамический анализ процесса восстановления минералов железа, входящих в состав железистых песков и отвальных шламов восстановителями – С, СО, H_2, CH4. Для термодинамических расчетов использовалось программное обеспечение HSC Chemistry 9.0 компании Outotec Technologies. В расчетах исследуемый температурный диапазон принимался в пределах 100 – 1500 °С, давление в пределах 101,33 кПа.

Термодинамический анализ в исследованном диапазоне температур и давлений однозначно свидетельствует о возможности использования альтернативных углероду восстановителей на основе водорода для доизвлечения железа из отходов глиноземного производства Казахстана, что

будет способствовать достижению Целей устойчивого развития ООН и углеродной нейтральности в металлургии.

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по конкурсу на грантовое финансирование по научным и (или) научно-техническим проектам на 2024–2026 годы по проекту AP23487674 «Комплексная переработка бокситов Казахстана с доизвлечением железа альтернативными восстановителями при реализации стратегии низкоуглеродистого развития».

Ключевые слова: боксит, железо, углеродная нейтральность, водород, метан, рециклинг.

МРНТИ 53.49.15

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/342-352

Б. Т. Ғылымханов[1], А. А. Амитова[2], М. А. Елубай[3], Е. С. Меркибаев[4], Г. С. Айткалиева[5]

[1,2,4,5]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5554-1061

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7721-6473

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

*e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА КРАСНОГО ШЛАМА

Геополимерные и щелочно-активированные материалы рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным цементным системам благодаря снижению углеродного следа и возможности утилизации промышленных отходов. Одним из ключевых компонентов таких систем является красный шлам — крупнотоннажный отход глиноземного производства, характеризующийся высоким содержанием оксидов железа, кальция, алюминия и кремния. Однако высокая степень кристалличности и низкая реакционная способность исходного красного шлама существенно ограничивают его практическое применение в строительных и геополимерных материалах. В данной работе исследовано влияние термической активации красного шлама при 600 °C на изменение его физико-химических свойств и фазового состава. Методами рентгенофлуоресцентного (XRF), рентгенофазового (XRD) и термогравиметрического анализа (TGA) установлено, что прокалка способствует дегидратации и частичному разложению гидратированных и карбонатных фаз, сопровождается структурной перестройкой минеральной матрицы и повышением содержания термически устойчивых компонентов. После термообработки наблюдаются изменения интенсивности дифракционных максимумов, повышение степени кристалличности железосодержащих фаз и формирование более реакционноспособной структуры материала. Полученные результаты подтверждают перспективность использования термически активированного красного шлама в качестве компонента геополимерных и строительных композиционных материалов.

Ключевые слова. Красный шлам, подготовка сырья, термическая активация, фазовый состав, геополимерные композиции.

Введение

Красный шлам (КШ) является одним из наиболее масштабных отходов глиноземной промышленности, образующимся при переработке бокситов по способу Байера. По данным International Aluminum Institute, ежегодный объём образования красного шлама в мире составляет порядка 139–208 млн тонн [1], что создает серьезные экологические проблемы, связанные с высокой щёлочностью, содержанием тяжелых металлов и загрязнением окружающей среды [2].

Несмотря на высокое содержание оксидов железа, алюминия и кремния [3], необработанный красный шлам характеризуется низкой реакционной способностью, что существенно ограничивает его практическое применение. В настоящее время уровень переработки красного шлама остаётся крайне низким и, по данным литературы, составляет менее 5 % от общего объёма образующихся отходов, тогда как мировые накопленные запасы уже достигли порядка 4 млрд тонн [4]. Основная масса красного шлама складируется в отвалах, занимая значительные площади и создавая серьёзные экологические риски вследствие высокой щёлочности и возможного выщелачивания токсичных компонентов. Основными причинами низкой активности являются наличие устойчивых кристаллических фаз, высокая остаточная щёлочность, крупнодисперсная структура частиц и низкая удельная поверхность [5].

В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется различным методам активации красного шлама, включая механическую, химическую и термическую обработку. Механическая активация является одним из наиболее распространённых способов повышения реакционной способности красного шлама. Данный метод основан на интенсивном измельчении материала, сопровождающемся уменьшением размера частиц, разрушением агломератов и увеличением удельной поверхности. В процессе механической обработки также происходит частичное нарушение кристаллической структуры минералов и образование структурных дефектов, что способствует повышению химической активности алюмосиликатных компонентов. Согласно данным Li et al. [6], механическая активация способствует повышению ранней активности красного шлама. Ученые [7] установили, что механическая обработка облегчает взаимодействие гематитовой фазы с кремнезёмом в составе красного шлама, что приводит к увеличению прочности геополимерных систем. Однако, несмотря на положительное влияние механической активации, её эффективность часто оказывается ограниченной, поскольку данный метод преимущественно изменяет дисперсность и морфологию частиц без существенной перестройки минералогического состава материала.

Одним из наиболее эффективных методов считается высокотемпературная термическая активация (прокалка), позволяющая существенно повысить реакционную способность материала [2]. Термическая активация улучшает диспергирование частиц красного шлама, способствует увеличению удельной поверхности и формированию более реакционноспособной аморфной структуры [8]. В результате повышается химическая активность алюмосиликатных

компонентов и улучшается взаимодействие красного шлама с цементными и щелочно-активированными системами.

В литературе наиболее часто рассматриваются температуры термообработки в диапазоне 550–900 °C [9, 10], при которых наблюдается повышение реакционной способности материала за счёт дегидроксилирования минералов, формирования аморфных алюмосиликатных фаз и увеличения удельной поверхности. Hou et al. [11] установили, что прокалка при 600 °C в течение 3 часов повышает прочность цементных композитов на 15,3 % по сравнению с необработанным красным шламом. В работе Athira и Shanmugapriya также показано, что максимальная пуццолановая активность достигается при температуре 700°C [8], что связано с образованием более реакционноспособных соединений SiO_2 и Al_2O_3, а также снижением степени кристалличности материала. В [12] также установили, что прокалка при 900 °C приводит к изменению минералогического состава красного шлама и повышению прочности цементных композитов.

Однако чрезмерное повышение температуры может оказывать отрицательное влияние. При температурах выше 750–800°C начинается декарбонизация кальцита с образованием CaO и выделением CO_2, что сопровождается снижением реакционной способности материала и увеличением экологической нагрузки процесса [13, 14]. Кроме того, при слишком высокой температуре возможно спекание частиц и повторная кристаллизация фаз, что уменьшает удельную поверхность и снижает активность красного шлама.

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что предварительная подготовка и термическая активация красного шлама играют ключевую роль в повышении его реакционной способности и возможности применения в строительных и геополимерных материалах. Изменение температуры прокалки существенно влияет на фазовый состав, степень аморфности, удельную поверхность и пуццолановую активность материала. Несмотря на большое количество исследований, вопросы выбора рациональных режимов термообработки и влияния прокалки на физико-химические характеристики красного шлама остаются актуальными, особенно с учетом различий в составе сырья различного происхождения.

В связи с этим в данной работе исследовано влияние термической активации на изменение фазового состава, структуры и свойств красного шлама с целью оценки возможности его дальнейшего применения в качестве активного компонента строительных композитов.

Материалы и методы

Методика проведения термической прокалки красного шлама

Термическую активацию красного шлама проводили в лабораторной муфельной печи. Измельчённый красный шлам подвергали прокалке при температуре 600 °C в течение 3 ч. Выбор режима термообработки был основан на литературных данных, согласно которым данный температурный диапазон обеспечивает повышение пуццолановой активности и реакционной способности

материала. После прокалки образцы охлаждали в печи до комнатной температуры и использовали для дальнейшего физико-химического анализа.

Физико-химические методы исследования термически активированного красного шлама.

Химический состав красного шлама определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре PANalytical. Анализ использовали для определения содержания основных оксидов и оценки изменения химического состава после термической обработки.

Фазовый состав исходного КШ и термически активированного красного шлама (ПКШ) исследовали методом рентгенофазового анализа (XRD) с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance с CuKα- излучением (λ = 1.5406 Å). Съёмку проводили в диапазоне 2θ = 5- 70° с шагом 0.02°. XRD-анализ применяли для оценки изменений минералогического состава и степени аморфизации материала после прокалки.

Термическое поведение красного шлама исследовали методом термогравиметрического анализа (TGA) с использованием прибора NETZSCH TG 209 F1 Libra в атмосфере азота при скорости нагрева 20 K/min.

Результаты и обсуждение

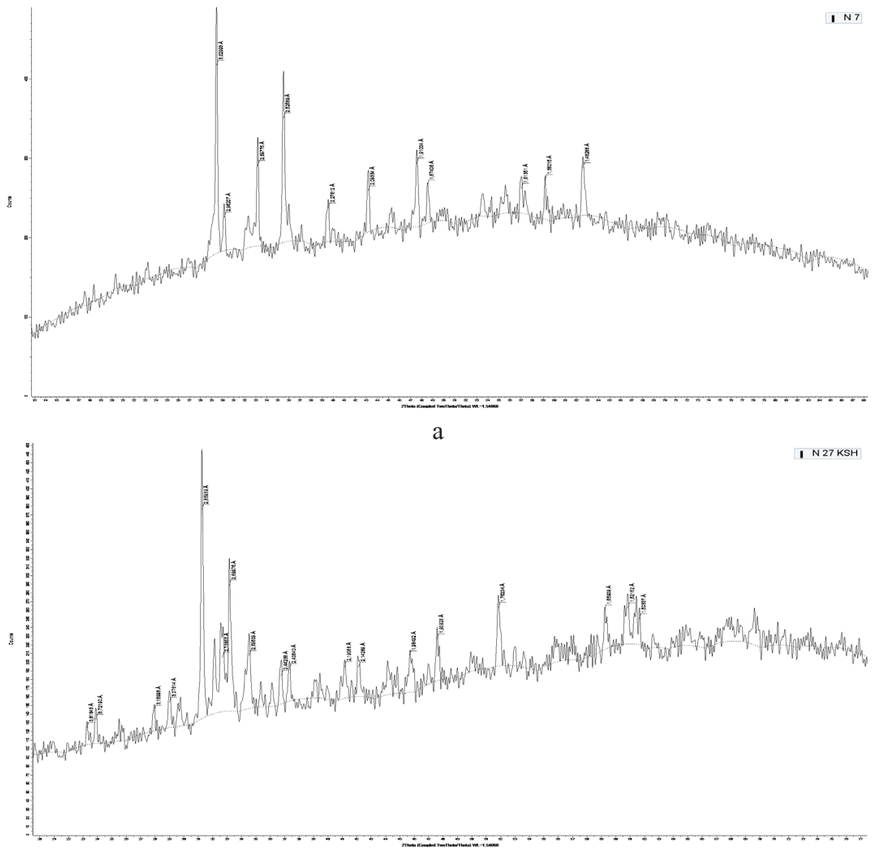
Исследование изменения химического и фазового составов красного шлама при термической обработке

После термической активации (таблица 1) наблюдается увеличение относительного содержания CaO и Fe_2O_3 в составе прокаленного красного шлама (ПКШ). Повышение концентрации данных оксидов связано с дегидратацией и разложением отдельных минералов в процессе прокалки, что приводит к перераспределению фазового состава и увеличению доли термически устойчивых компонентов. Особенно заметен рост содержания CaO, что может быть связано с термическими превращениями кальцийсодержащих фаз и последующей концентрацией оксидной составляющей материала. Полученные результаты XRF-анализа хорошо согласуются с данными рентгенофазового анализа, подтверждающими наличие в составе красного шлама кальций- и железосодержащих минеральных фаз.

Таблица 1 – Основные компоненты в составе красного шлама до и после прокалки

Химический состав	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	MgO
КШ	3.58	6.28	18.07	0.90	0.72	28.47	5.35	19.48	0.22
ПКШ	3.08	6.45	17.42	0.11	0.85	32.14	5.79	22.94	0.35

Рентгенофазовый анализ красного шлама (рисунок 1) показал наличие выраженной кристаллической структуры, характерной для отходов глиноземного производства по способу Байера.



a

b

Рисунок 1 – Дифрактограммы красного шлама
до (а) и после термической активации (b)

На дифрактограмме КШ (рисунок 1a) наблюдаются интенсивные пики в области 2θ≈ 29–30°, соответствующие кальциту ($CaCO_3$), что свидетельствует о присутствии кальцийсодержащих карбонатных фаз в составе материала и согласуется с высоким содержанием CaO, установленным по данным XRF-анализа. Наличие кальцита может быть связано с процессами карбонизации и нейтрализации щёлочных компонентов красного шлама в процессе хранения.

В области 2θ≈ 33–36° фиксируются интенсивные рефлексы железосодержащих фаз, преимущественно гематита и магнетита, что также подтверждает повышенное содержание Fe_2O_3 в составе красного шлама. Дополнительные пики в диапазоне 2θ ≈ 40–50° могут быть связаны с присутствием вторичных минеральных компонентов и алюмосиликатных фаз.

Следует отметить, что на дифрактограмме отсутствует выраженный широкий аморфный максимум в области 20–40° 2θ, характерный для реакционноспособных алюмосиликатных материалов. Это указывает на высокую степень кристалличности исходного красного шлама и объясняет его относительно низкую пуццолановую активность без предварительной активации.

После термической активации (рисунок 1 b) наблюдаются изменения интенсивности и формы отдельных дифракционных максимумов, что свидетельствует о структурных преобразованиях минералов в процессе прокалки. В частности, в области 2θ≈ 29–30° сохраняются интенсивные пики кальцийсодержащих фаз, что согласуется с повышением содержания CaO по данным XRF-анализа. Увеличение содержания CaO и MgO при одновременном снижении SiO_2 может быть связано с формированием новых кальций- и магнийсиликатных фаз в процессе термической активации. Вероятно, образование ларнита (Ca_2SiO_4) и акерманита ($Ca_2MgSi_2O_7$), возникающих вследствие высокотемпературного взаимодействия силикатной матрицы с кальций- и магнийсодержащими компонентами красного шлама.

Одновременно после термообработки более выраженными становятся рефлексы в области 2θ≈ 33–36°, соответствующие железосодержащим фазам. Это свидетельствует о повышении степени кристалличности оксидов железа и согласуется с увеличением содержания Fe_2O_3 с 19.48 до 22.94 % по данным XRF-анализа. Вероятно, в процессе прокалки происходит дегидроксилирование гидрооксидных фаз железа и их частичная трансформация в более стабильные кристаллические формы гематита.

Таким образом, результаты рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов подтверждают, что термическая активация при 600 °C приводит к структурным преобразованиям минеральных фаз красного шлама, сопровождающимся перераспределением кальций-, железо- и силикатсодержащих компонентов, а также формированием более реакционноспособной структуры материала.

Исследование термических превращений красного шлама методом ТГА

С целью более детального изучения процессов термического разложения минералов и фазовых превращений красного шлама был проведён термогравиметрический анализ образцов. На рисунке 2 представлены ТГ-кривые исходного и прокалённого красного шлама.

Для исходного красного шлама (кривая 1) наблюдается несколько стадий потери массы, связанных с последовательными термическими превращениями минеральных компонентов материала. В области до 100 °C снижение массы обусловлено удалением физически адсорбированной влаги и воды, содержащейся в порах красного шлама [15]. Потеря массы в диапазоне 250–300 °C может быть связана с дегидратацией гидратированных соединений и разложением гидроксидных фаз, включая гиббсит и другие алюмосодержащие минералы [8].

Согласно литературным данным, основные термические превращения красного шлама происходят в диапазоне до 700–800 °C, сопровождаясь удалением влаги, дегидратацией гидроксидных фаз и термическими превращениями кальций-

и железосодержащих соединений [16, 17]. В области 500–700 °C вероятны процессы декарбонизации кальцита и структурной перестройки минеральной матрицы материала. Полученные результаты хорошо согласуются с данными XRD-анализа, где после термической активации наблюдались изменения интенсивности кальцитовых и железосодержащих фаз.

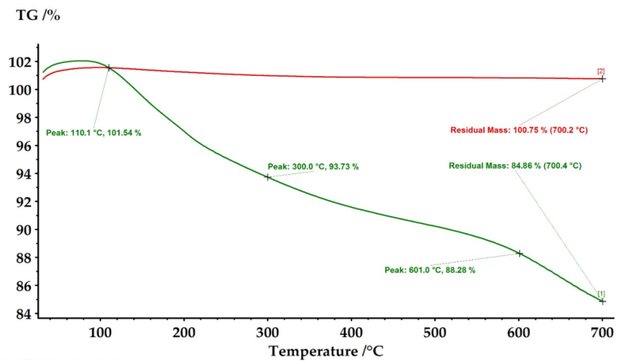


Рисунок 2 – ТГ кривые образцов красного шлама до (1) и после прокалки (2)

Следует отметить, что для прокалённого красного шлама (кривая 2) не наблюдается выраженных стадий потери массы во всём исследуемом температурном диапазоне. По сравнению с исходным красным шламом материал характеризуется более стабильным термическим поведением и практически неизменной остаточной массой. Это свидетельствует о том, что в процессе термической активации при 600 °C уже произошли основные процессы дегидратации и частичного разложения термически нестабильных гидратированных и карбонатных фаз. Отсутствие выраженных термических эффектов после прокалки также подтверждает формирование более стабильной и реакционноспособной структуры материала.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP26197535 «Разработка геополимерных композитов на основе металлургических отходов»).

Выводы

В результате проведённых исследований установлено, что термическая активация красного шлама при 600 °C приводит к изменению фазового состава, снижению содержания гидратированных и карбонатных фаз, а также формированию более стабильной и реакционноспособной структуры материала. Результаты физико- химических анализов (рентгенофлуоресцентный, рентгенофазовый, термогравиметрический) показали, что прокалка способствует структурной перестройке алюмосиликатной матрицы и повышению потенциальной пуццолановой активности красного шлама. Полученные данные подтверждают

перспективность использования термически активированного красного шлама в качестве компонента геополимерных и строительных композиционных материалов. В дальнейшем планируется исследование физико- механических характеристик геополимерных систем на основе прокалённого красного шлама, включая оценку прочностных, структурных и эксплуатационных свойств материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Brunori, C., Cremisini, C., Massanisso, P., Pinto, V., Torricelli, L.** Reuse of a treated red mud bauxite waste: Studies on environmental compatibility. Journal of Hazardous Materials. – 2005. – 117(1). – P. 55–63. – https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.09.010

2 **Lyu Z., Li Y., Fan M., Huang Y., Li C.** Analysis of Calcined Red Mud Properties and Related Mortar Performances // Fluid Dynamics & Materials Processing. – 2024. – Vol. 20. – № 5. – P. 901–913. – https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.043512

3 **Shrey A., Nikhil D.** Process flowsheet for extraction of Fe, Al, Ti, Sc, and Ga values from red mud // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 184. – P. 107601. – https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107601

4 **Archambo M., Kawatra S. K.** Red Mud: Fundamentals and New Avenues for Utilization // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2021. – Vol. 42. – № 7. – P. 427–450. – https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781109

5 **Wang J., Liu B., Wang D., Sun R.** Characterization of red mud and its utilization in preparing alternative cementitious materials: A review // Cleaner Materials. – 2026. – Vol. 19. – P. 100378. – https://doi.org/10.1016/j.clema.2026.100378

6 **Li Y., Min X., Ke Y., Liu D., Tang C.** Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation // Waste Management. – 2019. – Vol. 83. – P. 202–208. – https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.019

7 **Singh S., Aswath M. U., Ranganath R. V.** Effect of mechanical activation of red mud on the strength of geopolymer binder // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 177. – P. 91–101. – https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.096

8 **Athira K., Shanmugapriya T.** Investigation on properties and heavy metal ion extraction of thermally activated red mud incorporated cement mortar // Polish Journal of Environmental Studies. – 2023. – Vol. 32, № 5. – P. 3959–3970. – https://doi.org/10.15244/pjoes/162550

9 **Zhao S., Muhammad F., Yu L., Xia M., Huang X., Jiao B., Li D.** Solidification/stabilization of municipal solid waste incineration fly ash using uncalcined coal gangue-based alkali-activated cementitious materials // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26. – P. 25609–25620. – https://doi.org/10.1007/s11356-019-05832-5

10 **Koshy N., Dondrob K., Hu L., Wen Q., Meegoda J. N.** Synthesis and characterization of geopolymers derived from coal gangue, fly ash and red mud // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 206. – P. 287–296. – https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.076

11 **Hou, S., Gao, S., Zhang, L., Li, N., Zhu, Y.** Effects of thermal and mechanical activation on properties of bayer red mud // Bulletin of the Chinese Ceramic Society, – 2020. – 39(5). – P.1573–1577.

12 **Ye, N., Yang, J., Ke, X., Zhu, J., Li, Y.** Synthesis and characterization of geopolymer from bayer red mud with thermal pretreatment // Journal of the American Ceramic Society. – 2014. – 97(5). – P.1652–1660. – https://doi.org/10.1111/jace.12840

13 **Antunes M. L. P., Conceição F. T., Navarro G. R. B., Fernandes A. M., Durrant S. F.** Use of red mud activated at different temperatures as a low cost adsorbent of reactive dye // Engenharia Sanitaria e Ambiental. – 2021. – Vol. 26. – № 5. – P. 805–811. – https://doi.org/10.1590/s1413-415220180180

14 **Chen H., Wang G., Xu Y., Chen Z., Yin F.** Green process for supercritical water oxidation of sewage sludge with red mud as CO_2 absorbent // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 3065–3074. – https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.06.013

15 **Castaldi P., Silvetti M., Santona L., Enzo S., Melis P.** XRD, FTIR, and thermal analysis of bauxite ore-processing waste (red mud) exchanged with heavy metals // Clays and Clay Minerals. – 2008. – Vol. 56. – № 4. – P. 461–469. – https://doi.org/10.1346/CCMN.2008.0560407

16 **Dodoo- Arhin D., Nuamah R.A., Agyei-Tuffour B., Obada D.O., Yaya A.** Awaso bauxite red mud-cement based composites : Characterisation for pavement applications // Case Studies in Construction Materials. – 2017. – Vol. 7. – P. 45–55. – https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.003

17 **Antunes M. L. P., Couperthwaite S. J., Da Conceição F. T., De Jesus C. P. C., Kiyohara P. K., Coelho A. C. V., Frost R. L.** Red mud from Brazil: Thermal behavior and physical properties // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2012. – Vol. 51. – № 2. – P. 775–779. – https://doi.org/10.1021/ie201700k

18 **Wu C. S., Liu D. Y.** Mineral phase and physical properties of red mud calcined at different temperatures // Journal of Nanomaterials. – 2012. – Vol. 3. – 6 p. – https://doi.org/10.1155/2012/628592

Поступило в редакцию 03.06.26.
Поступило с исправлениями 11.06.26.
Принято в печать 10.08.26.

Б. Т. Ғылымханов[1], А. А. Амитова[2], М. А. Елубай[3], Е. С. Меркібаев[4], Г. С. Айтқалиева[5]
[1,2,4,5]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
03.06.26 ж. баспаға түсті.
11.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
10.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚЫЗЫЛ ШЛАМНЫҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНЕ ТЕРМИЯЛЫҚ АКТИВАЦИЯНЫҢ ӘСЕРІ

Геополимерлік және сілтілік-белсендірілген материалдар көміртегі ізін азайту және әртүрлі өнеркәсіптік қалдықтарды кәдеге жарату мүмкіндігіне байланысты дәстүрлі цементтік жүйелерге перспективалы балама ретінде қарастыруға болады. Осындай жүйелердің негізгі компоненттерінің бірі болып– құрамында темір, кальций, алюминий және кремний оксидтері жоғары мөлшерде болатын глинозем өндірісінің ірі тоннажды қалдығы – қызыл шлам болып табылады. Алайда бастапқы қызыл шламның жоғары кристалдылығы мен төмен реакциялық қабілеті оның құрылыс және геополимерлік материалдарда практикалық қолданылуын едәуір шектейді. Осы жұмыста 600 °C температурада қызыл шламды термиялық белсендірудің оның физика-химиялық қасиеттері мен фазалық құрамына әсері зерттелді. Рентгенфлуоресценттік (XRF), рентгенфазалық (XRD) және термогравиметриялық (TGA) талдау нәтижелері күйдіру барысында гидратталған және карбонаттық фазалардың дегидратациясы мен ішінара ыдырауы жүретінін, минералдық матрицаның құрылымдық қайта құрылуы және термиялық тұрақты компоненттердің үлесінің артуы байқалатынын көрсетті. Термиялық өңдеу процесінен кейін дифракциялық максимумдар қарқындылығының өзгеруі, теміркұрамды фазалардың кристалдылығының артуы және материалдың реакциялық қабілетінің жоғарылауы анықталды. Алынған нәтижелер термиялық белсендірілген қызыл шламды геополимерлік және құрылыс композициялық материалдарының компоненті ретінде қолданудың перспективалылығын растайды.

Кілтті сөздер: Қызыл шлам, шикізатты дайындау, термиялық белсендіру, фазалық құрам, геополимерлік композициялар.

B. T. Gylymkhanov[1], A. A. Amitova[2], M .A. Yelubay[3], Ye. S. Merkibayev[4], G. S. Aitkaliyeva[5]
[1,2,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 03.06.26.
Received in revised form 11.06.26.
Accepted for publication 10.08.26.

THE EFFECT OF THERMAL ACTIVATION ON THE PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF RED MUD

Geopolymer and alkali-activated materials are considered promising alternatives to conventional cement systems due to their reduced carbon footprint and the possibility of industrial waste utilization. One of the key components of such systems is red mud, a large-tonnage waste generated during alumina production, characterized by a high content of iron, calcium, aluminum, and silicon oxides. However, the high crystallinity and low reactivity of untreated red mud significantly limit its practical application in construction and geopolymer materials. In this

study, the effect of thermal activation of red mud at 600 °C on its physicochemical properties and phase composition was investigated. X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric analysis (TGA) revealed that calcination promotes dehydration and partial decomposition of hydrated and carbonate phases, accompanied by structural reorganization of the mineral matrix and an increase in thermally stable components. After thermal treatment, changes in diffraction peak intensity, increased crystallinity of iron-containing phases, and the formation of a more reactive material structure were observed. The obtained results confirm the potential of thermally activated red mud as a component of geopolymer and construction composite materials.

Keywords: Red mud, raw material pre-treatment, thermal activation, phase composition, geopolymer composites.

МРНТИ 53.39.33

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/353-370

***Е. С. Жәнібеков[1], С. А. Абдулина[2]**

[1,2]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1732-0047

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

*e-mail: znybekov@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СПЕКАНИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА ДЛЯ ПРЕСС-ФОРМ ПРОИЗВОДСТВА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В настоящей статье представлено исчерпывающее исследование, посвященное проблеме повышения эксплуатационной стойкости пресс-инструмента, применяемого в атомной промышленности для формования топливных таблеток из порошка диоксида урана (UO_2). Основное внимание уделено технологическим аспектам и процессам контактного взаимодействия стальных матриц, оснащенных твердосплавными втулками из вольфрамокобальтового сплава марки ВК8, а также стальных пуансонов с износостойким хромовым покрытием Хтв9. Проведенный производственный мониторинг процессов изготовления современных топливных таблеток выявил, что фактическая наработка матриц составляет от 500 до 1200 рабочих циклов (лодок), что значительно ниже проектных нормативных значений в 2500 циклов. Деградация матриц инициирует неконтролируемый рост сил трения при выталкивании прессовок, что приводит к образованию торцевых трещин на таблетках и последующим сколам покрытия пуансонов.

В качестве инновационного решения теоретически и технологически обоснован переход к методу искрового плазменного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS). Подробно раскрыты физические принципы джоулева нагрева микроконтактов импульсным током, обеспечивающие сверхбыструю консолидацию порошковых систем. Показано, что метод SPS позволяет исключить органические связующие вещества из технологической схемы, что может снизить вероятность образования углеродистых дефектов. Высокие скорости нагрева и сокращение продолжительности выдержки создают предпосылки для ограничения роста зерен WC и формирования более однородной структуры. Количественные характеристики плотности, микротвердости, фазового состава и эксплуатационного ресурса SPS-материала требуют дополнительной экспериментальной проверки. Применение технологии SPS рассматривается как перспективное направление повышения стойкости пресс-инструмента.

Ключевые слова: порошковая металлургия, твердый сплав ВК8, карбид вольфрама, жидкофазное спекание, горячее прессование, искровое плазменное спекание, диоксид урана, топливные таблетки.

Введение

Современная атомная энергетика, являясь одним из наиболее высокотехнологичных и наукоемких секторов мировой экономики, предъявляет беспрецедентно строгие требования к качеству, надежности и геометрической точности элементов активной зоны реакторов. Основой тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) для подавляющего большинства коммерческих энергетических реакторов на тепловых нейтронах (включая водо-водяные энергетические реакторы ВВЭР и реакторы большой мощности канальные РБМК, а также сборки современных передовых дизайнов) служат топливные таблетки, изготавливаемые из высокочистого порошка диоксида урана (UO_2).

Технологический процесс производства топливных таблеток представляет собой многостадийную цепочку, в которой операция прессования (формования) играет критическую роль. Несмотря на то, что базовая технология формования ядерного топлива непрерывно оптимизируется на протяжении более шестидесяти лет, обеспечение стопроцентного выхода годной продукции остается сложной инженерной задачей. При двустороннем прессовании порошков диоксида урана малейшие нарушения профиля формующей полости или нестабильность кинематики прессования неизбежно приводят к нарушениям сплошности материала прессовок. Образование микро- и макротрещин в зеленых (неспеченных) таблетках не только влечет за собой увеличение процента брака и рост себестоимости продукции, но и создает риски фрагментации топлива внутри циркониевых оболочек ТВЭЛов в процессе их реакторной эксплуатации.

В цехах уранового производства формование таблеток осуществляется на высокоскоростных автоматизированных прессах с использованием специализированного пресс-инструмента, работающего в условиях экстремальных циклических напряжений и интенсивного абразивного изнашивания [1]. Стандартная конструкция пресс-оснастки представляет собой system контактного трения, состоящую из стальной пресс-формы (матрицы) и пары пуансонов (верхнего и нижнего). Для обеспечения требуемой размерной стабильности и износостойкости внутренней полости матрицы в стальную обечайку (изготавливаемую, как правило, из качественной углеродистой стали 45) запрессовывается рабочая втулка из твердого сплава. Традиционным материалом для таких втулок является спеченный вольфрамокобальтовый сплав марки ВК8, состоящий из 92 мас.% карбида вольфрама (WC) и 8 мас.% кобальта (Co) в качестве пластичной матрицы-связки [2]. В свою очередь, стальные пуансоны для минимизации адгезионного схватывания с порошком UO_2 и снижения коэффициента трения подвергаются нанесению твердого хромового покрытия марки Хтв9.

Ключевой проблемой, препятствующей ритмичному и экономически эффективному производству топливных таблеток передовых дизайнов, является преждевременный выход пресс-инструмента из строя. Согласно утвержденным технологическим инструкциям и проектным нормативам, средний эксплуатационный ресурс твердосплавных матриц должен составлять 2500

рабочих циклов (лодок). Однако многолетний производственный мониторинг свидетельствует о том, что фактический ресурс матриц значительно ниже проектного нормативного значения и составляет от 500 до 1200 лодок.

Параллельно наблюдается деградация рабочих торцов пуансонов. Разрушение хромового покрытия Хтв9 и образование сколов на выталкивающих (нижних) пуансонах требуют частой остановки прессового оборудования для замены оснастки. Как будет показано в дальнейшем анализе, износ матриц и разрушение пуансонов не являются изолированными процессами; они представляют собой взаимосвязанную цепь отказов вследствие абразивного изнашивания, первопричиной которой выступает недостаточная структурная стабильность и низкая износостойкость традиционно изготавливаемых твердосплавных втулок ВК8 [3; 4].

Для выявления фундаментальных причин деградации ресурса пресс-инструмента необходимо провести глубокий ретроспективный анализ методов его изготовления. Втулки ВК8 традиционно производятся методом порошковой металлургии с применением технологии горячего жидкофазного спекания пластифицированных смесей [3]. В первоначальных попытках объяснить причины износа выдвигались предположения о том, что одним из факторов нестабильности микроструктуры может быть неполное удаление органических пластификаторов (синтетического каучука) в условиях длительного изотермического воздействия [4]. Однако детальный анализ физико-химических основ процесса, подкрепленный строгим экспертным рецензированием, показывает, что проблема носит гораздо более комплексный характер.

Настоящая статья ставит своей целью проведение исчерпывающего системного анализа формирования структуры и свойств твердосплавных элементов пресс-инструмента в условиях традиционного горячего прессования, а также разработку и теоретико-экспериментальное обоснование принципиально нового подхода к консолидации сплавов WC-Co – метода искрового плазменного спекания (SPS). Переход к технологии SPS рассматривается как перспективный способ снижения структурной неоднородности, ограничения роста зерен и повышения эксплуатационной стойкости инструментальной оснастки. При этом количественная эффективность такого перехода требует экспериментальной проверки [3; 4].

Материалы и методы

Для разработки эффективных методов повышения стойкости инструмента необходимо детально понимать механику взаимодействия его рабочих поверхностей с прессуемой средой. Порошок диоксида урана (UO2), являющийся керамическим материалом, обладает высокой твердостью и выраженными абразивными свойствами. Процесс консолидации порошка в таблетку сопровождается интенсивным внешним трением частиц о стенки матрицы и торцы пуансонов.

При двустороннем прессовании порошковая засыпка подвергается воздействию оппозитно направленных сил от верхнего и нижнего пуансонов. Вследствие

того, что порошок не является идеальной жидкостью и обладает внутренним трением, давление прессования распределяется по объему будущей таблетки неравномерно. Значительная часть осевого усилия пуансонов трансформируется в боковое (радиальное) давление, которое через порошковое тело передается на твердосплавную втулку матрицы. Это вызывает колоссальные контактные напряжения на поверхности сплава ВК8 [5, с. 11; 6].

Кинематика образования дефектов.

В идеальных условиях, при однородном характере процесса формования, износ поверхностей минимален, что создает предпосылки для высокой производительности. Однако по мере износа стенок матрицы ее идеальная цилиндрическая геометрия искажается, образуя микроскопические зоны выработки (бочкообразность). На этапе выталкивания спрессованной таблетки нижним пуансоном, таблетка, проходя через участки с различной степенью износа, испытывает неравномерные силы трения. В местах, где шероховатость стенки матрицы повышена, силы трения покоя и скольжения резко возрастают.

Слишком высокое трение о стенки изношенной матрицы приводит к тому, что нижняя часть таблетки «застревает», в то время как выталкивающий пуансон продолжает движение. Это генерирует растягивающие осевые напряжения в теле хрупкой таблетки UO_2, что провоцирует образование торцевых трещин и так называемый эффект «перепрессовки» или «отслоения шапки». Осколки таблеток, попадая в зазор между пуансоном и матрицей, создают экстремальные точечные нагрузки [6; 7].

Именно этот механизм объясняет деградацию пуансонов, которые сами по себе не изготавливаются из сплава ВК8, а выполнены из инструментальной стали с покрытием Хтв9. Покрытие Хтв9 представляет собой слой твердого гальванического хрома толщиной обычно не менее 9–100 мкм. Оно обладает высочайшей микротвердостью (до 11000 МПа) и низким коэффициентом трения, что делает его превосходным материалом для работы на равномерный износ. Однако твердый хром является чрезвычайно хрупким материалом и крайне чувствителен к сосредоточенным ударным нагрузкам. Попадание твердых керамических осколков UO_2 между изношенной матрицей и пуансоном вызывает пробитие хромового[7; с. 8] слоя и образование сколов, после чего пуансон подлежит немедленной отбраковке. Таким образом, надежность пуансонов является функцией геометрической и фрикционной стабильности матрицы [7].

Изменение микрогеометрии поверхностей.

Поверхности деталей после механической обработки никогда не бывают идеально гладкими. Инструменты оставляют следы в виде микронеровностей – выступов и впадин, совокупность которых формирует шероховатость поверхности. В прецизионном машиностроении шероховатость поверхности оценивается по ГОСТ 2789-73 с использованием ряда параметров: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам; Rq – среднее квадратическое отклонение профиля; Rv – глубина

наибольшей впадины профиля. Измерения выполнялись на профилометре модели 130 завода «Протон» [5; 7; 8].

Таблица 1 – Параметры шероховатости внутреннего отверстия матрицы (сплав ВК8)

Состояние и участок измерения	Ra, мкм	Rz, мкм	Rq, мкм	Rv, мкм
Матрица до эксплуатации (измерение 1)	0,0559	0,125	0,0779	0,119
Матрица до эксплуатации (измерение 2)	0,0623	0,143	0,0881	0,125
Матрица до эксплуатации (измерение 3)	0,0573	0,131	0,0837	0,125
Матрица после эксплуатации (измерение 1)	0,150	0,474	0,212	0,354
Матрица после эксплуатации (измерение 2)	0,206	0,549	0,261	0,455
Матрица после эксплуатации (измерение 3)	0,161	0,493	0,234	0,395

Результаты демонстрируют заметное ухудшение состояния рабочей поверхности после эксплуатации.. Исходная матрица обладает зеркальной полировкой со средним Ra 0,058 мкм. После эксплуатации параметр Ra возрастает более чем в 3 раза, достигая 0,150–0,206 мкм. Показатель Rz (высота микронеровностей) увеличивается с 0,13 мкм до 0,55 мкм. Подобный характер изменения профиля может быть связан с абразивным изнашиванием кобальтовой связки и последующим ослаблением закрепления отдельных зерен карбида вольфрама. При изнашивании кобальтовой связки под воздействием частиц диоксида урана отдельные зерна WC могут обнажаться и постепенно терять опору, что создает условия для их выкрашивания из тела сплава (что подтверждается ростом параметра Rv до 0,455 мкм). Эти каверны в дальнейшем забиваются порошком UO2, усугубляя абразивный износ и создавая макроскопические борозды.

Аналогичному профилометрическому контролю были подвергнуты стальные пуансоны с покрытием Хтв9 (Таблица 2). Измерения проводились на различных участках рабочей поверхности.

Таблица 2 – Результаты измерений параметров шероховатости пуансона с покрытием Хтв9

Состояние пуансона	Участок	Ra, мкм	Характеристика износа
Пуансон до эксплуатации	Сторона А	~0,09 – 0,12	Исходная гладкая поверхность
Пуансон после эксплуатации	Сторона Б	~0,19 – 0,24	Интенсивный износ рабочей площади

Увеличение шероховатости на рабочей площади пуансона (участок Б) подтверждает факт деградации покрытия под воздействием осколков керамики и экстремальных давлений. Для снижения вероятности этого явления необходимо обеспечить высокую стабильность внутренней геометрии и состояния рабочей поверхности матрицы ВК8.

Анализ микроструктурной стабильности и технологических дефектов традиционных твердых сплавов ВК8.

Для понимания природы недостаточной износостойкости втулок необходимо рассмотреть фундаментальные основы получения вольфрамокобальтовых твердых сплавов. Сплавы системы WC-Co синтезируются методами порошковой металлургии. Исходные порошки карбида вольфрама и кобальта подвергаются длительному совместному помолу в шаровых или аттриторных мельницах в среде органических жидкостей. На этом этапе в смесь вводится пластификатор, который выполняет двоякую функцию: во-первых, он обволакивает частицы, снижая межчастичное трение при холодном прессовании, что способствует более плотной упаковке; во-вторых, он действует как клей, придавая спрессованным «зеленым» брикетам механическую прочность, достаточную для их транспортировки и механической обработки [9, с. 15].

Химия пластификаторов и проблема остаточного углерода.

В отечественной порошковой металлургии наиболее широкое применение в качестве пластификатора нашел синтетический каучук, вводимый в смесь в виде раствора в бензине. Зарубежные производители часто используют парафин, поливинилацетат, полиэтиленгликоль или камфору. Сравнительный анализ показывает, что смеси с добавлением парафина обладают существенными недостатками: при прессовании в брикетах возникает высокий градиент напряжений. При снятии давления и выталкивании брикета из пресс-формы происходит сильное упругое расширение. Опытным путем установлено, что в смесях WC + 6 % Co с парафином расслойные трещины появляются уже при давлениях прессования 160 МПа, а при 260 МПа разрушаются все брикеты. В противовес этому, брикеты, пластифицированные каучуком, выдерживают давления до 200 МПа без образования трещин.

Более того, парафин требует специализированного печного оборудования для предварительной отгонки перед окончательным спеканием (так называемого «деваксинга»), тогда как изделия с каучуком могут подвергаться одностадийному спеканию. Тем не менее, использование каучука сопряжено с серьезным химическим недостатком. В условиях вакуумного спекания длинные углеводородные цепи

каучука подвергаются термической деструкции, однако полного удаления продуктов распада не происходит. Каучук частично обугливается внутри микропор брикета.

Введение около 1 % каучука в исходную смесь приводит к повышению содержания свободного углерода в готовом сплаве на 0,1–0,2 %. При малейшей неравномерности распределения раствора каучука на этапе смешивания (что является частой проблемой при износе смесительного оборудования), в спеченном сплаве образуются локальные скопления графита. Графитовые включения, располагаясь на межфазных границах зерен WC, действуют как концентраторы напряжений и снижают прочность связи между карбидом и кобальтовой матрицей. Это напрямую коррелирует с легкостью абразивного выкрашивания, зафиксированного при анализе матриц [10; 11].

В первоначальной версии исследований высказывалась мысль, что нестабильность микроструктуры вызвана именно флуктуациями в выгорании пластификатора из-за колебаний температуры. Однако критический научный анализ указывает на логическое противоречие: если полимер не способен полностью испариться без остатка даже при длительном (многочасовом) выдерживании при высоких температурах (до 1420 °C), то проблема кроется не в колебаниях режимов, а в химической невозможности бездефектного удаления данного типа пластификатора из закрытой пористости массивной детали.

Анализ качества исходного сырья и технологических режимов.

Для верификации причин падения ресурса оснастки был проведен всесторонний мониторинг физико-механических свойств используемых сплавов ВК8. Отбор проб и спектральный анализ показали, что химический состав смесей в целом соответствовал марочному: содержание кобальта варьировалось от 7,73 до 8,45 %, железа – 0,014–0,037 %, кислорода – 0,2–0,38 %, а углерода – 5,4–5,58 %.

Однако ключевая проблема крылась в состоянии самого пластификатора. Раствор синтеческого каучука в твердосплавной смеси подвержен старению и полимеризационной сшивке при контакте с воздухом. Срок годности пластифицированных смесей составляет не более 3 месяцев при условии хранения в герметичной таре при температуре не выше +25 °C. Установлено, что матрицы, показавшие наихудший ресурс (500–1200 лодок), были изготовлены из сырья с грубым нарушением сроков хранения (срок хранения в некоторых случаях превышал 7 месяцев). Использование «пересушенного» и постаревшего пластификатора резко снижает формуемость порошка, что ведет к образованию незакрывающихся макропор.

Это подтвердилось при металлографическом анализе. Согласно ГОСТ 9391-80, высококачественные твердые сплавы должны относиться к группам А-1 или А-2 (пористость 0,02–0,04 %). Исследованные образцы матриц, полученные из пересушенного сырья, продемонстрировали пористость, соответствующую группам А-6 (0,8 %) и А-5 (0,4 %). Наличие пористости до 0,8% в нагруженном узле трения может существенно снижать сопротивление материала контактным нагрузкам и способствовать ускорению изнашивания.

Следствием высокой пористости стала деградация твердости. Измерения микротвердости по Виккерсу (нагрузка 200 г, выдержка 10 с) выявили экстремально низкие и нестабильные значения (Таблица 3)

Таблица 3 – Эволюция физико-механических свойств твердосплавных втулок ВК8

Идентификатор серии	Твердость (HRC)	Микротвердость (HV 200)	Пористость по ГОСТ 9391-80
Образцы № 1	88,0	1130,8	Группа А-6 (0,8 %)
Образцы № 2	90,0	1555,4	Группа А-5 (0,4 %)
Опытные образцы (тест 1)	90,0	1455,3	Группа А-2...А-3 (0,04-0,08 %)
Опытные образцы (тест 2)	91,0	1632,4	Группа А-2...А-3 (0,04-0,08 %)
Опытные образцы (тест 3)	91,0	1494,4	Группа А-2...А-3 (0,04-0,08 %)

Использование свежих смесей в опытных образцах сопровождалось снижением пористости до уровня, соответствующего группам А-2–А-3 и увеличением микротвердости до 1450–1630 HV. Однако дисперсия значений твердости между замерами (почти на 200 HV) сохранилась, что может свидетельствовать о влиянии дополнительных факторов, связанных с параметрами и стабильностью процесса горячего прессования.

Нестабильность режимов горячего прессования.

В связи с тем, что габариты изготавливаемых матриц превышают размеры однородной зоны нагрева стандартных пресс-печей, производство втулок ВК8 осуществляется в две стадии на различном оборудовании.

На первой стадии предварительно подпрессованная заготовка нагревается со скоростью ~500 °С/ч. При температуре 1100 °С проводится первая изотермическая выдержка, во время которой прикладывается давление от 5 до 10 тонн. Затем температура повышается до 1200 °С для второй выдержки (20–30 минут), в ходе которой давление ступенчато увеличивается до 13–20 тонн.

На второй стадии заготовка переносится в высокотемпературную печь, где нагревается со скоростью ~600 °С/ч до температур появления жидкой фазы (1400–1420 °С). Во время нагрева давление прикладывается градиентно: 5 тонн при 1000 °С, 10 тонн при 1100 °С, 15–20 тонн при 1200 °С and 20–30 тонн при 1300 °С. Окончательная третья изотермическая выдержка длится от 15 до 30 минут при температуре 1400–1420 °С и максимальном давлении 30–40 тонн [13].

Анализ показал, что в условиях полуавтоматизированного производства точное соблюдение длительности изотермических выдержек, а главное – синхронизация момента приложения давления с достижением требуемой температуры в объеме детали, практически невыполнимы. Разброс во времени включения маслостанций операторами приводил к тому, что в одних партиях уплотнение начиналось до появления жидкой фазы, а в других – после ее активного формирования. Именно эти флуктуации, а не гипотетические «трудности контроля», создают

гетерогенность структуры, вызывая разброс твердости в пределах 1450–1630 HV даже при использовании идеального сырья [14].

Термодинамика жидкофазного спекания и проблема коалесценции зерен.

Даже при идеальном соблюдении температурно-временных параметров, метод горячего прессования имеет физические ограничения, связанные с кинетикой жидкофазного спекания (ЖФС) и возможным ростом зерен WC при длительном воздействии повышенных температур.

Процесс ЖФС твердых сплавов WC-Co инициируется при достижении температуры 1300–1320 °С, когда в системе образуется жидкая фаза эвтектического состава. Согласно теории капиллярных явлений, жидкий кобальт обладает нулевым краевым углом смачивания по отношению к карбиду вольфрама. Под действием колоссальных капиллярных давлений расплав затекает в поры, вызывая перегруппировку частиц WC и быстрое (в течение 3–5 минут) уплотнение брикета.

Однако для достижения максимальной плотности массивных заготовок температура повышается до 1400–1420 °С, а выдержка продлевается до 30 минут. В этих условиях жидкий кобальт способен растворить до 40 % карбида вольфрама. Растворимость частиц критически зависит от их размера: согласно уравнению Гиббса-Томсона, мелкие наноразмерные и субмикронные частицы обладают избыточной свободной поверхностной энергией и растворяются в расплаве гораздо быстрее крупных зерен.

По мере растворения мелких фракций жидкая фаза пересыщается вольфрамом и углеродом, которые затем осаждаются на более крупных кристаллах, служащих термодинамически выгодными центрами кристаллизации. Этот механизм перекристаллизации через жидкую фазу (растворение-осаждение), известный как Оствальдово созревание (коалесценция), приводит к необратимому укрупнению карбидных зерен. Рост зерен WC может отрицательно влиять на механические и трибологические свойства матриц. Согласно эмпирическому закону Холла-Петча, твердость и предел текучести поликристаллических и композиционных материалов возрастают с уменьшением размера зерна. Мелкие зерна создают непрерывную сеть межфазных границ, которые эффективно тормозят движение дислокаций. Укрупнение зерен WC при длительном жидкофазном спекании снижает микротвердость и предел прочности на изгиб, делая сплав менее устойчивым к абразивному износу порошком UO2. В результате формируется крупнозернистый скелет WC с толстыми прослойками кобальта, из которых твердые частицы легко вырываются при трении, что и объясняет резкий рост параметра Rz до 0,55 мкм [15].

Результаты и обсуждение

Для преодоления ограничений, заложенных в физике традиционного горячего прессования, необходимо внедрение методов консолидации, способных обеспечить уплотнение порошка за время, недостаточное для развития процессов коалесценции. Оптимальным решением этой задачи является технология искрового плазменного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS), также известная как Field Assisted Sintering Technology (FAST).

Принцип действия и электрофизика SPS.

В отличие от конвективно-радиационного нагрева в печах горячего прессования, метод SPS базируется на внутреннем джоулевом нагреве. Порошковая смесь загружается в токопроводящую пресс-форму (как правило, из высокопрочного изостатического графита), к которой через водоохлаждаемые пуансоны одновременно прикладывается одноосное давление (от 30 до 100 МПа) и подается импульсный постоянный ток (DC) высокой силы (от тысяч до десятков тысяч ампер) при низком напряжении.

Электрический ток проходит непосредственно через графитовую оснастку и, что более важно, через сам порошковый компакт. В местах контакта частиц WC и Co локальное электрическое сопротивление максимально. Протекание тока вызывает интенсивное выделение джоулева тепла точно на границах зерен – там, где энергия необходима для активации процессов диффузии. Этот феномен обеспечивает колоссальные скорости нагрева, достигающие 100–1000 °C/мин, что на порядки превышает скорости традиционных печей (5–10 °C/мин).

Первоначально создателями метода (Inoue, 1965) предполагалось, что в зазорах между частицами возникают микроискры и плазменные разряды, которые испепеляют оксидные пленки и очищают поверхности частиц (отсюда и название «искровое плазменное спекание») [15; 16]. Несмотря на продолжающиеся в современной науке дискуссии о фактическом присутствии долгоживущей плазмы в проводящих металлических порошках, достоверно доказано, что мощные электротермические эффекты (электромиграция, эффект Пельтье на контактах разнородных материалов, интенсификация поверхностной диффузии под действием поля) радикально ускоряют массоперенос [17]. Поверхности частиц очищаются и активируются, что приводит к формированию высокопрочных межфазных связей без необходимости длительного термического выдерживания.

Решение проблемы органических пластификаторов.

Наиболее фундаментальным преимуществом применения SPS для изготовления пресс-форм является полное устранение необходимости использования органических пластификаторов. В технологии SPS порошок не нуждается в предварительном холодном прессовании для придания ему транспортной прочности; он засыпается непосредственно в графитовую матрицу установки и спекается in-situ под высоким давлением.

Отсутствие синтетического каучука или парафина в исходной шихте решает сразу несколько проблем: Химическая чистота: В систему не привносится углерод от термодеструкции полимеров. Это снижает вероятность дополнительного поступления углерода от термического разложения органических компонентов. Вместе с тем отсутствие пластификатора само по себе не подтверждает отсутствие η-фаз и свободного графита, поскольку фазовый состав зависит также от стехиометрии исходной смеси и параметров спекания. Нулевая пористость: Исключается образование пор, возникающих при возгонке летучих фракций пластификатора. Логическое разрешение противоречия: Как было справедливо замечено экспертами, попытка выжечь каучук за короткое время при низких

температурах SPS привела бы к фиаско. Одним из главных преимуществ SPS заключается в том, что технология позволяет исключить пластификатор из технологической схемы и тем самым снизить один из возможных источников углеродистых дефектов.

Термокинетика консолидации и сохранение наноструктуры.

Метод SPS позволяет достичь полной плотности твердых сплавов (близкой к 100 % от теоретической) при значительно более низких температурах и за минимальное время. При спекании субмикронных порошков ВК8 методом SPS оптимальная температура консолидации снижается до 1200–1300 °C, а время изотермической выдержки сокращается с часов до 5–10 минут. Снижение температуры на 100–200 °C по сравнению с традиционным ЖФС (1400–1420 °C) означает, что уплотнение происходит либо в твердой фазе за счет интенсифицированной ползучести кобальта, либо на самых ранних стадиях образования минимального количества жидкой фазы [17, с. 2]. Сокращение времени пребывания в высокотемпературном интервале может ограничивать развитие процессов Оствальдова созревания [18, с. 12]. При оптимально выбранном режиме продолжительность процессов растворения и переосаждения зерен WC может быть ограничена. Таким образом, SPS создает предпосылки для сохранения более мелкозернистой структуры по сравнению с длительным жидкофазным спеканием, однако фактический размер зерен WC должен определяться экспериментально.

Прогнозируемые результаты и технологическая эффективность SPS-матриц.

Экспериментальные данные и мировой опыт применения SPS для консолидации систем WC-Co позволяют с высокой точностью спрогнозировать физико-механические характеристики матриц, изготовленных по новой технологии.

Следует отметить, что приведенные далее характеристики SPS-материала имеют прогнозный и литературно-оценочный характер. Они не являются результатами непосредственного испытания матриц, изготовленных авторами методом SPS, и в дальнейшем требуют экспериментального потверждения.

Таблица 4 – Сравнительная оценка параметров традиционного ЖФС и метода SPS для сплава ВК8

Характеристика процесса / свойства	Традиционное горячее прессование (ЖФС)	Искровое плазменное спекание (SPS/FAST)
Механизм нагрева	Внешний (радиация / конвекция от печи)	Внутренний (джоулев нагрев импульсным током)
Скорость нагрева	8–10 °C/мин (500–600 °C/ч)	100–1000 °C/мин
Температура спекания	1400–1420 °C	1200–1300 °C
Изотермическая выдержка	30–60 минут (суммарно)	5–10 минут
Приложенное давление	10–40 МПа	50–100 МПа
Наличие пластификатора	Обязательно (каучук)	Не используется
Остаточная пористость	0,04–0,8 % (Группы А2–А6)	< 0,01 % (Околотеоретическая плотность)

Характеристика процесса / свойства	Традиционное горячее прессование (ЖФС)	Искровое плазменное спекание (SPS/FAST)
Структура карбидной фазы	Крупнозернистая (коалесценция)	Ультрамелкозернистая (подавлен рост)
Микротвердость (HV)	1130–1630 (нестабильная)	1700–1900 (высокая и однородная)
Вязкость разрушения	Снижена (из-за пор и свободного С)	12–14

Материал ВК8, полученный методом SPS, потенциально может характеризоваться высокой плотностью и сниженной пористостью. Однако фактические значения плотности, наличие графита и фазовый состав должны быть подтверждены экспериментально. При формировании мелкозернистой структуры возможно повышение микротвердости по сравнению с традиционно спеченным материалом. Конкретный размер зерна WC и значение микротвердости должны быть установлены путем микроструктурного и механического анализа [19, с. 14]. При этом, благодаря высокой чистоте межфазных границ WC-Co и отсутствию охрупчивающих примесей, сохраняется высокая вязкость разрушения (трещиностойкость) на уровне 12–14.

В контексте эксплуатации пресс-инструмента для формования UO2 это означает радикальное изменение механизма износа. Твердые абразивные частицы диоксида урана более не смогут легко вырывать крупные карбидные зерна из кобальтовой связки. Износ матрицы перейдет из режима микровыкрашивания в режим медленного микрополирования. Можно предположить, что более плотная и однородная структура будет способствовать сохранению геометрической стабильности рабочей поверхности. Количественная оценка изменения шероховатости и ресурса возможна только по результатам длительных эксплуатационных испытаний.

Стабильность геометрии матрицы и отсутствие роста сил трения при выталкивании устранят причину возникновения растягивающих напряжений в формируемой таблетке. Это может снизить вероятность возникновения условий, способствующих образованию торцевых трещин и сколов на прессовках, что, вероятно, будет способствовать снижению локальных ударных нагрузок на хромовое покрытие Хтв9 стальных пуансонов. Потенциальным результатом применения SPS-матриц может стать повышение ресурса пресс-инструмента и снижение простоев оборудования. Достижение нормативного ресурса 2500 лодок и возможное его превышение должны быть подтверждены длительными испытаниями в условиях прессования порошка UO_2.

Выводы

Таким образом, результаты настоящей работы подтверждают наличие связи между качеством исходного сырья, параметрами традиционного горячего прессования, пористостью, микротвердостью и износом матриц ВК8. Преимущества SPS в статье обоснованы на теоретическом уровне и на основании опубликованных данных. Микроструктурное сравнение традиционно спеченных и SPS-образцов, рентгенофазовый анализ и длительные испытания SPS-матриц в

условиях прессования порошка UO_2 в настоящей работе не проводились. Поэтому количественные характеристики SPS-материала и его эксплуатационный ресурс следует рассматривать как предмет дальнейшей экспериментальной проверки.

Установлено, что фактический ресурс исследованных традиционных твердосплавных матриц ВК8 составляет 500–1200 рабочих циклов и ниже проектного нормативного значения 2500 циклов. Установлено, что абразивный износ матриц порошком UO_2 (проявляющийся в росте шероховатости Rz с 0,13 до 0,55 мкм) провоцирует рост сил трения при выталкивании, что инициирует краевые сколы прессовок и последующее разрушение хрупкого хромового покрытия Хтв9 на стальных пуансонах.

Показано, что снижение стойкости исследованных матриц связано с совокупным влиянием пористости, нестабильности микротвердости, качества исходного сырья и параметров горячего прессования. Факторами деградации выступают: высокая остаточная пористость (до 0,4–0,8 %), нестабильность микротвердости (разброс от 1130 до 1630 HV), вызванная нестабильностью ручного управления стадиями прессования, а также химические дефекты от неполного выгорания органических пластификаторов (синтетического каучука). Длительные изотермические выдержки при 1400–1420 °C неизбежно приводят к коалесценции зерен WC, снижая твердость сплава по закону Холла-Петча.

Теоретически обоснована перспективность применения технологии искрового плазменного спекания (SPS) для консолидации сплава WC–Co. Сочетание импульсного электрического тока, повышенной скорости нагрева и одноосного давления может способствовать сокращению продолжительности спекания и ограничению роста карбидных зерен. Фактические плотность, размер зерна и механические свойства материала требуют экспериментального определения.

Важным потенциальным преимуществом SPS является возможность исключения органических пластификаторов из технологического цикла. Это позволяет снизить вероятность поступления дополнительного углерода от термического разложения органических компонентов. Отсутствие η-фаз и свободного графита, а также влияние фазового состава на свойства материала должны быть подтверждены рентгенофазовым анализом.

Предполагается, что применение SPS может способствовать повышению плотности и структурной однородности сплава WC–Co, а также снижению интенсивности изнашивания рабочих поверхностей. Конкретные значения микротвердости, трещиностойкости, шероховатости и ресурса пресс-инструмента должны быть установлены по результатам дополнительных исследований и длительных испытаний матриц в условиях прессования порошка UO_2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Saito H., Iwabuchi A., Shimizu T.** Effects of Co content and WC grain size on wear of WC–Co cemented carbide // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 126–132. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.011.

2 **Yang Y., Li Y., Wang H.** Grain size effect on wear resistance of WC–Co cemented carbides under different tribological conditions // Journal of Materials Science & Technology. – 2020. – Vol. 39. – P. 1–9. – https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.016.

3 **Gee M. G., Gee J., Almond D. B.** Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals // Wear. – 2007. – Vol. 263. – P. 137–148.

4 Проблемы и возможности искрового плазменного спекания: ключевая технология для нового поколения материалов // IntechOpen. – 2019. – [Electronic resource]. – https://www.intechopen.com.

5 Технология искрового плазменного спекания // GeniCore. – [Электронный ресурс]. – https://genicore.eu (дата обращения: 16.06.2026).

6 **Hegeman J. B. J., De Hosson J. Th. M., De With G.** Grinding of WC–Co hardmetals: wear mechanisms and microstructural effects // Wear. – 2001. – Vol. 248. – P. 187–196.

7 **Kim H. C., Oh S. T., Shon I. J.** Microstructural evolution and mechanical properties of spark plasma sintered WC–Co cemented carbides for machine parts and engineering tools // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2006. – Vol. 24. – P. 427–433.

8 Влияние температуры спекания на фазовый состав и микротвердость цементированного карбида WC-8 мас.% Co // ResearchGate. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net.

9 **M. Woydt1 and H. Mohrbacher.** The tribological property profile of hard metals and metal matrix composites based on niobium carbideAM Federal Institute for Materials Research and Testing, DE-12200 Berlin, Germany, NiobelCon bvba, BE-2970 Schilde, Belgium

10 Искровое плазменное спекание мелкозернистых композитов WC-Co // MDPI. – [Электронный ресурс]. – https://www.mdpi.com.

11 Искровое плазменное спекание мелкозернистых композитов WC-Co // ResearchGate. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net.

12 **Myo Hla Myinta, J. Y. H. Fuh a, Y. S. Wong a, L. Lu, Z. D. Chen, C. M.** Choy Evaluation of wear mechanisms of Y-TZP and tungsten carbide punches, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore.

13 Изготовление твердосплавного сплава WC-8Ni-8Fe методом ИПС на основе механохимически синтезированного порошка карбида вольфрама // ResearchGate. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net.

14 Какие преимущества предлагает система искрового плазменного спекания (SPS) по сравнению с традиционным горячим прессованием? // Kintek Furnace. – [Электронный ресурс]. – https://kintek-furnace.com.

15 Низкотемпературное искровое плазменное спекание чистого нанопорошка WC // University of Birmingham. – [Электронный ресурс]. – https://www.birmingham.ac.uk.

16 **Munir Z. A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.** The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41. – P. 763–777. – https://doi.org/10.1007/S10853-020-05040-4.

17 **Bonache V., Salvador M. D., Cambronero L. E. G., Sanchez C. J.** Comparison between conventional and spark plasma sintering of WC–Co cemented carbides // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2011. – Vol. 29. – № 2. – P. 202–208.

18 **Zhao J., Yuan C.** Spark plasma sintering of WC-Co hardmetals // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – Vol. 71. – P. 11–18.

19 **Guo Z., Xiong J., Yang M., Jiang C.** Microstructure and mechanical properties of ultrafine WC-Co cemented carbides sintered by spark plasma sintering // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 749. – P. 136–143.

REFERENCES

1 **Saito H., Iwabuchi A., Shimizu T.** Effects of Co content and WC grain size on wear of WC–Co cemented carbide // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 126–132. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.011.

2 **Yang Y., Li Y., Wang H.** Grain size effect on wear resistance of WC–Co cemented carbides under different tribological conditions // Journal of Materials Science & Technology. – 2020. – Vol. 39. – P. 1–9. – https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.016.

3 **Gee M. G., Gee J., Almond D. B.** Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals // Wear. – 2007. – Vol. 263. – P. 137–148.

4 Problemy i vozmozhnosti iskrovogo plazmennogo spekaniya: klyuchevaya tekhnologiya dlya novogo pokoleniya materialov [Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials] // IntechOpen. – [Electronic resource]. – https://www.intechopen.com.

5 Tekhnologiya iskrovogo plazmennogo spekaniya [Spark Plasma Sintering Technology] // GeniCore. – [Electronic resource]. – https://genicore.eu.

6 **Hegeman J. B. J., De Hosson J. Th. M., De With G.** Grinding of WC–Co hardmetals: wear mechanisms and microstructural effects // Wear. – 2001. – Vol. 248. – P. 187–196.

7 **Kim H. C., Oh S. T., Shon I. J.** Microstructural evolution and mechanical properties of spark plasma sintered WC–Co cemented carbides for machine parts and engineering tools // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2006. – Vol. 24. – P. 427–433.

8 Vliyanie temperatury spekaniya na fazovyy sostav i mikrotverdost tsementirovannogo karbida WC-8 mas.% Co [Effect of sintering temperature on the phase composition and microhardness of WC-8 wt % Co cemented carbide] // ResearchGate. – [Electronic resource]. – https://www.researchgate.net.

9 **M. Woydt1 and H. Mohrbacher.** The tribological property profile of hard metals and metal matrix composites based on niobium carbideAM Federal Institute for Materials Research and Testing, DE-12200 Berlin, Germany, NiobelCon bvba, BE-2970 Schilde, Belgium.

10 Iskrovoe plazmennoe spekanie melkozernistykh kompozitov WC-Co [Spark Plasma Sintering of Fine-Grained WC-Co Composites] // MDPI. – [Electronic resource]. – https://www.mdpi.com.

11 Iskrovoe plazmennoe spekanie melkozernistykh kompozitov WC-Co [Spark Plasma Sintering of Fine-Grained WC-Co Composites] // ResearchGate. – https://www.researchgate.net.

12 **Myo Hla Myinta, J. Y. H. Fuh a, Y. S. Wong a, L. Lu, Z. D. Chen, C. M.** Choy Evaluation of wear mechanisms of Y-TZP and tungsten carbide punches, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore.

13 Izgotovlenie tverdosplavnogo splava WC-8Ni-8Fe metodom IPS na osnove mekhanokhimicheski sintezirovannogo poroshka karbida volframa [SPS hard metal alloy WC-8Ni-8Fe fabrication based on mechanochemical synthetic tungsten carbide powder] // ResearchGate. – [Electronic resource]. – https://www.researchgate.net.

14 Какие преимущества предлагает система искрового плазменного спекания (SPS) по сравнению с традиционным горячим прессованием? [What Advantages Does A Spark Plasma Sintering (Sps) System Offer Over Traditional Hot Pressing? Boost Snse Efficiency] // Kintek Furnace. – [Electronic resource]. https://kintek-furnace.com.

15 Низкотемпературное искровое плазменное спекание чистого нанопорошка WC [Low-Temperature Spark Plasma Sintering of Pure Nano WC Powder] // University of Birmingham. URL: https://www.birmingham.ac.uk.

16 **Munir Z. A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.** The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41. – P. 763–777. – https://doi.org/10.1007/S10853-020-05040-4.

17 **Bonache V., Salvador M. D., Cambronero L. E. G., Sanchez C. J.** Comparison between conventional and spark plasma sintering of WC–Co cemented carbides // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2011. – Vol. 29. – № 2. – P. 202–208.

18 **Zhao J., Yuan C.** Spark plasma sintering of WC-Co hardmetals // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – Vol. 71. – P. 11–18.

19 **Guo Z., Xiong J., Yang M., Jiang C.** Microstructure and mechanical properties of ultrafine WC-Co cemented carbides sintered by spark plasma sintering // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 749. – P. 136–143.

Поступило в редакцию 23.05.26.
Поступило с исправлениями 29.06.26.
Принято в печать 19.08.26.

Е. С. Жәнібеков[1], С. А. Абдулина[2]
[1,2]Инженерия жоғары мектебі, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
23.05.26 ж. баспаға түсті.
29.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
19.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЯДРОЛЫҚ ОТЫН ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН ПРЕСС-ҚАЛЫПТАР ҮШІН ҚАТТЫ ҚОРЫТПАНЫ БІРІКТІРІП ПІСІРУ ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада уран диоксиді (UO_2) ұнтағынан отын таблеткаларын жасауға арналған атом өнеркәсібінде қолданылатын пресс-құралдың пайдалану төзімділігін арттыру мәселесіне арналған жан-жақты зерттеу ұсынылған. Негізгі назар ВК8 маркалы вольфрам-кобальт қатты қорытпасынан жасалған төлкелермен жабдықталған болат матрицалардың және тозуға төзімді Хтв9 хром жабыны бар болат пуансондардың технологиялық аспектілері мен түйіспелі әрекеттесу процестеріне аударылған. Отын таблеткаларын өндіру процестеріне жүргізілген өндірістік мониторинг матрицалардың нақты жұмыс ресурсы 500-ден 1200 жұмыс циклiне дейін екенін көрсетті, бұл 2500 циклдік жобалық нормативтік мәндерден айтарлықтай төмен. Матрицалардың тозуы престелген өнімдерді итеріп шығару кезіндегі үйкеліс күштерінің бақылаусыз өсуіне әкеледі, бұл таблеткалардағы шеткі жарықшақтардың пайда болуына және пуансон жабындарының сынуына себеп болады. Иілгіш қоспаларды қолдану арқылы екі сатылы ыстықтай престеу әдісімен қатты қорытпалы төлкелерді өндірудің дәстүрлі технологиясына сыни талдау жасалды. Тәжірибелік мәліметтер негізінде құралдың қасиеттерінің тұрақсыздығының себебі жарамдылық мерзімі өткен шикізатты пайдалану екені дәлелденді. Перспективалы технологиялық шешім ретінде ұшқынды плазмалық біріктіріп пісіру (Spark Plasma Sintering, SPS) әдісін қолдану теориялық және технологиялық тұрғыдан негізделген. Бұл әдіс органикалық пластификаторларды технологиялық циклден алып тастауға, қыздыру уақытын қысқартуға және WC–Co қатты қорытпасының құрылымдық біртектілігін арттыруға мүмкіндік беруі мүмкін. SPS арқылы алынған материалдың фазалық құрамы, микроқұрылымы, механикалық қасиеттері және пресс-құралдың пайдалану ресурсы қосымша тәжірибелік зерттеулерді қажет етеді.

Кілтті сөздер: ұнтақты металлургия, ВК8 қатты қорытпасы, вольфрам карбиді, WC–Co жүйесі, ыстықтай престеу, ұшқынды плазмалық біріктіріп пісіру, уран диоксиді, отын таблеткалары, үйкеліс және тозу.

Ye. S. Zhanibekov[1], S. A. Abdulina[2]
[1,2]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 23.05.26.
Received in revised form 29.06.26.
Accepted for publication 19.08.26.

DEVELOPMENT OF A HARD ALLOY SINTERING METHOD FOR NUCLEAR FUEL PRODUCTION PRESS MOLDS

This article presents a comprehensive study focused on the problem of increasing the operational durability of press tools used in the nuclear industry for molding fuel pellets from uranium dioxide (UO_2) powder. The main attention is paid to the technological aspects and contact interaction processes of steel dies equipped with hard-alloy bushings made of VK8 tungsten-cobalt alloy, as well as steel punches with wear-resistant hard chromium plating. Production monitoring of modern fuel pellet manufacturing processes revealed that the actual tool life of the dies ranges from 500 to 1200 working cycles, which is significantly lower than the design standard values of 2500 cycles. The degradation of the dies initiates an uncontrolled increase in friction forces during the ejection of compacts, leading to the formation of end cracks on the pellets and subsequent chipping of the punch coatings. A critical analysis of the traditional technology for manufacturing hard-alloy bushings by two-stage hot pressing was performed. As a promising technological approach, the use of the Spark Plasma Sintering (SPS) method is theoretically and technologically substantiated. The potential advantages of SPS are associated with the elimination of organic plasticizers, a reduction in the duration of high-temperature exposure, and the possibility of limiting WC grain growth. The phase composition, microstructure, mechanical properties, and service life of SPS-manufactured press tools require further experimental verification.

Keywords: powder metallurgy, VK8 hard alloy, tungsten carbide, WC–Co system, hot pressing, spark plasma sintering, uranium dioxide, fuel pellets, friction and wear.

SRSTI 53.31.00
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/371-379

A. Z. Issagulov[1], T. V. Kovalyova[2], S. Sh. Kazhikenova[3], S. N. Shaltakov[4], *A. Zh.Serzhan[5]
[1,2,3,4,5]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2174-9072
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1186-1805
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6937-1577
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1186-1178
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6771-5759
*e-mail: ainura.kuttymuratova@mail.ru

EFFECT OF CRYSTALLIZATION CONDITIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CAST 40KHN3MF STEEL

The study aims to evaluate the effect of external and internal treatments on the crystallization of complex-alloyed steel and the resulting casting properties. Experiments were performed using 40KhN3MF steel subjected to magnetic-field treatment, mechanical vibration, and melt modification. The results demonstrated that electromagnetic treatment primarily affected the hardness of the cast material, whereas mechanical vibration contributed to changes in strength and structural refinement. A full factorial experimental design was used to establish quantitative relationships between the investigated processing factors and the resulting response. The reproducibility of the experimental data was verified using Cochran's criterion, while the statistical significance of the regression coefficients was assessed using Student's t-test. The adequacy of the obtained regression model was evaluated using Fisher's criterion. Comparison of calculated and experimental values demonstrated satisfactory agreement within the investigated range of processing conditions. The results indicate that controlled external treatment during solidification can be used to modify the structural and mechanical characteristics of complex-alloyed steel castings and provide a basis for further optimization of casting conditions [8].

Crystallization, complex-alloyed steel, mechanical properties, magnetic treatment, mechanical vibration, melt modification, factorial experiment, regression analysis.

Introduction

The solidification of complex-alloyed steels is governed by a combination of thermal, hydrodynamic and physicochemical phenomena that determine the final structure and service properties of a casting. The presence of several alloying elements and structural constituents makes the solidification process particularly sensitive to local temperature gradients, melt convection and the conditions prevailing at the solid–liquid interface. As a result, variations in crystallization conditions may lead to changes in

grain morphology, chemical segregation and the mechanical characteristics of the resulting casting [1].

In industrial practice, the control of these phenomena is especially important for cast components operating under significant mechanical and thermal loads. Conventional control of chemical composition alone does not always provide sufficient control over the structure formed during solidification. Therefore, increasing attention is being paid to processing methods capable of influencing the melt during the transition from the liquid to the solid state [2].

Among such approaches, electromagnetic and mechanical treatments are of particular interest [9]. A magnetic field can modify melt motion and mass transfer during crystallization, whereas mechanical vibration introduces an additional source of forced melt movement. The simultaneous application of different external effects may therefore provide a means of influencing both the nucleation conditions and the redistribution of alloying elements within the solidifying volume [10].

The present study considers the effect of controlled external actions on the crystallization of 40KhN3MF steel. Particular attention is given to the individual and combined influence of a magnetic field and mechanical vibration on the mechanical characteristics of the cast material. In addition, a factorial experimental approach is used to establish quantitative relationships between the processing factors and the resulting properties [1; 3; 4].

The objective of this study was to quantify the effects of magnetic treatment, mechanical vibration, and melt modification on the properties of 40KhN3MF cast steel and to develop a statistically validated regression relationship for the investigated processing conditions.

Materials and methods

The experimental study was performed using 40KhN3MF steel melted in a graphite crucible in an OYP-0.5 induction furnace. Cylindrical specimens with a diameter of 30 mm and a height of 50 mm were produced for subsequent mechanical characterization [4].

Prior to casting, the melt was treated with a modifier introduced in the form of an aluminium-based briquette containing molybdenum, iron powder and nickel. The modifier particles had a size of 0.05–0.10 mm. The Mo/Al and ferronickel/Al mass ratios were 0.5:1 and 0.8:1, respectively. The melt temperature was maintained at 1520 °C, after which the modified composition was held for 3 min to promote dissolution and distribution of the introduced components.

During transfer of the melt into the mould, electromagnetic treatment was applied within a magnetic-field intensity range of 60–90 A/cm². Mechanical vibration was applied to the sand–clay mould at frequencies between 10 and 50 Hz. Thus, the experimental procedure enabled comparison of castings obtained under different combinations of external treatment conditions [3; 4].

The mechanical response of the resulting material was evaluated at the Center of Materials Science of Abylkas Saginov Karaganda Technical University. Compressive strength (σc) was determined using an Instron-100 testing system, while the chemical

composition was measured with an Olympus Vanta Metal Element Analyzer. The ultimate tensile strength (σUTS) listed in Table 1 is the specified reference value for 40KhN3MF steel according to GOST 4543-2016 and was not measured in the present experimental program.

Four experimental conditions were considered: untreated material, magnetic treatment only, mechanical vibration only, and combined magnetic and vibrational treatment. This design allowed the individual effects of the two external treatments and their combined influence on the casting properties to be compared.

Table 1 – Chemical composition and specified mechanical properties of 40KhN3MF steel according to GOST 4543-2016

The content o `the main elements, %						Ultimate tensile strength, σUTS (MPa)		
C	Mn	Cr	Ni	V	Other Elements	Ultimate Tensile Strength (MPa)	δ,%	HB, MPa
0,33-0,40	0,3-0,8	1,2-1,5	3,0-3,5	0,1-0,2	0,35-0,45Mo 0,1-0,18	880	≥10	≥209



Figure 1 – samples

The experimental results indicate that the two types of external treatment affect the mechanical response of the cast material in different ways. The magnetic treatment is associated primarily with an increase in hardness, whereas mechanical vibration produces a more pronounced contribution to the strength characteristics. This distinction can be related to the different mechanisms by which the two treatments modify the solidification process.

Mechanical vibration promotes forced melt movement throughout the casting volume and can increase the number of effective crystallization sites, thereby favouring grain refinement. Electromagnetic treatment, in contrast, alters the melt flow and conditions at the advancing solid–liquid interface. The combined action of these effects may consequently provide a more uniform structure than either treatment applied independently [7].

Results and discussion

To quantify the relationship between the investigated processing conditions and the measured response, the experimental results were analyzed using a full factorial design.

Eight experimental conditions were considered, with three repeated measurements performed for each condition. The regression analysis was used to identify the statistically significant effects of the investigated factors and to evaluate the predictive capability of the resulting mathematical model (1) [8]:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \cdots + b_nX_n \quad (1)$$

Here, Y denotes the response variable, I represents the coded experimental factors, and bi are the corresponding regression coefficients. The coefficients were determined from the experimental matrix and subsequently tested for statistical significance.

Eight experimental conditions were considered, with three repeated measurements performed for each condition. The regression analysis was used to identify the effects of the investigated factors and to evaluate the predictive capability of the mathematical model.

The statistical significance of the regression coefficients was evaluated using Student's t-test. The variance of the coefficient estimates was S^2a_i=29,81, corresponding to a standard error of S_{ai}=5,46. For the adopted experimental conditions, the Student's coefficient was t_2=1,746, and the corresponding confidence interval was Δa_i=9,533. Interaction terms that did not make a measurable contribution to the response were excluded from the final predictive equation.

For the coded experimental factors, the resulting first-order regression equation was:

$$Y = 964{,}04 - 6{,}36I_1 - 8{,}06I_2 - 8{,}79I_3 \quad (2)$$

where Y is the predicted response, I_1, I_2 and I_3 represent the coded magnetic-treatment, mechanical-vibration, and melt-modification factors, respectively. The factor levels were coded as −1 and +1 for the lower and upper experimental conditions, respectively. Substitution of the coded factor levels into Equation (2) yields the calculated response values presented in Table 2.

Substitution of the corresponding coded factor levels into Equation (2) gives the calculated response values presented in Table 2. The predicted values are 987.25, 974.53, 971.13, 958.41, 969.67, 956.95, 953.55, and 940.83 for experimental conditions 1–8, respectively.

The reproducibility of the experimental data was assessed using Cochran's criterion. Three repetitions were performed for each experimental condition, allowing the within-condition variance to be estimated for all eight experiments. The calculated value of the Cochran criterion was G_{calc} = 0,24 whereas the tabulated value at a significance level of 0,05 was G_{tab}= 0,5157. Since:

$$G_{calc} < G_{tab}$$

The variances can be considered homogeneous. Thus, no statistically significant difference in experimental dispersion was detected between the investigated conditions, and the experimental dataset was considered suitable for subsequent regression analysis.

The relative experimental error was additionally evaluated to characterize the reproducibility of the measurements. The calculated variation remained below the adopted 5 % threshold, indicating an acceptable level of experimental uncertainty for the investigated conditions.

The statistical significance of the regression coefficients was evaluated using Student's t-test. The variance of the coefficient estimates was determined as S^2a_i=29,81, corresponding to a standard error of S_{ai}=5,46. For the adopted experimental conditions, the Student's coefficient was t_2=1,746. Based on these parameters, the confidence interval for the regression coefficients was calculated as Δ_{ai}=9,533. A coefficient was considered statistically significant when its absolute value exceeded the calculated confidence interval. Consequently, only statistically meaningful terms were retained for interpretation of the relationship between the investigated factors and the response variable. This procedure allowed the regression model to be reduced to the terms that made a measurable contribution to the experimental response.

Following the statistical assessment of the regression coefficients, the regression relationship was established using the significant terms of the factorial model. The resulting equation describes the response as a function of the investigated processing factors within the experimental range. In the coded-factor representation, the regression coefficients characterize both the direction and relative magnitude of the factor effects: a positive coefficient corresponds to an increase in the response with increasing factor level, whereas a negative coefficient indicates an opposite tendency. Terms that did not satisfy the statistical significance criterion were excluded from the final model. The resulting regression equation was subsequently used to calculate the predicted response values for all experimental conditions and to assess the agreement between the mathematical model and the experimental data.

The obtained regression model provides a quantitative basis for comparing the influence of the investigated factors on the response. The absolute magnitude of a statistically significant coefficient can be used to compare the relative contribution of the corresponding factor, while its sign indicates the direction of the observed effect. The presence of statistically significant interaction terms, if retained in the final equation, indicates that the effect of one processing factor depends on the level of another factor. Therefore, the regression analysis makes it possible to distinguish the individual contribution of the investigated treatment parameters from their combined effect and to identify the conditions associated with an increase or decrease in the measured response.

The adequacy of the obtained regression model was evaluated using Fisher's criterion. The calculated Fisher statistic was compared with the corresponding tabulated value at a significance level of 0,05. The tabulated value for the adopted conditions was F_{tabl}=5,786. The model was considered adequate when the calculated Fisher statistic did not exceed the tabulated value. The adequacy test demonstrated that the regression relationship provides a satisfactory representation of the experimental response within the investigated range of processing conditions. Thus, the obtained model can be used for comparative analysis of the experimental conditions and for estimation of the response at the factor combinations included in the investigated design.

Table 2 – Experimental and calculated response values obtained from the regression model

Experience number u	$\bar{y}_u$	y'_u	$\lvert\Delta y = \lvert y' - \bar{y}_u \rvert$
1	980,3	987,25	6,95
2	975,7	974,53	1,17
3	971,3	971,13	0,17
4	964,0	958,41	5,59
5	972,7	969,67	3,03
6	959,7	956,95	2,75
7	957,3	953,55	3,75
8	931,3	940,83	9,53

The predictive performance of the regression model was assessed by comparing the calculated response values with the corresponding experimental results obtained for the eight investigated conditions. The calculated values generally followed the experimental trend, indicating that the model adequately reproduced the variation of the response over the investigated factor space. The absolute deviation between the experimental and calculated values ranged from 0,17 to 9,53 units. The smallest deviation was observed for experiment 3, for which the experimental value was 971,30 and the calculated value was 971,13. The largest deviation was obtained for experiment 8, with experimental and calculated values of 931,30 and 940,83, respectively. The comparison demonstrates that the regression model provides a reasonably close approximation of the experimental data, although the magnitude of the deviation varies between individual experimental conditions.

Table 3 – Comparison of experimental and calculated compressive strength and Brinell hardness

№	Compressive strength, discrepancy (%)			Brinell hardness, discrepancy (%)		
	Experiment	Calculation	Discrepancy, %	Experiment	Calculation	Discrepancy, %
1	886	894	0,9	274	287	4,5
2	907	916	1,0	269	281	4,3
3	912	922	1,1	298	306	2,6
4	934	946	1,3	302	311	2,9

Additional validation of the regression approach was performed by comparing the calculated and experimentally determined mechanical characteristics of the cast material. The comparison included compressive strength and Brinell hardness for the investigated samples. The difference between the calculated and experimental values of compressive strength was within 0.9–1.3 %, whereas the corresponding deviation for Brinell hardness ranged from 2.6 to 4.5 %. The relatively small differences between the predicted and measured characteristics indicate that the obtained relationships reproduce the experimentally observed mechanical response with acceptable accuracy.

Conclusion

The experimental study demonstrated that controlled external treatment during solidification can be used to modify the mechanical response of 40KhN3MF cast steel.

Within the investigated processing range, magnetic treatment had the strongest effect on hardness, whereas mechanical vibration produced a more pronounced improvement in compressive strength.

The comparison of experimental and calculated values confirmed the predictive capability of the obtained regression relationships. The discrepancy between experimental and calculated strength values ranged from 0,9 to 1,3 %, while the corresponding difference in Brinell hardness was 2,6–4,5 %. These results indicate satisfactory agreement between the model predictions and the experimental data within the investigated range of processing conditions.

Mechanical vibration was associated with refinement and improved structural uniformity throughout the casting volume, while electromagnetic treatment influenced the conditions of crystallization and redistribution of the alloying components. The combined consideration of these effects provides a basis for selecting processing parameters according to the required mechanical characteristics of the casting.

The obtained regression relationships can be used as a basis for further optimization of casting conditions for complex-alloyed steels, particularly for improving the reproducibility of mechanical properties and controlling the effects of external treatment during solidification.

REFERENCES

1 **Stefanescu, D. M.** Science and Engineering of Casting Solidification. 2nd ed. New York : Springer; 2009. – 380 p. – https://doi.org/10.1007/b135947.

2 **Zhang, L., Thomas, B. G.** State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International. – 2003. – Vol. 43. – № 3. – P. 271–291. – https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.271.

3 **Issagulov, A. Z., Kim, V. A., Kvon, S. S., Kulikov, V. Yu., Tussupova, A. U.** Production of Technical Silicon and Silicon Carbide from Rice-Husk // Metalurgija. – 2014. – Vol. 53. – № 4. – P. 685–688.

4 **Kovalev, P. V., Popova, S. D., Issagulov, A. Z., Kulikov, V. Yu., Kvon, Sv. S.** Investigation of the Effect of High Strength Strips Steel Modification with Rare-Earth Metal (REM). // Metalurgija. – 2017. – Vol. 56. – № 3–4. – P. 393–395.

5 **Campbell, J.** Castings: The New Metallurgy of Cast Metals, Castings and Design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. – 352 p.

6 **Wang, Y. Q., Gorley, M., Kabra, S., Surrey, E.** Influence of a 1.5 T Magnetic Field on the Tensile Properties of Eurofer-97 Steel. Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 141. – P. 68–72. – https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.081.

7 **Kvon, S., Skvortsov, Y., Issagulov, A., Kulikov, V.** Enhancement of Carbon Alloy Steel Hardness and Wear Resistance by Vibration and Modification // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2025. – Vol. 14. – P. 1243–1260. – https://doi.org/10.1007/s13632-025-01258-3.

8 **Rebrova, I. A.** Designing an Experiment: Tutorial. Omsk: SibADI; 2010. – 107 p.

9 **Li, G., Guan, F., Jiang, W., Xu, Y., Zhang, Z., Fan, Z.** Effects of mechanical vibration on filling and solidification behavior, microstructure and performance of Al/Mg bimetal by lost foam compound casting // China Foundry. – 2023. – Vol. 20. – P. 469–479. – https://doi.org/10.1007/s41230-023-2168-5

10 **Zhao, Y. G., Liang, Y. H., Qin, Q. D., Zhou, W., Jiang, Q. C.** Effect of Mechanical Vibration on the Microstructure, Impact Toughness and Thermal Fatigue Behavior of Cast Hot Working Die Steel Text] // ISIJ International. – 2004. – Vol. 44, № 7. – P. 1167–1172. – https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1167

Received 23.01.26.
Received in revised form 20.04.26.
Accepted for publication 08.09.26.

З. Исагүлов[1], Т. Ковалёва[2], Ш. Қажыкенова[3], Н. Шалтақов[4], *А. Сержан[5]
[1,2,3,4,5]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
23.01.26 ж. баспаға түсті.
20.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
08.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

40ХН3МФ ҚҰЙЫЛҒАН БОЛАТТЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ КРИСТАЛДАНУ ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ ӘСЕРІ

Зерттеу сыртқы және ішкі өңдеулердің күрделі легирленген болаттың кристалдануына әсерін және нәтижесінде пайда болатын құю қасиеттерін бағалауға бағытталған. Тәжірибелер магнит өрісін өңдеуге, механикалық дірілге және балқыманың модификациясына ұшыраған 40кн3мф болатты қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелер электромагниттік өңдеудің ең алдымен құйма материалдың қаттылығына әсер ететінін көрсетті, ал механикалық діріл беріктік пен құрылымдық нақтылаудың өзгеруіне ықпал етті. Зерттелетін өңдеу факторлары мен алынған реакция арасындағы сандық қатынастарды орнату үшін толық факторлық эксперименттік дизайн қолданылды. Эксперименттік деректердің репродуктивтілігі Кохран критерийі бойынша тексерілді, ал регрессия коэффициенттерінің статистикалық маңыздылығы Оқушының t-тесті арқылы бағаланды. Алынған регрессия моделінің жеткіліктілігі Фишер критерийі бойынша бағаланды. Есептелген және эксперименттік мәндерді салыстыру зерттелген өңдеу шарттарының ауқымында қанағаттанарлық келісімді көрсетті. Нәтижелер қатайту кезінде бақыланатын сыртқы өңдеуді күрделі легирленген болат құймаларының құрылымдық және механикалық сипаттамаларын өзгерту және құю шарттарын одан әрі оңтайландыру үшін негіз беру үшін пайдалануға болатынын көрсетеді.

Кілтті сөздер: Кристалдану, күрделі легирленген болат, механикалық қасиеттері, магниттік өңдеу, механикалық діріл, балқыманың модификациясы, факторлық эксперимент, регрессиялық талдау.

З. Исагулов[1], Т. Ковалёва[2], Ш. Кажыкенова[3], Н. Шалтаков[4], *А. Сержан[5]
[1,2,3,4,5]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 23.01.26.
Поступило с исправлениями 20.04.26.
Принято в печать 08.09.26.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОЙ СТАЛИ 40ХН3МФ

Цель исследования – оценить влияние внешней и внутренней обработок на кристаллизацию сложнолегированной стали и получаемые в результате литейные свойства. Эксперименты проводились с использованием стали 40ХН3МФ, подвергнутой обработке магнитным полем, механической вибрации и модификации расплава. Результаты показали, что электромагнитная обработка в первую очередь влияет на твердость литого материала, в то время как механическая вибрация способствует изменению прочности и утончению конструкции. Для установления количественных взаимосвязей между исследованными факторами обработки и результирующим ответом был использован полный факторный экспериментальный план. Воспроизводимость экспериментальных данных была проверена с помощью критерия Кокрана, а статистическая значимость коэффициентов регрессии была оценена с помощью t-критерия Стьюдента. Адекватность полученной регрессионной модели оценивалась с использованием критерия Фишера. Сравнение расчетных и экспериментальных значений показало удовлетворительное соответствие в исследованном диапазоне условий обработки. Результаты показывают, что контролируемая внешняя обработка во время затвердевания может быть использована для изменения структурных и механических характеристик отливок из сложнолегированной стали и создания основы для дальнейшей оптимизации условий литья.

Ключевые слова: Кристаллизация, сложнолегированная сталь, механические свойства, магнитная обработка, механическая вибрация, модификация расплава, факторный эксперимент, регрессионный анализ.

SRSTI 53.31.21

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/380-391

S. Kabylkanov[1], Ye. Makhambetov[2], S. Abdulina[3],
Ye. Zhumagaliev[4], O. Yucel[5]
[1,2]Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[1,3]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[4]Zhubanov Aktobe Regional University, Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[5]Istanbul Technical University, Turkey, Istanbul.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1272-2065
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8613-9932
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6328-8652
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2227-0661
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3879-0410
*e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF CHROMIUM-MANGANESE LIGATURE PRODUCTION UNDER LARGE-SCALE LABORATORY SMELTING CONDITIONS

This study presents the development of a technology for producing chromium-manganese ligature under large-scale laboratory smelting conditions using a 100 kVA refining electric furnace. The charge materials included ferromanganese ore from the Kerege-Tas deposit and ferrosilicochrome (FeSiCr) dust generated during crushing. FeSiCr dust was used as a reducing agent due to its high silicon content. Seven smelting runs were carried out, resulting in the production of chromium-manganese ligature with the desired composition. The average chemical composition of the obtained alloy was: Fe – 35.63 %, Mn – 40.30 %, Cr – 20.94 %, Si – 4.54 %. The physico-chemical properties of the alloy were studied using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). XRD analysis revealed the presence of an α-solid solution (Fe, Cr, Mn), as well as silicide phases FeSi and Cr_5Si_3. SEM images showed pronounced microstructural heterogeneity, porosity, and contaminant inclusions, which are associated with the uneven distribution of major elements within the alloy volume. The results confirm the feasibility of efficiently producing chromium-manganese ligature using FeSiCr dust and low-grade manganese ore, which is relevant for resource-saving metallurgical technologies in the context of Kazakhstan.

Keywords: chromium-manganese ligature, reducing agent; iron-manganese ore, ferrosilicochromium dust, phase analysis, scanning electron microscopy, X-ray diffraction.

Introduction

In recent years, the global steel industry has demonstrated consistent growth, driven by the progress in key industrial sectors such as mechanical engineering, construction, and defense, along with broader technological advancements that continue to elevate the demand for high-performance metal products. This growing demand has intensified the need for various ferroalloys and alloying agents, which are essential in producing steels with enhanced mechanical and physical properties. Among these, chrome-manganese ligatures have gained significant prominence due to their positive impact on the strength, wear resistance, corrosion resistance, and thermal durability of steels [1, 2, 3].

Chromium- and manganese-based alloys are considered indispensable in modern ferrous metallurgy, serving as strategic alloying elements with extensive application across a wide spectrum of steel grades – from standard structural steels to highly alloyed tool steels, including stainless and heat-resistant variants. These ligatures are especially vital in manufacturing high-strength materials for industries such as heavy machinery, aerospace, transportation infrastructure, and power generation [4, 5, 6, 7].

For the Republic of Kazakhstan, which possesses vast but underexploited reserves of chromium and manganese ores, the development of advanced processing technologies and alloy production methods holds particular significance [8, 9]. In particular, the utilisation of low-grade local ores with elevated impurity levels can be realised through the implementation of innovative smelting techniques tailored to chrome-manganese ligature production [10, p. 24].

Previous studies [11] were aimed at developing an efficient technology for producing chromium-manganese ligature. The initial materials included iron-manganese ore from the Kerege-Tas deposit and FeSiCr dust, which was considered as a reducing agent. Based on the results of thermodynamic modeling, laboratory smelting was carried out in a Tamman furnace. The experiments confirmed the high reducing activity of FeSiCr dust, and the phase and chemical compositions of the obtained ligature were analyzed. A high recovery rate of the main elements was confirmed by both calculations and experimental results. These findings demonstrated the feasibility of further scaling up the process and using this reductant under higher thermal and energy conditions.

In the present article, building upon the previous results [11], large-scale laboratory smelting experiments were conducted. The main objective of the study is to comprehensively investigate the technological and physicochemical properties of the obtained chromium-manganese ligature using a refining furnace, as well as to assess the prospects for scaling up the process to an industrial level.

Materials and methods

As part of the large-scale laboratory smelting experiments, the initial materials used included iron-manganese ore from the Kerege-Tas deposit as the primary ore component, and FeSiCr dust as the reducing agent due to its high content of active silicon, which ensures the reduction of metal oxides in the charge. The FeSiCr dust used in this study is a fine-grained by-product formed during the crushing and processing of FeSiCr at the stage of its industrial production. To adjust the slag composition and reduce its viscosity,

lime was added to the charge as a fluxing material. The chemical compositions of the initial materials are presented in Table 1.

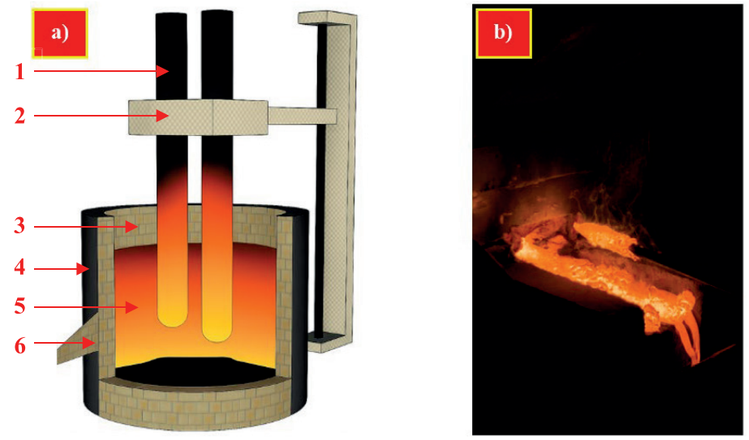
Table 1 – Chemical compositions of the initial materials, wt.%

Material	Content, %							
	Mn_{tot}	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	P_2O_5	S
Iron-manganese ore	26,62	21,78	16,74	2,57	0,15	2,34	0,43	0,17
Material	Content, %							
	Cr	Fe	Si	Al	C	S	P	
FeSiCr dust	24,10	14,18	32,22	1,51	2,48	0,049	0,018	

The iron-manganese ore from the Kerege-Tas deposit is characterized by a high content of manganese and iron, which makes it suitable as the main ore component for the production of chromium-manganese ligature. The ore also contains calcium, aluminum, and magnesium oxides in minor quantities, which may affect the thermochemical properties of the slag. The relatively low phosphorus (P) and sulfur (S) content has a positive impact on the quality of the final metal product by reducing the risk of forming harmful impurities.

FeSiCr dust was added to the ore component of the charge as a reducing agent. Its chemical composition plays a significant role during the smelting process. This material contains a considerable amount of active silicon, as well as chromium and iron, making it effective for reducing metal oxides. The levels of harmful impurities such as P and S in the dust are minimal, allowing its use as a reductant without the need for additional purification.

The large-scale laboratory smelting was carried out in a 100 kVA refining electric furnace (Figure 1a). The furnace is equipped with two self-baking electrodes that can be raised and lowered using electrode holders. The inner surface of the working zone is lined with heat-resistant magnesite-based refractory bricks, which provide thermal resistance during high-temperature smelting. The furnace is also equipped with a tapping hole for discharging the molten metal and slag phases.



1 – self-baking electrode; 2 – electrode holder;
3 – refractory lining; 4 – furnace shell;
5 – molten bath (metal and slag); 6 – tapping hole.
Figure 1 – Cross-sectional view of the refining furnace
(a) and tapping of molten bath (b)

The phase composition of the obtained chromium-manganese ligature was determined using XRD analysis with a DRON-2 diffractometer. The instrument is equipped with a copper anode (Cu Kα, λ = 1.5418 Å) and performs scanning over a 2θ angle range from 10° to 90°. The scanning step was 0.05°, which ensured sufficient accuracy for qualitative phase analysis.

To gain a more detailed understanding of the internal structure and elemental distribution within the alloy, microstructural and elemental characterization was carried out using a scanning electron microscope (SEM) «ZEPTOOLS – ZEM20» (China), equipped with an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system. This provided high-resolution imaging and significant magnification of the investigated area.

Results and discussion

The smelting of chromium-manganese ligature was carried out in a 100 kVA refining electric furnace. Prior to the process, the furnace was preheated for 5 hours. The preparation of the charge components included preliminary crushing and sieving according to the calculated ratio. After preheating, the charge materials were manually loaded into the working zone in layers, based on thermodynamic calculations of the component proportions.

The electric parameters of the process were maintained at a working current of 80–90 A, ensuring stable reduction reactions and uniform temperature distribution throughout the charge volume. The electrodes were deeply immersed into the reaction zone, and the melting zone was sustained by uniform heat transfer and a stable electric regime at a voltage of 18–24 V.

The smelting was carried out in a semi-continuous mode, with periodic tapping of molten metal and sampling every 1.5–2 hours. Samples of the alloy and slag were collected after each tap for chemical and phase analysis. The chemical composition of the metal and slag phases obtained from the experimental heats is presented in Table 2.

A total of seven heats were carried out during the large-scale smelting campaign, during which the metal and slag phases were separated and extracted from the furnace in each run. After cooling, the products were carefully weighed to determine the mass yield. Information on the mass of the charged raw materials, as well as the resulting metal and slag phases, is presented in Table 3.

Table 2 – Chemical composition of the products from experimental heats

№	Metal, %					
	Fe	Cr	Mn	Si	P	S
1	36,62	21,4	39.1	3.61	0.025	0.01
2	35,68	21,23	41.78	3.24	0.024	0.01
3	36,78	22,3	40.49	4.44	0.018	0.01
4	33,07	19,78	41.99	3.11	0.014	0.01
5	35,5	20,98	41.13	6.04	0.040	0.01
6	35,75	20,73	38.89	5.29	0.045	-
7	36,0	20,17	38.69	6.03	0.021	-

№	Slag, %							
	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	MnO	FeO	P
1	58.95	32.74	0.13	2.01	1.26	1.32	0.30	0.02
2	57.04	33.10	0.10	1.96	1.74	1.53	0.43	0.02
3	60.03	34.74	0.11	1.84	1.60	1.49	0.25	0.01
4	59.55	34.87	0.12	2.04	1.57	1.49	0.04	0.01
5	60.54	33.70	0.14	2.18	1.50	1.85	0.33	0.02
6	56.81	32.86	0.13	1.95	1.33	1.28	0.31	0.02
7	58.82	33.29	0.10	1.92	1.65	1.68	0.03	-

Based on the chemical compositions obtained from the seven experimental heats, the average chemical composition of the chromium-manganese ligature was determined as follows: 35.63 wt.% Fe, 40.30 wt.% Mn, 20.94 wt.% Cr, and 4.54 wt.% Si. The basicity of the slag, calculated using the formula $(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$, ranged from 1.6 to 1.8.

Table 3 – Mass of the charged materials and yield of smelting products

Materials	kg	Products	kg
Iron-manganese ore	84,0	Metal	65,35
FeSiCr dust	42,0	Slag	141,20
Lime	84,0	Garnissage	2,90
∑	210,0	∑	209,45

As shown in Table 3, the total mass of charge materials loaded into the furnace was 210.0 kg. As a result of the smelting process, 65.35 kg of metallic phase and 141.20 kg of slag were obtained. In addition, 2.90 kg of garnissage remained as deposits on the walls and bottom of the furnace. The total yield of products was 209.45 kg, indicating

minimal losses during smelting. The appearance of the obtained metal and slag phases is shown in Figure 2.

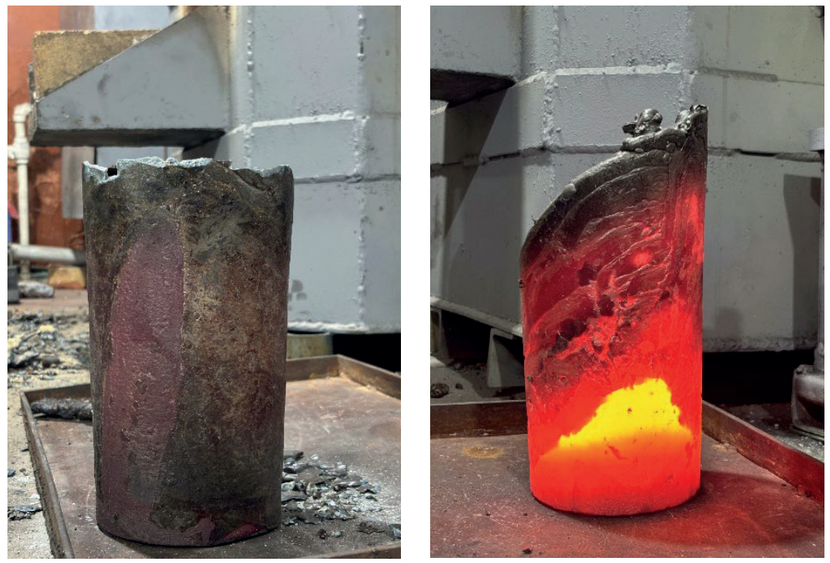


Figure 2 – External view of the metal and slag phases obtained after smelting

The obtained metal and slag phases were well separated from each other. The slag was detached compactly, did not crumble, and exhibited a dense, stone-like structure, indicating normal shrinkage and sufficient fluidity during the smelting process.

To further investigate the properties of the obtained chromium-manganese ligature, microstructural and phase identification of the samples was performed using appropriate analytical methods. Below is the XRD result (Figure 3) of the obtained chromium-manganese ligature, which enables the determination of its phase composition. For the analysis, the metal sample from the 4th heat was selected, as it exhibited a stable chemical composition close to the average values across all smelting runs.

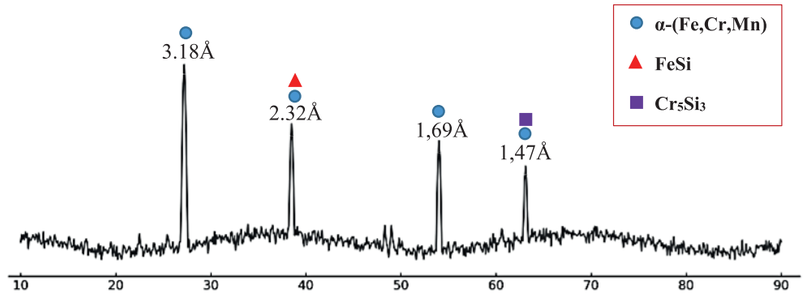


Figure 3 – X-ray diffraction pattern of the metal phase sample

The XRD pattern of the metal phase shows the main peaks at d-values of 3.18 Å, 2.32 Å, 1.69 Å, and 1.47 Å, which correspond to the α-(Fe,Cr,Mn) solid solution with a body-centered cubic (BCC) lattice. The detected phase is in good agreement with the chemical composition of the obtained ligature, confirming the formation of a single-phase metallic solid solution based on iron, chromium, and manganese.

Additionally, weak reflections of FeSi and Cr_5Si_3 phases were recorded, which are associated with the presence of silicon and chromium in the alloy composition. All phases are labeled on the graph: α-(Fe,Cr,Mn) – blue circles, FeSi – red triangles, Cr_5Si_3 – violet squares.

Subsequently, a microstructural characterization was performed on the metal alloy sample selected for XRD analysis. The SEM image and element distribution maps are shown in Figure 4.

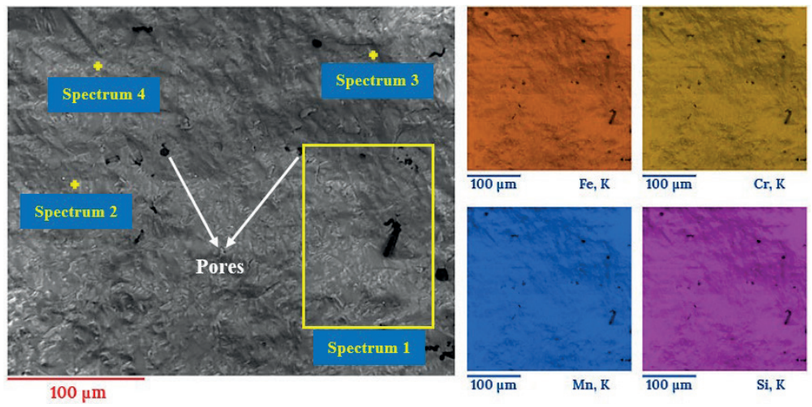


Figure 4 – SEM image of the metallic phase
and corresponding elemental distribution maps

Table 3 – Elemental composition results from EDS analysis

Spectrum, №	Content, wt.%				
	Fe	Cr	Mn	Si	Al
1	50.25	15.67	26.24	7.84	-
2	50.28	7.81	35.40	6.51	-
3	34.55	38.48	23.02	6,01	-
4	47.32	15.71	33.02	3.95	0,05

To study the microstructural features and the distribution of alloying elements in the obtained ligature, analysis was performed using scanning electron microscopy (SEM) with magnification up to 100 nanometers. The elemental composition of specific surface regions was determined by energy-dispersive EDS.

A total of four spectra were recorded (Table 3). The main elements present in all spectra are iron (Fe), manganese (Mn), chromium (Cr), and silicon (Si). The Fe content ranges from 34.55 to 50.28 wt.%, Mn from 23.02 to 35.40 wt.%, Cr from 7.81 to 38.48 wt.%, and Si from 3.95 to 7.84 wt.%. In one case, a minor aluminum content of 0.05 wt.% was detected.

Pores of various shapes and sizes were visually observed in certain areas of the microstructure, indicating the presence of residual porosity within the ligature structure.

Fluctuations in the concentrations of the main elements indicate microstructural heterogeneity and the presence of regions with varying degrees of alloying. The observed chromium- and manganese-enriched areas confirm the complex nature of phase distribution within the ligature structure. The presence of silicon and traces of aluminum may be attributed to the use of reducing additives during smelting.

Thus, based on the results of SEM analysis, it was established that the obtained chromium-manganese ligature possesses a multiphase structure with an uneven distribution of alloying elements, reflecting the characteristics of its formation under electrometallurgical processing conditions.

Information about financing

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Re-public of Kazakhstan (Grant № AP23488918)

Conclusions

As a result of experimental remelting conducted in a 100 kVA refining electric furnace, a chromium-manganese ligature with the desired chemical composition was obtained. The use of silicon-aluminum-based reductants ensured deep reduction of manganese and chromium from the ore charge. The resulting metal and slag phases were easily separated; the slag had a dense, stone-like structure. The experiments confirmed the feasibility of producing a refined ligature with a high content of alloying elements and minimal impurities (S, P) under optimized smelting conditions.

XRD analysis showed that the structure of the metallic phase consisted of an α-solid solution based on (Fe,Cr,Mn), as well as intermetallic compounds FeSi and Cr5Si3. The presence of silicide phases indicates the active role of silicon in the structure formation of the alloy.

SEM analysis provided a detailed view of the microstructure of the studied alloy. The images obtained at magnifications up to 100 nm revealed signs of phase heterogeneity, interphase boundaries, and variations in chemical composition. Spectral analysis showed fluctuations in the concentrations of alloying elements (Fe, Cr, Mn, Si), confirming the complex multiphase nature of the ligature. Additionally, pores of various shapes and sizes were identified, along with contaminant inclusions in certain areas, indicating the presence of defects formed during sample preparation.

Overall, based on the results of the present work, a chromium-manganese ligature was obtained with an average chemical composition of: Fe – 35.63 %, Mn – 40.30 %, Cr – 20.94 %, Si – 4.54 %. Further work is planned to include a series of smelting trials with an increased number of heats, as well as a transition to a furnace with higher power and volume to improve production efficiency and expand the scope of research.

REFERENCES

1 **Koval, Yu. M., Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A.** Regularities of Formation of Structure, Phase Composition and Properties of Chromium–Manganese Alloys in the Initial Cast State during the Process of Friction Wear // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2021. – Vol. 43. – № 3. – P. 407–423. – https://doi.org/10.15407/mfint.43.03.0407.

2 **Hu, W. J., Zhou, M. F., Yudovskaya, M. A., Vikentyev, I. V., Malpas, J., Zhang, P. F.** Trace Elements in Chromite as Indicators of the Origin of the Giant Podiform Chromite Deposit at Kempirsai, Kazakhstan // Economic Geology. – 2022. – Vol. 117. – № 7. – P. 1629–1655. – https://doi.org/10.5382/econgeo.4955.

3 **Sariyev, O., Tolymbekova, L., Dossekenov, M., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Davletova, A., Abdirashit, A.** Analysis and Chromium Recovery from Ferrochrome Waste (Stockpiled Refined Ferrochrome Slags) // Metals. – 2025. – Vol. 15. – № 7. – P. 740. – https://doi.org/10.3390/met15070740.

4 **Wang, Y., Karasev, A., Park, J. H., Jonsson, P. G.** Non-metallic inclusions in different ferroalloys and their effect on the steel quality: A review // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Vol. 52. – № 6. – P. 2892–2925. – https://doi.org/10.1007/s11663-021-02259-7

5 **Kabylkanov, S. K., Abdullina, S. A., Makhambetov, Ye. N., Gorban, E. E., Burumbayev A. G.** Research of obtaining a chromo-manganese ligature using a complex silicon-aluminum reducing agent // Innovations and complex processing of mineral raw materials are relevant components of economic diversification. – Almaty : RSE «NC CPMRM RK», 2024. – P. 92–94.

6 **Makhambetov, Y., Zhakan, A., Gabdullin, S., Akhmetov, A., Burumbayev A., Zhunusov, A.** Study on the synthesis of FeCrMnSi ferroalloy using technogenic raw materials // Acta Metallurgica Slovaca. – 2025. – Vol. 31. – № 2. – P. 113–118. – https://doi.org/10.36547/ams.31.2.2137.

7 **Zhang, J., Zhang, Y., Long, Y., Tian, C., Du, P., Ren, Q.** Characterization of physical and chemical properties of multi-source metallurgical dust and analysis of resource utilization pathways // Metals. – 2024. – Vol. 14. – № 12. – Article № 1378. – https://doi.org/10.3390/met14121378.

8 **Nath, S. K.** Geopolymerization behavior of ferrochrome slag and fly ash blends // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 181. – P. 487–494. – https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.070.

9 **Yu, Y., Li, B., Liu, Z., Qi, F., Liu, C., Rong, W., Kuang, S.** Analysis of electrical energy consumption in a novel direct current submerged arc furnace for ferrochrome production // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. – 2023. – Vol. 54. – P. 2370–2382. – https://doi.org/10.1007/s11663-023-02838-w.

10 Chrome ore of Kazakhstan // Kazchrome. [Electronic resource]. – https://www.kazchrome.com/ru/business-overview (accessed: 25.10.2024).

11 **Kabylkanov, S., Makhambetov, Y., Abdulina, S., Burumbayev, A., Zhakan, A., Omuralp, Y.** Production of chrome–manganese ligature using ferrosilicochrome dust as a reducing agent // Acta Metallurgica Slovaca. – 2025. – Vol. 31. – № 3. – P. 141–148. – https://doi.org/10.36547/ams.31.3.2221.

Received 02.08.25.
Received in revised form 06.08.25.
Accepted for publication 31.03.26.

С. К. Кабылканов[1], Е. Н. Махамбетов[2], С. А. Абдулина[3],
Е. У. Жумагалиев[4], O. Yucel[5]
[1,3]Д. Серікбаева атындағы Шығыс-Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[1,2]Ж. Әбішев атындағы Химия-Металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[4]Ыстамбұл техникалық университеті, Турция, Ыстамбұл қ.
02.08.25 ж. баспаға түсті.
06.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
31.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ІРІ ЗЕРТХАНАЛЫҚ БАЛҚЫТУ ЖАҒДАЙЫНДА ХРОМ-МАРГАНЕЦТІ ЛИГАТУРА АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеуде қуаттылығы 100 кВА рафинирлік электр пешінде ірі-зертханалық жағдайларда хром-марганецті лигатура алу технологиясын әзірлеу қарастырылған. Шикіқұрам материалдары ретінде Кереге-Тас кен орнынан алынған темірлі-марганец кені және ұнтақтау процесінде түзілетін ферросиликохром (ФСХ) шаңы пайдаланылды. ФСХ шаңы құрамындағы белсенді

кремний мөлшерінің жоғары болуына байланысты тотықсыздандырғыш ретінде қолданылды. Балқыту нәтижесінде жеті шығарылым жүргізіліп, қажетті құрамдағы хром-марганецті лигатура алынды. Алынған қорытпаның орташа химиялық құрамы келесідей: Fe – 35,63 %, Mn – 40,30 %, Cr – 20,94 %, Si – 4,54 %.

Қорытпаның физика-химиялық қасиеттері рентгенфазалық талдау (РФА) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдістері арқылы зерттелді. РФА нәтижелері бойынша қорытпа құрамында α-қатты ерітіндісі (Fe, Cr, Mn) және FeSi мен Cr_5Si_3 силицидті фазалары бар екені анықталды. СЭМ кескіндерінде микроструктуралық біркелкісіздік, кеуектілік және бөгде қоспалардың болуы байқалды, бұл элементтердің көлем бойынша біркелкі таралмауымен байланысты. Алынған нәтижелер ФСХ шаңы мен кедей марганец кенін пайдалану арқылы хром-марганецті лигатураны тиімді алуға болатынын растайды. Бұл отандық жағдайда ресурсты үнемдеуші металлургиялық технологиялар үшін өзекті болып табылады.

Кілтті сөздер: хром-марганецті лигатура, тотықсыздандырғыш, темірлі-марганец кені, ферросиликохром шаңы, фазалық талдау, сканерлеуші электрондық микроскопия, рентгенфазалық талдау.

С. К. Кабылканов[1], Е. Н. Махамбетов[2], С. А. Абдулина[3], Е. У. Жумагалиев[4], О. Yucel[5]

[1,3]Вочточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

[1,2]Химико-Металлургический институт имени Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;

[4]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе;

[4]Стамбульский технический университет, Турция, г. Стамбул.

Поступило в редакцию 02.08.25.
Поступило с исправлениями 06.08.25.
Принято в печать 31.03.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ХРОМОМАРГАНЦЕВОЙ ЛИГАТУРЫ В УСЛОВИЯХ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАВКИ

В настоящем исследовании представлена разработка технологии получения хромомарганцевой лигатуры в условиях крупномасштабной лабораторной плавки с использованием рафинировочной электропечи мощностью 100 кВА. В качестве шихтовых материалов использовались железомарганцевая руда месторождения Кереге-Тас и пыль ферросиликохрома (ФСХ), образующаяся в процессе дробления. Пыль ФСХ применялась в качестве восстановителя благодаря высокому содержанию кремния. Было проведено семь плавок, в результате которых получена хромомарганцевая лигатура требуемого состава. Средний химический состав полученного сплава составил: Fe – 35,63 %, Mn – 40,30 %, Cr – 20,94 %, Si – 4,54 %.

Физико-химические свойства сплава были исследованы с использованием рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). По результатам РФА установлено наличие α-твёрдого раствора (Fe, Cr, Mn), а также силицидных фаз FeSi и Cr_5Si_3. СЭМ-изображения показали выраженную микроструктурную неоднородность, пористость и загрязняющие включения, что связано с неравномерным распределением основных элементов по объему сплава. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного получения хромомарганцевой лигатуры с использованием пыли ФСХ и низкосортной марганцевой руды, что актуально для ресурсосберегающих металлургических технологий в условиях Казахстана.

Ключевые слова: хромомарганцевая лигатура, восстановитель, железомарганцевая руда, пыль ферросиликохрома, фазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ.

МРНТИ 53.31.15

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/392-405

А. Г. Калиакпаров[1], *А. М. Аубакиров[2], Ю. Е. Капелюшин[3]

[1]ТОО «ERG Research and Development»,
Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]Южно-Уральский Государственный университет (НИУ),
Российская Федерация, г. Челябинск.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2394-3127
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3775-655X
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3352-1780
*e-mail: almat.aubakirov@list.ru

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЫСОКОЗОЛЬНОГО УГЛЕРОДИСТОГО ВОССТАНОВИТЕЛЯ ДЛЯ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассмотрена возможность получения специального высокозольного кокса из углей разреза «Восточный» Экибастузского угольного бассейна и его применения в ферросплавном производстве. Актуальность исследования связана с дороговизной коксового орешка и необходимостью поиска альтернативных углеродистых восстановителей для электротермической выплавки ферросплавов. Объектом исследования выступал высокозольный уголь разреза «Восточный» фракции 10(20)–80(100) мм, характеризующийся повышенным содержанием минеральной (зольной) части в угольной массе. В работе приведены сведения о качестве исходного угля, его техническом составе, а также результаты лабораторных опытов по среднетемпературному коксованию.

Показано, что термическая обработка высокозольного угля позволяет получить коксовый остаток с относительно высоким содержанием фиксированного углерода, развитой пористой структурой и улучшенными физико-химическими показателями, важными для рудовосстановительных процессов. Отмечено, что минеральная часть такого восстановителя представлена преимущественно алюмосиликатными соединениями, что позволяет рассматривать его не только как источник углерода, но и как углеродисто-минеральный компонент шихты. Сделан вывод о целесообразности дальнейших исследований и разработки способа среднетемпературного коксования высокозольных углей разреза «Восточный» с целью получения специального восстановителя для производства различных марок ферросплавов. Применение такого материала может способствовать рациональному использованию угольного сырья Казахстана, расширению сырьевой базы ферросплавной отрасли и улучшению технико-экономических показателей производства.

Ключевые слова: угли, восстановитель, кокс, производство ферросплавов, высокозольные угли, среднетемпературное коксование.

Введение

Ферросплавная отрасль является одним из главных потребителей твердых углеродистых восстановителей. Требования к восстановителям в зависимости от выплавляемых марок ферросплавов и характеристики используемого печного оборудования разнообразно. Требования к углеродистым восстановителям определяются их физико-химическими и механическими свойствами, а также минералогическим составом золы. При этом существенное значение имеет и стоимость восстановителя. В связи с этим необходим поиск доступных альтернативных углеродистых материалов, которые могли бы заменить традиционно применяемый коксовый орешек [1; 2].

Одним из перспективных способов расширения сырьевой базы ферросплавного производства может рассматриваться использование ископаемого твердого топлива при выплавке ферросплавов различных марок особенно в шлаковых режимах [3; 4]. Применение углей определяется существенными различиями в их петрографическом и минеральном составе, а также в совокупности физико-химических характеристик. В этой связи значительный практический интерес представляют высокозольные разновидности угольного сырья, к которым относятся не только природные угли, но и продукты обогащения, представленные отходами в виде породных фракций. Опыт последних лет свидетельствует о возможности их эффективного вовлечения в технологические процессы ферросплавного производства [5]. Эффективность вовлечения высокозольных углей в ферросплавное производство во многом определяется сочетанием их повышенной реакционной способности, высоким удельным электрическим сопротивлением и сложным минеральным составом. Наиболее благоприятными для технологического использования являются угли, минеральная часть которых характеризуется высоким содержанием компонентов, соответствующих основным элементам выплавляемого сплава, при одновременном низком содержании нежелательных примесей. В таком случае высокозольное угольное сырье может рассматриваться не только как источник углерода, но и как комплексный углеминеральный материал, способный выполнять одновременно функции восстановителя и источника отдельных компонентов шихты при производстве ферросплавов.

Согласно результатам многочисленных исследований и опыта ферросплавного производства, повышение эффективности плавки достигается при применении предварительно термически обработанного углеродистого сырья (кокса и полукокс). Данная закономерность сохраняется и для высокозольных углей, прошедших термическую подготовку, использование которых рассматривается как перспективное направление их вовлечения в производство ферросплавов [5; 6; 7; 8].

В работе [6] приведены результаты получения высокозольного кокса из спекающихся углей Батыр, Сары-Адыр и Куучек Карагандинского угольного бассейна. Исходное сырье характеризовалось толщиной пластического слоя в пределах 15–20 мм. В результате термической обработки были получены продукты

с зольностью 23,8; 54,6 и 36,8 % соответственно. При этом содержание фосфора в коксе оставалось низким и составляло 0,060; 0,043 и 0,006 %. Существенным преимуществом полученных материалов являлась их высокая структурная прочность, значения которой достигали 75,2; 84,6 и 85,1 % соответственно. Минеральная часть кокса содержала 54–64 % SiO_2. Совокупность полученных показателей свидетельствует о соответствии разработанного углеродистого материала основным требованиям, предъявляемым к восстановителям, используемым в электротермических процессах производства ферросплавов.

Исследователями [8] рассмотрена возможность получения коксового материала путем совместной термической переработки нескольких видов низкокачественного углеродистого сырья. В состав исходных шихт включали шламы обогатительных предприятий, высокозольный уголь шахты Долинская, а также угольную мелочь, представленную отсевами Борлинского месторождения. При толщине пластического слоя исходных шихт γ = 9–10 мм в результате коксования были сформированы продукты с высокой механической прочностью: показатель М25 находился в пределах 85,4–85,7 %. Полученные коксы характеризовались также значительно более высокой реакционной способностью по сравнению с металлургическим коксом КарМет. Скорость взаимодействия с диоксидом углерода составляла K_{CO_2} = 0,86–0,98 $см^3/(г \cdot с)$, тогда как для сравнительного металлургического кокса данный показатель был равен 0,45 $см^3/(г \cdot с)$. Зольность полученного продукта составляла 35,8–40,7 %, а выход летучих веществ V^{daf} – 1,6–2,3 %.

В Японии накоплен практический опыт вовлечения в переработку низкокачественного угольного сырья, включая отходы углеобогатительных предприятий и флотохвосты. Одним из направлений их дальнейшего использования является получение высокозольного кокса, предназначенного для применения в технологических процессах ферросплавной промышленности [9; 10].

Казахстан располагает значительными запасами угольного сырья с повышенной зольностью, отличающегося широким диапазоном качественных характеристик [11]. К числу наиболее известных источников такого сырья относятся угли Экибастузского угольного бассейна, а также месторождения Борлы.

Материалы и методы

Предметом настоящих исследований являются угли Экибастузского угольного бассейна (рисунок 1).

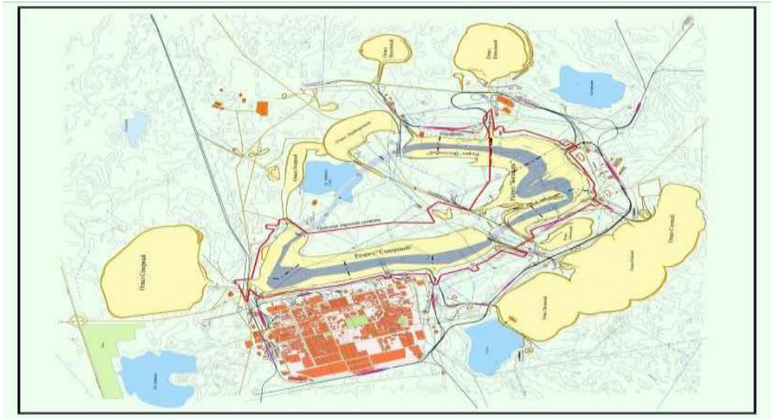


Рисунок 1 – Схематическое расположение
Экибастузского каменноугольного бассейна

В восточной части Экибастузского угольного бассейна расположен разрез «Восточный», относящийся к группе ERG.

Таблица 1 – Средние показатели качества углей разреза «Восточный» [11]

Пласт	Зольность, %		V, %	S, %	$Q_н$, ккал/кг	Группа по ГОСТ 8779-7
	Горная масса	Угольная масса				
1	36	33,1	29,5	0,67	4550	Первая
2	36,1	31,2	25	0,54	4540	Первая
1+2	36	31,9	27,2	0,58	4550	Первая
3	47,3	40,5	26,6	0,54	3560	Вторая
1+2+3	42,1	36	27	0,56	4008	-
4	49,5	43,4	28	0,42	3370	-

Согласно ГОСТ 8779–79, исследуемые угли относятся к слабоспекающимся. Угли пластов 1 и 2 при низшей удельной теплоте сгорания рабочего топлива 4550 ккал/кг соответствуют первой группе.

Повышенное содержание минеральных компонентов в угольном веществе, а также присутствие породных прослоев обусловливают низкую эффективность его обогащения. Для углей пластов 1+2+3 массовая доля общей серы составляет 0,56 %. Выход летучих веществ по отдельным пластам находится в пределах 25,0–29,5 %. Зола угля обладает высокой температурой плавления 1621–1681 °С и относится к тугоплавким. Содержание серы низкое 0,45–0,51 %, а содержание фосфора высокое, массовая доля которой изменяется в пределах 0,081–0,088 %.

По степени метаморфических преобразований в их составе выделяются коксовые, газовые и жирные угли, последние представлены пачкой 1а. По марочному составу исследуемые угли классифицируются как КСН – низкометаморфизованные слабоспекающиеся коксовые угли.

Отметим, что рядовые угли разреза Восточный применяются в качестве твердых восстановителей при выплавке ферросплавов на АО «ТНК «Казхром». Уголь фр. 10–80 (100) мм используется напрямую, без предварительной подготовки (обогащения, коксования, полукоксования), за исключение фракционирования.

По предварительным расчетам, при коксовании высокозольных углей разреза Восточный можно получить восстановитель со следующим показателем качества (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Качественные характеристики исходного угля и кокса, %

№	Материал	Выход кокса	A_d	V_{daf}	S_d	P_d	W	$C_{фикс}$
1	Уголь разреза Восточный	100	43,0	30,0	0,4	0,1	7,4	27,0
2	Высокозольный кокс	72,0-77,0 сух	51,9	5	0,3	0,1	15	43,2

Проведенными лабораторными опытами показано, что среднетемпературное коксование угля разреза Восточный обеспечивает получение высокозольного кокса пригодного для применения в производстве ферросплавов.

Целью экспериментальных исследований являлось – принципиальная оценка спекаемости высокозольных углей разреза Восточный с оценкой технических характеристик коксового остатка.

Исходным материалом для экспериментов являлся высокозольный уголь разреза Восточный фр. 10–80(100) мм. Проба представляла угольную массу фр. 0–80 (100) мм. Содержание мелочи фр. 0–10 мм в исходной пробе составила около 48,5 % и фр. +10 мм – 51,5 % соответственно. Технический состав исходного угля приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Технический состав исходной пробы угля фракции 0-80(100) мм

Материал	W	A	V
Уголь разреза Восточный	3,62	42,76	21,07

Средние значения насыпной массы исходной пробы угля по классам крупности изменялись в пределах 974,7 – 1121 кг/м3.

Результаты предварительных тестовых эксперименты по коксованию высокозольных углей разреза Восточный представлены на рисунке 2.

Выход кокса составил около 80–95 %. Теоретический выход кокса может быть ниже и составит на уровне 70 %. Эти данные, коррелируют с результатами предварительных прогнозных расчетов. Относительное содержание золы увеличивается с 42,8 % до 53,8 %, при этом содержание Сфикс увеличивается с 36,2 % до 48,4 %. С учетом предварительного характера проведенных исследований, данный показатели следует уточнить на следующих этапах исследований.

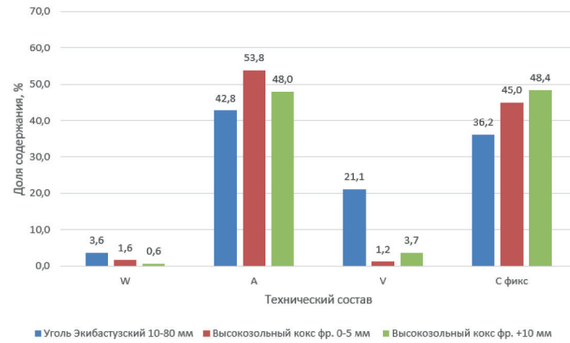


Рисунок 2 – Показатели технического состава высокозольного кокса

В результате коксования (термической обработки) высокозольного угля наряду с процессами изменения вещественного состава, происходят процессы структурирования тела коксового остатка, его упрочнение, повышаются пористость и удельное электросопротивление. Указанные характеристики являются наиболее важными показателями качества твердых восстановителей для электротермических процессов.

Высокое содержание золы не должно повлиять на ход технологического процесса выплавки ферросплавов поскольку, как отмечено выше, высокозольный уголь уже применяется в производстве ферросплавов. Однако работа восстановителя с улучшенными качественными показателями приобретает совершенно иной характер поведения в печи.

Кроме этого, в процессе термической обработки угля (коксования) будут образовываться не менее ценные продукты, в виде каменноугольной смолы и коксового газа, которые как самостоятельные ресурсы широко применяются в различных производствах.

Опыт получения высокозольного кокса представлен в работе [5]. Исходным сырьем для получения кокса являлись угли месторождения Борлы. По данным [12], на Таразском металлургическом заводе (ТМЗ) имеется опыт коксования углей Борлы во вращающихся печах. Данное оборудование применяется для прокаливания антрацита и кокса. При выборе технологического подхода к коксованию высокозольных углей были приняты во внимание особенности вращающихся печей, включая их преимущества и ограничения при проведении пиролиза угольного сырья [13].

Производство высокозольного кокса на ТМЗ осуществлялось использованием угля преимущественно в крупнокусковом виде: доля класса более 13 мм составляла 89,3 % (таблица 3).

Таблица 3 – Гранулометрический состав исходного угля и полученного кокса, %

Класс крупности, мм	Исходный уголь со склада	Исходный уголь из загрузочного бункера	Кокс на выходе из охладительного барабана
Количество проб	7	7	31
>120	20,4	10,0	-
120-70	19,9	27,0	-
70-20	29,3	32,3	24,5
20-13	19,7	17,7	25,4
13-8	6,0	6,9	15,6
8-4,5	2,8	2,9	16,1
<4,5	1,9	3,2	18,4
Средний размер, $d_{ср}$, мм	62,2	53,7	17,8

Основные качественные показатели угля Борлы приведены в таблице 4. Согласно ГОСТ 25543–2013, исследуемое сырье относится к спекающимся углям марки КЖ; толщина пластического слоя составляла 21 мм. Уголь отличался сравнительно высокой плотностью: его пористость составляла 10,6 %, а структурная прочность – 84,7 %.

Таблица 4 – Физико-химические свойства высокозольного угля и кокса

Показатель	Уголь месторождения Борлы	Высокозольный кокс	Кокс КХП
Технический состав, %:			
W^r	8,0	2,0	6,0
A^d	38,7	47,3	13,2
V^{daf}	26,3	4,8	1,6
S^d	0,37	0,36	0,42
P^d	0,012	0,022	0,054
C_{fix}, %	45,2	50,2	85,4
Состав на органическую массу, %:			
C^{daf}	84,43	90,79	97,35
H^{daf}	5,29	2,83	0,36
N^{daf}	1,66	1,67	1,62
O^{daf}	8,02	4,04	0,18
S^{daf}	0,60	0,67	0,49
Реакционная способность по CO_2 при 1000 ^{0}C, K_{CO2}, см^3/г·с	–	2,7	0,24
Удельное электросопротивление по классу 6-3 мм, р=0,2 кг/см^2, ρ, Ом·см	> $1{,}96\cdot10^6$	> $1{,}96\cdot10^6$	2,9
Плотность, г/см^3:			
действительная, d^d_r	1,685	2,240	1,961
кажущаяся, d^d_a	1,506	1,572	1,051
Пористость, P^d_t, %	10,6	29,8	46,4
Общий объем пор, $W_{общ}$, см^3/г	0,071	0,190	0,442
Структурная прочность, $П_с$, %	84,7	91,9	87,4

При уменьшении выхода летучих веществ до 1–2 % зольность продукта возрастает до 70–75 %, тогда как содержание фиксированного углерода снижается до 34–40 %. Одновременно отмечается существенное уменьшение удельного электрического сопротивления кокса, что ухудшает его эксплуатационные характеристики и ограничивает эффективность применения в качестве углеродистого восстановителя при электротермической выплавке ферросплавов.

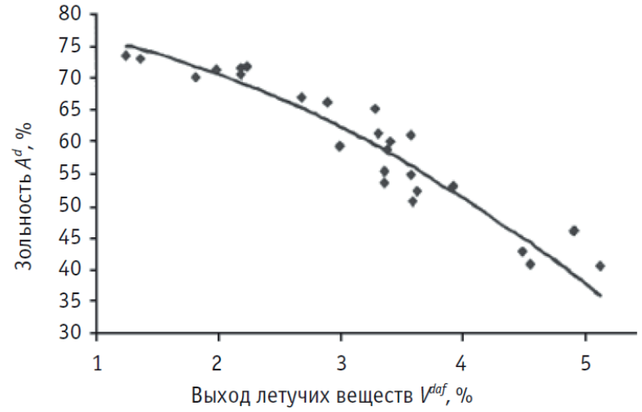


Рисунок 3 – Взаимосвязь зольности и выхода летучих веществ кокса

В качестве оптимального выбран режим коксования, обеспечивающий получение продукта с выходом летучих веществ 4,5–5,0 %. При таких условиях зольность кокса не превышает 40 %, а содержание фиксированного углерода сохраняется на уровне не менее 53 %. Физико-химические показатели кокса, полученного при выбранных параметрах процесса, представлены в таблице 4.

За исключением повышенной зольности, основные показатели полученного кокса соответствуют требованиям, предъявляемым к углеродистым восстановителям, применяемым при электротермической выплавке различных сплавов. При этом по реакционной способности и удельному электрическому сопротивлению опытный кокс характеризуется более высокими значениями по сравнению с установленными требованиями.

Высокая зольность опытного кокса (A^d = 47,3 %) обусловлена главным образом значительным содержанием минеральных компонентов в исходном угле (A^d = 38,7 %). В связи с этим особый интерес представляет определение состава минеральной части полученного продукта. В таблице 5 приведены средние значения химического состава исходного угля и высокозольного кокса, сопоставленные с характеристиками коксового орешка КХП, используемого на ферросплавных предприятиях России и Казахстана.

Таблица 5 – Показатели золы высокозольного кокса

Показатели	Уголь Борлы	Высоко-зольный кокс	Коксовый орешек КХП
Содержание минеральных примесей на 100 кг углерода ($C_{тв}$), кг	85,6	94,2	15,4
Содержание оксидов (в числителе – в золе, %, в знаменателе – на 100 кг углерода, кг):			
SiO_2	61,00/52,22	58,30/54,92	48,74/7,51
Al_2O_3	26,00/22,26	28,43/26,78	24,42/3,76
Fe_2O_3	3,70/3,17	3,26/3,07	9,46/1,46
CaO	4,08/3,49	3,59/3,38	6,08/0,94
MgO	1,37/1,17	1,79/1,69	2,36/0,36
TiO_2	0,83/0,71	0,73/0,69	1,44/0,22
SO_3	1,30/1,11	1,12/1,06	3,45/0,53
K_2O	0,93/0,80	0,92/0,87	1,87/0,29
Na_2O	0,77/0,66	0,72/0,68	1,38/0,21
Температура плавления золы (ГОСТ 2057-94), ^{0}C:			
- начало деформации, t_A	1280	1310	1210
- полусфера размягчения, t_B	1480	1490	1260
- жидкоплавкое состояние, t_C	>1500	>1500	1340
Коэффициент плавления золы, $К_{пл}$	9,5	10,0	4,1
Индекс основности золы, $И_{осн}$	5,1	5,9	3,9
Коэффициент вязкости шлака, $К_в$	1,74	1,57	1,15
Температура начала нормального жидкого шлакоудаления, $Т_{иж}$, ^{0}C	1630	1580	1450

По совокупности химических характеристик зольный остаток опытного кокса классифицируется как алюмосиликатный, поскольку суммарная доля SiO2 и Al_2O_3 достигает 86,7 %.

Результаты и обсуждения

Высокая доля основных оксидов в зольной составляющей опытного кокса, где суммарное содержание SiO_2, Al_2O_3 и Fe_2O_3 достигает 90 %, позволяет рассматривать данный материал не только как углеродистый восстановитель, но и как углеродисто-минеральный компонент шихты. Наиболее перспективным представляется его применение при выплавке комплексных ферросплавов, для которых одновременное присутствие восстановителя и минеральных компонентов непосредственно в составе шихты может иметь технологические преимущества. Как показано в работах ряда исследователей в области ферросплавного производства [3; 14; 15; 16], тесный контакт углерода с восстанавливаемыми оксидами способствует протеканию совместного восстановления в более благоприятных термодинамических условиях. По сравнению с последовательным или раздельным восстановлением отдельных оксидов такой механизм может обеспечивать более высокую степень извлечения целевых металлов при одновременном снижении энергетических затрат.

Имеющиеся сведения об опыте применения и положительные результаты исследований, приведенные в [5], могут служить основанием для разработки способов предварительной термической обработки (коксования) с получением

специальных высокозольных восстановителей. Применительно к углям разреза Восточный целесообразным видится разработка технологии среднетемпературного коксования их с целью комплексной, более глубокой переработки углей и стабилизации качественного состава финального продукта – высокозольного кокса.

Выводы

Высокозольный кокс, обладающий указанными характеристиками, с учетом результатов применения аналогичных материалов может найти эффективное применение в качестве углеминеральной составляющей шихты при производстве различных марок ферросплавов. Его использование позволит обеспечить высокое извлечение восстанавливаемых элементов в сплав при относительно низких энергетических затратах. Организация производства и последующее применение высокозольного кокса создадут условия для более рационального использования углеминерального сырья разреза «Восточный», расширения номенклатуры выпускаемых ферросплавов и повышения технико-экономической эффективности производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Мизин, В. Г.** Углеродистые восстановители для ферросплавов / В. Г. Мизин, Г. В. Серов. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.

2 **Страхов, В. М.** Альтернативные углеродистые восстановители для ферросплавных производств // Кокс и химия. – 2009. – № 1. – С. 20–25.

3 **Друинский, М. И.** Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана / М. И. Друинский, В. И. Жучков. – Алма-Ата : Наука Казахской ССР, 1998. – 208 с.

4 **Страхов, В. М.** Роль угля и эффективность его использования взамен кокса в электротермической плавке ферросилиция / В. М. Страхов, А. Г. Калиакпаров, И. М. Кашлев // Бюллетень «Черная металлургия». – 2012. – № 11. – С. 67–75.

5 **Страхов, В. М.** Получение кокса из высокозольных углей Казахстана во вращающейся печи и возможность его использования в металлургии ферросплавов / В. М. Страхов, А. Г. Калиакпаров, Б. А. Святов // Кокс и химия. – 2020. – № 10. – С. 34–42.

6 **Ким, В. А.** Получение комплексных углеродистых восстановителей из высокозольных углей / В. А. Ким, В. Г. Раздобреев, С. Х. Кударинов [и др.] // Кокс и химия. – 2015. – № 5. – С. 19–22.

7 **Кост, Л. А.** Восстановительная термообработка углистых пород как перспективный процесс их использования / Л. А. Кост, Л. Н. Лебедева, Н. Н. Новикова, М. Я. Шпирт // Химия твердого топлива. – 1994. – № 6. – С. 129–136.

8 **Молдыбаев, А. Б.** Получение спецкокса совместным коксованием углеотходов и высокозольных углей / А. Б. Молдыбаев, Б. Т. Ермагамбетов, К. М. Мамраева [и др.] // Комплексное использование минерального сырья. – 1993. – № 3. – С. 49–51.

9 Способ производства металлургического кокса из низкокачественного угля : патент Японии № 3270602 / Сасаки Масаки ; заявитель Nippon Steel Corporation. – Опубл. 20.06.1995. – МКИ C10B 57/04.

10 Способ производства феррококса : патент WO 2016208435 / Фудзимото Хидэкадзу, Анясики Такаси, Сиодзава Тору ; заявитель JFE Steel Corporation. – Опубл. 29.12.2016. – МКИ C10B 53/08; C10B 57/06.

11 Бассейны и месторождения углей и горючих сланцев Казахстана : справочник. – 2-е изд. – Алматы : QAZGEOAQPARAT, 2019. – 161 с.

12 **Святов, Б. А.** Получение полукокса из длиннопламенного угля во вращающейся печи / Б. А. Святов, В. М. Страхов, И. В. Суровцева // Кокс и химия. – 2012. – № 6. – С. 26–30.

13 **Солдатов, А. И.** Современная технология электродных масс / А. И. Солдатов, Т. В. Рогожкина. – Челябинск : Фрегат, 1997. – 156 с.

14 **Щедровицкий, Я. С.** Сложные кремнистые ферросплавы. – Москва : Металлургия, 1966. – 176 с.

15 **Медведев, Г. В.** Термодинамический анализ реакций совместного восстановления углеродом оксидов марганца, кремния и алюминия / Г. В. Медведев, Т. Д. Такенов // В сб.: Комплексная переработка железных, марганцевых и хромитовых руд Казахстана. – Алма-Ата : Наука, 1969. – С. 132–138.

16 **Рябчиков, И. В.** Ферросплавы с редко- и щелочноземельными металлами / И. В. Рябчиков, В. Г. Мизин, Н. П. Лякишев, А. С. Дубровин. – М. : Металлургия, 1983. – 272 с.

REFERENCES

1 **Mizin, V. G.** Uglerodistye vosstanoviteli dlya ferrosplavov [Carbonaceous Reducing Agents for Ferroalloys] / V. G. Mizin, G. V. Serov. – Moscow : Metallurgiya, 1976. – 272 p.

2 **Strakhov, V. M.** Alternativnye uglerodistye vosstanoviteli dlya ferrosplavnykh proizvodstv [Alternative Carbonaceous Reducing Agents for Ferroalloy Production] // Koks i khimiya. – 2009. – № 1. – P. 20–25.

3 **Druinskii, M. I.** Poluchenie kompleksnykh ferrosplavov iz mineral'nogo syr'ya Kazakhstana [Production of Complex Ferroalloys from Kazakhstan's Mineral Raw Materials] / M. I. Druinskii, V. I. Zhuchkov. – Alma-Ata : Nauka Kazakhskoi SSR, 1998. – 208 p.

4 **Strakhov, V. M.** Rol' uglya i effektivnost' ego ispol'zovaniya vzamen koksa v elektrotermicheskoi plavke ferrosilitsiya [Alternative Carbonaceous Reducing Agents for Ferroalloy Production] / V. M. Strakhov, A. G. Kaliakparov, I. M. Kashlev // Byulleten' «Chernaya metallurgiya». – 2012. – № 11. – P. 67–75.

5 **Strakhov, V. M.** Poluchenie koksa iz vysokozol'nykh uglei Kazakhstana vo vrashchayushcheisya pechi i vozmozhnost' ego ispol'zovaniya v metallurgii ferrosplavov [The Role of Coal and the Efficiency of Its Use Instead of Coke in Electric Smelting of

Ferrosilicon] / V. M. Strakhov, A. G. Kaliakparov, B. A. Svyatov // Koks i khimiya. – 2020. – № 10. – P. 34–42.

6 **Kim, V. A.** Poluchenie kompleksnykh uglerodistykh vosstanovitelei iz vysokozol'nykh uglei [Production of Complex Carbonaceous Reducing Agents from High-Ash Coals] / V. A. Kim, V. G. Razdobreev, S. Kh. Kudarinov [et al.] // Koks i khimiya. – 2015. – № 5. – P. 19–22.

7 **Kost, L. A.** Vosstanovitel'naya termoobrabotka uglistykh porod kak perspektivnyi protsess ikh ispol'zovaniya [Reductive Thermal Treatment of Carbonaceous Rocks as a Promising Method for Their Utilization] / L. A. Kost, L. N. Lebedeva, N. N. Novikova, M. Ya. Shpirt // Khimiya tverdogo topliva. – 1994. – № 6. – P. 129–136.

8 **Moldybaev, A. B.** Poluchenie spetskoksa sovmestnym koksovaniem ugleotkhodov i vysokozol'nykh uglei [Production of Special Coke by Co-Carbonization of Coal Waste and High-Ash Coals] / A. B. Moldybaev, B. T. Ermagambetov, K. M. Mamraeva [et al.] // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya. – 1993. – № 3. – P. 49–51.

9 Sposob proizvodstva metallurgicheskogo koksa iz nizkokachestvennogo uglya [Method for Producing Metallurgical Coke from Low-Grade Coal] : Patent Yaponii No. 3270602 / Sasaki Masaki ; zayavitel' Nippon Steel Corporation. – Published 20.06.1995. – IPC C10B 57/04.

10 Sposob proizvodstva ferrokoksa [Method for Producing Ferrocoke] : Patent WO 2016208435 / Fujimoto Hidekazu, Anyashiki Takashi, Shiozawa Toru ; zayavitel' JFE Steel Corporation. – Published 29.12.2016. – IPC C10B 53/08 ; C10B 57/06.

11 Basseiny i mestorozhdeniya uglei i goryuchikh slantsev Kazakhstana [Coal Basins and Oil Shale Deposits of Kazakhstan: Reference Book] : spravochnik. – 2nd ed. – Almaty : QAZGEOAQPARAT, 2019. – 161 p.

12 **Svyatov, B. A.** Poluchenie polukoksa iz dlinnoplamennogo uglya vo vrashchayushcheisya pechi [Production of Semi-Coke from Long-Flame Coal in a Rotary Kiln] / B. A. Svyatov, V. M. Strakhov, I. V. Surovtseva // Koks i khimiya. – 2012. – № 6. – P. 26–30.

13 **Soldatov, A. I.** Sovremennaya tekhnologiya elektrodnykh mass [Modern Technology of Electrode Pastes] / A. I. Soldatov, T. V. Rogozhkina. – Chelyabinsk : Fregat, 1997. – 156 p.

14 **Shchedrovitskii, Ya. S.** Slozhnye kremnistye ferrosplavy [Complex Silicon Ferroalloys]. – Moscow : Metallurgiya, 1966. – 176 p.

15 **Medvedev, G. V.** Termodinamicheskii analiz reaktsii sovmestnogo vosstanovleniya uglerodom oksidov margantsa, kremniya i alyuminiya [Thermodynamic Analysis of the Reactions of the Simultaneous Carbothermic Reduction of Manganese, Silicon, and Aluminum Oxides] / G. V. Medvedev, T. D. Takenov // V sb.: Kompleksnaya pererabotka zheleznykh, margantsevykh i khromitovykh rud Kazakhstana. – Alma-Ata : Nauka, 1969. – P. 132–138.

16 **Ryabchikov, I. V.** Ferrosplavy s redko- i shchelochnozemel'nymi metallami [Ferroalloys Containing Rare and Alkaline Earth Metals] / I. V. Ryabchikov, V. G. Mizin, N. P. Lyakishev, A. S. Dubrovin. – Moscow : Metallurgiya, 1983. – 272 p.

Поступило в редакцию 30.06.26.
Поступило с исправлениями 20.07.26.
Принято в печать 02.09.26.

А. Г. Қалиақпаров[1], *А. М. Аубакиров[2], Ю. Е. Капелюшин[2]
[1]«ERG Research and Development» ЖШС,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.,
[2]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[3]Оңтүстік Орал мемлекеттік университеті (Ұлттық зерттеу университеті),
Ресей Федерациясы, Челябинск қ.
30.06.26 ж. баспаға түсті.
20.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФЕРРОҚОРЫТПА ӨНДІРІСІНЕ АРНАЛҒАН КҮЛДІЛІГІ ЖОҒАРЫ КӨМІРТЕКТІ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРҒЫШТЫҢ МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ БАҒАЛАНУЫ

Мақалада Екібастұз көмір бассейнінің «Восточный» кенішінің көмірлерінен арнайы күлділігі жоғары кокс алу және оны ферроқорытпа өндірісінде пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі кокстық жаңғақтың жоғары құнымен және ферроқорытпаларды электротермиялық балқытуда қолданылатын баламалы көміртекті тотықсыздандырғыштарды іздестіру қажеттілігімен негізделген. Зерттеу нысаны ретінде көмір массасындағы минералдық (күлдік) бөлігінің жоғары мөлшерімен сипатталатын «Восточный» кенішінің 10(20)–80(100) мм фракциялы күлділігі жоғары көмірі алынды. Жұмыста бастапқы көмірдің сапасы, техникалық құрамы және орташа температуралы кокстеу бойынша жүргізілген зертханалық тәжірибелердің нәтижелері келтірілген.

Күлділігі жоғары көмірді термиялық өңдеу нәтижесінде бекітілген көміртегінің мөлшері салыстырмалы түрде жоғары, кеуекті құрылымы жақсы дамыған және кенді тотықсыздандыру процестері үшін маңызды физика-химиялық қасиеттері жақсартылған кокс қалдығын алуға болатыны көрсетілген. Мұндай тотықсыздандырғыштың минералдық бөлігі негізінен алюмосиликатты қосылыстардан тұратыны анықталды, бұл оны тек көміртек көзі ретінде ғана емес, сондай-ақ шихтаның көміртекті-минералдық құрамдас бөлігі ретінде де қарастыруға мүмкіндік береді. Әртүрлі маркалы ферроқорытпаларды өндіруге арналған арнайы тотықсыздандырғыш алу мақсатында «Восточный» кенішінің күлділігі жоғары көмірлерін орташа температурада кокстеу технологиясын әзірлеу және осы бағыттағы зерттеулерді жалғастырудың орындылығы туралы қорытынды жасалды.

Мұндай материалды пайдалану Қазақстанның көмір шикізатын ұтымды игеруге, ферроқорытпа өндірісінің шикізаттық базасын кеңейтуге және өндірістің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: көмір, тотықсыздандырғыш, кокс, ферроқорытпа өндірісі, күлділігі жоғары көмірлер, орташа температуралы кокстеу.

A. G. Kaliakparov[1], *A. M. Aubakirov[2], Y. E. Kapelyushin[3]
[1]ERG Research and Development LLP, Republic of Kazakhstan, Astana;
[2]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan Pavlodar,
[3]South Ural State University (National Research University),
Russian Federation, Chelyabinsk.
Received 30.06.26.
Received in revised form 20.07.26.
Accepted for publication 02.09.26.

METALLURGICAL EVALUATION OF A HIGH-ASH CARBONACEOUS REDUCING AGENT FOR FERROALLOY PRODUCTION

This paper investigates the feasibility of producing a special high-ash coke from coal mined at the Vostochny open-pit mine of the Ekibastuz coal basin and evaluates its potential application in ferroalloy production. The relevance of the study is obusловлена the high cost of coke nut and the need to identify alternative carbonaceous reducing agents for the electric smelting of ferroalloys. The object of the study was high-ash coal from the Vostochny open-pit mine with a particle size of 10(20)–80(100) mm, characterized by a high content of mineral (ash-forming) matter. The paper presents the quality characteristics and proximate analysis of the raw coal, together with the results of laboratory-scale medium-temperature carbonization experiments.

The results demonstrate that thermal treatment of high-ash coal produces a coke residue with a relatively high fixed carbon content, a well-developed porous structure, and improved physicochemical properties essential for carbothermic reduction processes. The mineral fraction of the reducing agent is shown to consist predominantly of aluminosilicate compounds, allowing it to be considered not only as a carbon source but also as a carbonaceous-mineral component of the burden. The study confirms the feasibility of further research aimed at developing a medium-temperature carbonization technology for high-ash coals from the Vostochny open-pit mine to produce a specialized reducing agent for manufacturing various grades of ferroalloys. The application of such a material could promote the rational utilization of Kazakhstan's coal resources, broaden the raw material base of the ferroalloy industry, and improve the techno-economic performance of ferroalloy production.

Keywords: coal, reducing agent, coke, ferroalloy production, high-ash coal, medium-temperature carbonization.

МРНТИ 53.01.05

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/406-421

Б. К. Рахадилов[1], Н. Муктанова[2], *Э. К. Ахметова[3], Н. М. Магазов[4]

[1,2,3]ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

[2,3]Институт материаловедения и металлургии,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

[4]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4823-6640

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4060-1001

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9941-9199

*e-mail: elya.akhmetova.04@gmail.com

СТРУКТУРНЫЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ CRN И CR/CRN НА СПЛАВЕ E110

Цель работы заключалась в получении однослойных покрытий CrN и многослойных покрытий Cr/CrN на циркониевом сплаве E110 и в оценке влияния газового режима осаждения и многослойной архитектуры на их структурное состояние, механико-трибологические свойства и устойчивость к высокотемпературному паровому окислению. Покрытия получали реактивным магнетронным распылением хромовой мишени. Для однослойного CrN проверяли три газовых режима Ar/N_2: 90/30, 85/35 и 80/40 ст.см³/мин. Для Cr/CrN готовили покрытия из 2, 4 и 6 слоёв. Образцы исследовали методами СЭМ/EDS, XRD, GDOES, наноиндентирования, АСМ и испытаний на трение; отдельно проводили выдержку в водяном паре при 1100 °C в течение 2 ч. Установлено, что при Ar/N_2 = 80/40 ст.см³/мин формируется наиболее ровный однослойный CrN: Ra = 0,114±0,006 мкм, а на рентгенограмме выражены линии кубического CrN. В серии Cr/CrN толщина увеличивалась с ростом числа слоёв; у 6-слойного образца она достигала около 4,18 мкм. Для этого покрытия получены H = 5,00±0,27 ГПа, E = 110±4 ГПа и скорость износа 2,26×10^{-4} мм³·$Н^{-1}$·$м^{-1}$. После парового окисления на поверхности покрытий регистрировался Cr_2O_3, а в 6-слойном образце сохранялись слабые линии CrN и Cr, что указывает на частичную сохранность внутренних слоёв. Практическая значимость работы состоит в обосновании перспективности многослойной архитектуры Cr/CrN как защитного барьерного покрытия для циркониевых оболочек ТВЭЛ нового поколения, устойчивых к аварийным режимам эксплуатации.

Ключевые слова: циркониевый сплав E110, покрытия Cr/CrN, магнетронное распыление, высокотемпературное паровое окисление, многослойная структура, топливо, устойчивое к авариям.

Введение

Сплавы Zr-4 и E110 (Zr–1Nb) применяют в качестве материалов оболочек ТВЭЛ [1; 2; 3]. Для таких сплавов важны малое сечение захвата нейтронов, теплопроводность и коррозионная стойкость [4]. Однако при аварийном нагреве в паре их поведение резко ухудшается. При температуре выше 1000 °C цирконий окисляется с образованием ZrO_2, одновременно выделяется водород [5;6].

Один из способов уменьшить скорость окисления – нанести на поверхность защитный слой [7; 8]. В данной работе выбраны покрытия Cr и CrN. Хром при нагреве может давать оксид Cr_2O_3, а нитрид хрома отличается более высокой твёрдостью и износостойкостью [9].

Для сплошного Cr слоя остаётся проблема взаимодействия с циркониевой подложкой при высоких температурах [10;11]. Поэтому была проверена многослойная схема Cr/CrN. В ней металлические прослойки Cr чередуются с более твёрдыми слоями CrN. Такой вариант должен уменьшать влияние отдельных дефектов слоя и менять путь проникновения кислорода.

Задача работы заключалась в получении CrN и Cr/CrN покрытий на E110 и сопоставлении образцов по нескольким признакам: фазовый состав, морфология, твёрдость, износ и состояние после выдержки в паре при 1100 °C.

Материалы и методы

В качестве подложек использовали пластины из циркониевого сплава E110 (Zr–1Nb) размером 10×10×2 мм. Химический состав сплава принимали по ГОСТ 25278.10–82 и ТУ 95.166–83.

Перед осаждением поверхность образцов последовательно шлифовали абразивной бумагой Р400–Р2500/Р4000, затем полировали суспензией Al_2O_3 с размером частиц 1 мкм. После механической подготовки образцы промывали в ацетоне и этаноле в ультразвуковой ванне по 10 мин.

Таблица 1 – Химический состав сплава E110, масс. % согласно ГОСТ, ТУ: 25278.10-82

Zr	Be	Nb	Hf	Ni	Cr	Ti	Al	O	Pb
99.5	0.003	0.9–1.1	0.01	0.02	0.02	0.007	0.008	0.1	0.005

Покрытия наносили DC-магнетронным распылением с хромовой мишенью чистотой 99,95 %. Мощность составляла 200 Вт, давление в камере – 0,4–0,6 Па, температура подложки – 250–300 °C, смещение – от −40 до −100 В. Непосредственно перед нанесением проводили ионную очистку Ar^+ в течение 15 мин.

Однослойные CrN получали в смеси Ar/N_2 (90/30–80/40 ст.см³/мин, 120 мин). Многослойные Cr/CrN формировали чередованием слоёв Cr (Ar) и CrN (Ar/N_2 80/40) с архитектурой 2, 4 и 6 слоёв (1 ч на слой).

Морфологию и элементный состав изучали методами СЭМ и EDS. Фазовый состав определяли XRD с Cu Kα-излучением при угле скользящего падения 1°.

Глубинное распределение элементов оценивали методом GDOES. Шероховатость поверхности определяли профилометрией и АСМ.

Твёрдость и модуль упругости измеряли наноиндентированием при нагрузках 10–100 мН с обработкой по методу Оливера–Фарра. Трибологические испытания проводили по схеме «шарик–диск» при нагрузке 3 Н и пути трения 100 м.

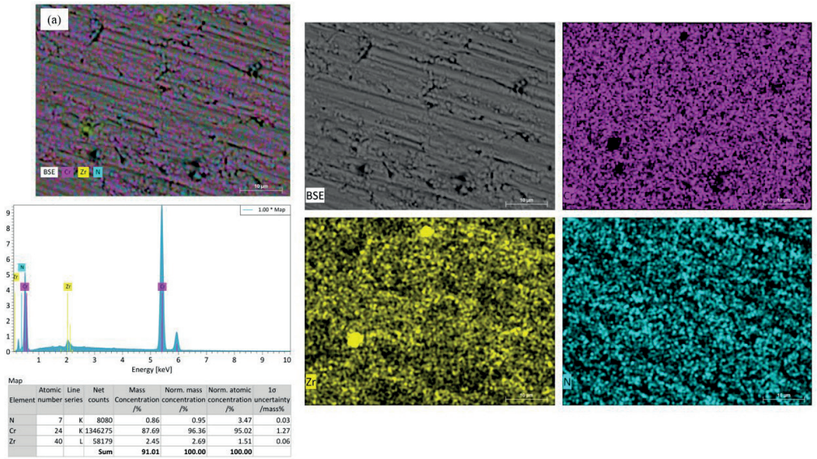
Для проверки термической устойчивости образцы выдерживали в вакууме при 800–1000 °С в течение 4 ч и окисляли на воздухе при 700 °С в течение 5 ч. Отдельная серия испытаний проводилась в водяном паре при 1100 °С в течение 2 ч. Изменение массы фиксировали до и после испытаний.

Результаты и обсуждение

Оптимизация технологических параметров и формирование базовой структуры.

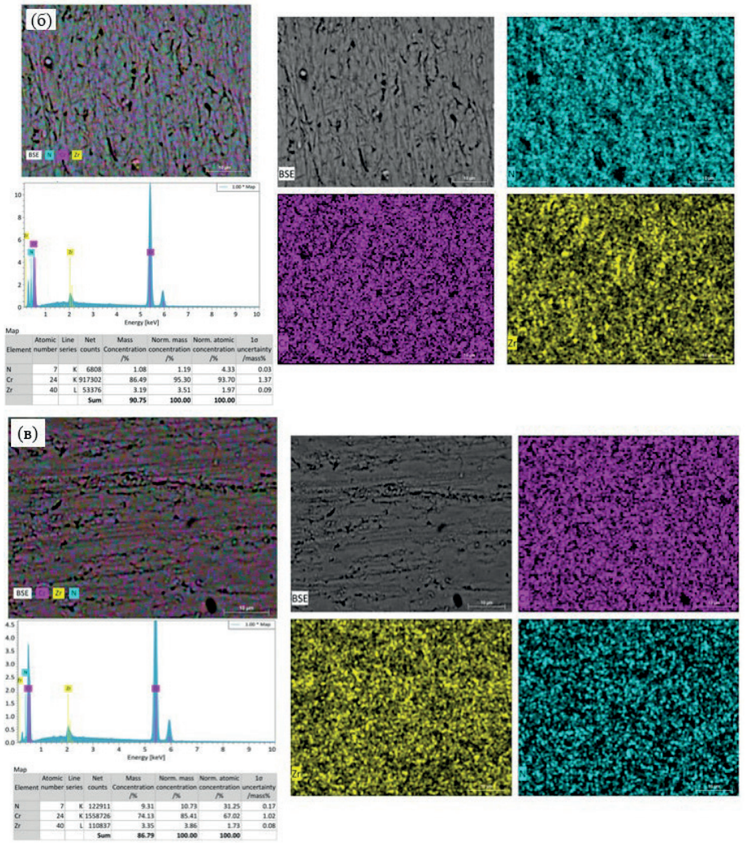
Вначале сравнили три однослойных CrN покрытия, которые различались только расходом газов Ar/N_2: 90/30, 85/35 и 80/40 ст.см³/мин.

На рис. 1 показаны СЭМ-изображения поверхности и EDS-картирование. Во всех случаях присутствуют Cr и N. При переходе к режиму 80/40 ст.см³/мин распределение элементов выглядит более равномерным, а поверхность – более плотной.



Map

Element	Atomic number	Line series	Net counts	Mass Concentration /%	Norm. mass concentration /%	Norm. atomic concentration /%	1σ uncertainty /mass%
N	7	K	8080	0.86	0.95	3.47	0.03
Cr	24	K	1346275	87.69	96.36	95.02	1.27
Zr	40	L	58179	2.45	2.69	1.51	0.06
			Sum	91.01	100.00	100.00	



Map

Element	Atomic number	Line series	Net counts	Mass Concentration /%	Norm. mass concentration /%	Norm. atomic concentration /%	1σ uncertainty /mass%
N	7	K	6808	1.08	1.19	4.33	0.03
Cr	24	K	917302	86.49	95.30	93.70	1.37
Zr	40	L	53376	3.19	3.51	1.97	0.09
			Sum	90.75	100.00	100.00	

Map

Element	Atomic number	Line series	Net counts	Mass Concentration /%	Norm. mass concentration /%	Norm. atomic concentration /%	1σ uncertainty /mass%
N	7	K	122911	9.31	10.73	31.25	0.17
Cr	24	K	1558726	74.13	85.41	67.02	1.02
Zr	40	L	110837	3.35	3.86	1.73	0.08
			Sum	86.79	100.00	100.00	

Рисунок 1 – Морфология поверхности и результаты элементного анализа (EDS-картирование) покрытий Cr/CrN, полученных при различных соотношениях газов Ar/N_2: (а) 90/30 ст.см³/мин, (б) 85/35 ст.см³/мин, (в) 80/40 ст.см³/мин

Толщина полученных CrN слоёв находилась в диапазоне 1,62–1,96 мкм. Крупных сквозных дефектов на СЭМ-снимках не видно. Образец 80/40 ст.см³/мин отличается более плотной поверхностью; это согласуется с большим участием азота при формировании Cr–N связей.

По профилометрии Ra изменилась от 0,152±0,007 до 0,114±0,006 мкм. Наименьшее значение относится к режиму Ar/N_2 = 80/40 ст.см³/мин.

XRD показывает линии α-Zr от подложки и линии кубического CrN (Fm–3m). Режим 80/40 ст.см³/мин выбран для последующих многослойных образцов, поскольку для него линии CrN наиболее отчётливы, а шероховатость ниже.

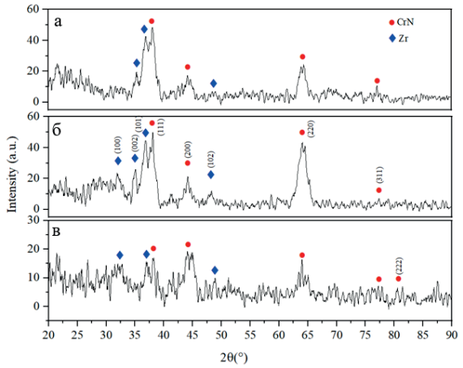


Рисунок 2 – Рентгенодифракционные спектры покрытий CrN, полученных методом магнетронного распыления при различных соотношениях рабочих газов Ar/N_2: (а) 90/30, (б) 85/35, (в) 80/40

Линейный EDS-профиль фиксирует границу между покрытием и подложкой: сигналы Cr и N уменьшаются, сигнал Zr растёт. Переходная зона составляет примерно 0,2–0,3 мкм.

У образца 80/40 ст.см³/мин изменения сигналов Cr и N по толщине меньше, чем у образцов 90/30 и 85/35 ст.см³/мин. Это указывает на более ровное распределение компонентов в слое CrN.

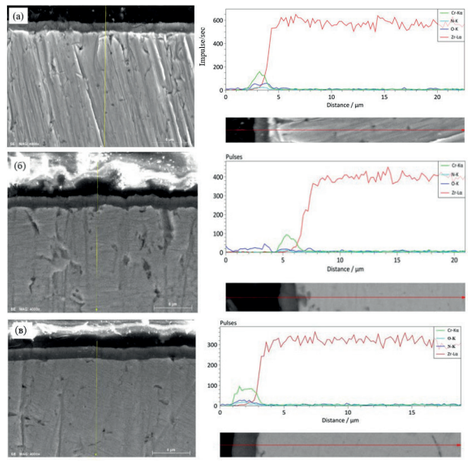


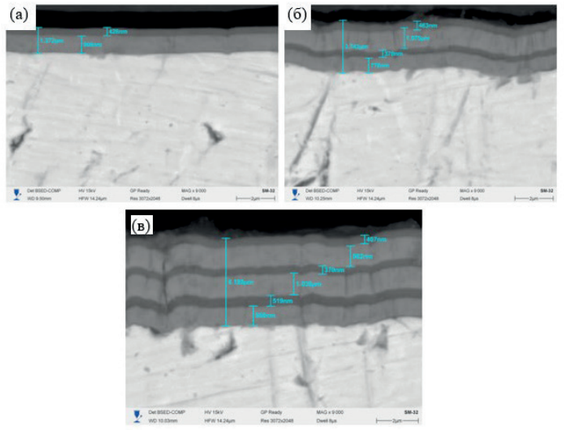
Рисунок 3 – Результаты линейного энергодисперсионного рентгеновского анализа поперечных сечений покрытий, полученных методом магнетронного распыления при различных соотношениях рабочих газов Ar/N_2: (а) 90/30 ст.см³/мин, (б) 85/35 ст.см³/мин, (в) 80/40 ст.см³/мин

В исходных покрытиях не обнаружены выраженные линии кислорода. Пики Cr_2O_3 и ZrO_2 на рентгенограммах также отсутствуют. Небольшой кислородный сигнал в EDS, вероятно, связан с тонкой поверхностной плёнкой после контакта с воздухом или с остаточным кислородом в камере.

Структурная архитектура и механические свойства многослойных систем Cr/CrN

После выбора газового режима 80/40 ст.см³/мин были нанесены Cr/CrN покрытия с 2, 4 и 6 слоями.

На СЭМ-снимках поперечного сечения видны чередующиеся полосы. Более светлые зоны относятся к Cr, более тёмные – к CrN. При увеличении числа слоёв общая толщина покрытия возрастает; для 6-слойного варианта она составляет около 4,18 мкм.



а) – двухслойное покрытие, б) – четырехслойное покрытие, в) – шестислойное покрытие

Рисунок 4 – Изображения поперечного сечения многослойных покрытий Cr/CrN, полученных методом магнетронного распыления на подложке E110, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа

EDS-картирование повторяет видимую слоистость: участки с повышенным Cr чередуются с зонами, где выше сигнал N. На приведённых сечениях не просматриваются крупные отслоения между слоями.

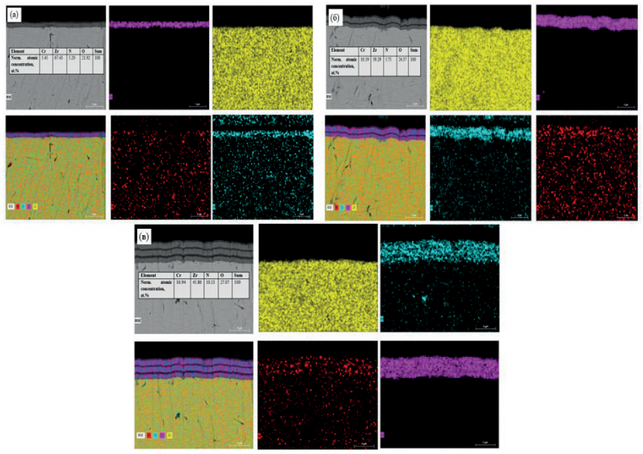


Рисунок 5 – SEM–EDS-картирование поперечного сечения многослойных покрытий Cr/CrN на подложке E110: (а) 2-слойное, (б) 4-слойное, (в) 6-слойное

Профиль GDOES для Cr имеет периодические изменения по глубине. Это соответствует чередованию металлических и нитридных слоёв.

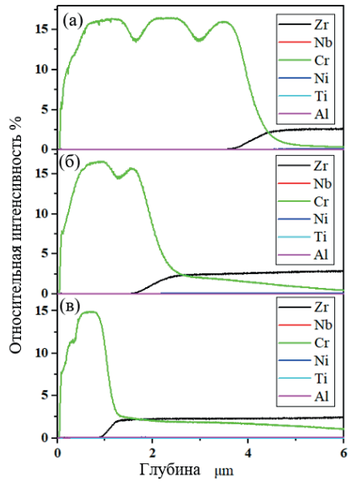
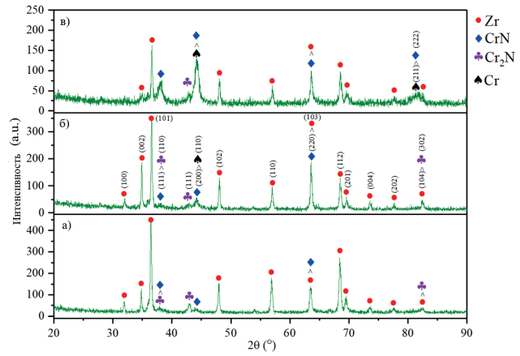


Рисунок 6 – Профили относительной интенсивности элементов по глубине, измеренные методом оптической эмиссионной спектрометрии тлеющего разряда для покрытий Cr/CrN различной многослойной архитектуры: (а) – 2-слойное, (б) – 4-слойное и (в) – 6-слойное покрытие, нанесенное на подложку из сплава E110

На XRD для многослойных образцов отмечены CrN (Fm−3m), Cr (Im−3m), ε−Cr_2N (P−31m) и α−Zr. С увеличением толщины сигнал подложки α−Zr уменьшается. Для 6-слойного образца размер областей когерентного рассеяния CrN составил 13,83 нм.



а– двухслойное покрытие, б) – четырехслойное покрытие, в) – шестислойное покрытие

Рисунок 7 – Дифрактограммы многослойных покрытий Cr/CrN, полученных методом магнетронного распыления на подложке E110

Наноиндентирование показало рост H при увеличении числа слоёв. Для 2 слоёв получены H = 2,59±0,09 ГПа и E = 97±2 ГПа; для 4 слоёв – H = 4,00±0,18 ГПа и E = 100±3 ГПа; для 6 слоёв – H = 5,00±0,27 ГПа и E = 110±4 ГПа.

АСМ для 6-слойного покрытия дала Ra = 47,8 нм и φ = 12,33°. Рельеф без резких перепадов высоты, что важно для контакта при трении.

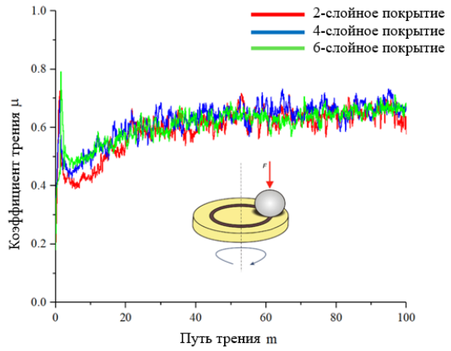


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента трения от пути трения многослойных покрытий Cr/CrN с различным количеством слоев

В таблице 2 показаны Ra, H, E, коэффициент трения и скорость износа. Для 6-слойного покрытия скорость износа равна $2{,}26\times10^{-4}$ мм³ · Н$^{-1}$ ·м$^{-1}$. Это меньше, чем для 2-слойного и 4-слойного покрытий.

Таблица 2 – Сводная информация о структурных и механико-трибологических свойствах многослойной структуры. Нанесение покрытий Cr/CrN на сплав Е110

Слои	Ra, нм (мкм)	H, ГПа	E, ГПа	CoF	Скорость износа, мм³·Н$^{-1}$·м$^{-1}$
2 слоя	12.7 (0.013)	2.59 ± 0.09	97 ± 2	0.595	6.20×10^{-4}
4 слоя	57.4 (0.057)	4 ± 0.18	100 ± 3	0.620	8.64×10^{-4}
6 слоёв	47.8 (0.047)	5±0.27	110±4	0.610	2.26×10^{-4}

Из таблицы 2 видно, что 6-слойный образец имеет максимальную твёрдость и минимальную скорость износа в данной серии.

Повышение стойкости 6-слойного Cr/CrN покрытия можно объяснить совместным действием нескольких факторов. Чередование Cr и CrN увеличивает число межфазных границ, которые затрудняют прямое распространение трещин и диффузионное проникновение кислорода к подложке. Металлические прослойки Cr являются источником хрома для образования защитного Cr_2O_3, тогда как нитридные слои CrN обеспечивают более высокую твёрдость и сопротивление износу. В результате многослойная структура работает как комбинированный барьер: внешний окисленный слой снижает доступ кислорода, а внутренние Cr/CrN слои частично сохраняют целостность покрытия после ВТПО.

Устойчивость к высокотемпературному паровому окислению (ВТПО) при 1100 °С.

CrN и Cr/CrN образцы выдерживали в насыщенном водяном паре при 1100 °С в течение 2 ч.

После выдержки на покрытых образцах появляется Cr_2O_3. Масса непокрытого Е110 выросла на +0,380 г. Для покрытых образцов значения ниже: +0,119 г для 2 слоёв, +0,194 г для 4 слоёв и +0,241 г для 6 слоёв.

Для оценки изменения массы все образцы взвешивали до и после ВТПО в одинаковых условиях; приведённые значения Δm использованы как сравнительный показатель интенсивности окисления в выбранной серии. Поскольку для каждой архитектуры в таблице представлено одно итоговое значение Δm, расчёт стандартного отклонения для ВТПО не выполнялся. Поэтому воспроизводимость установленной тенденции дополнительно оценивали по независимым структурным

признакам: фазовому составу после испытаний, СЭМ-морфологии поверхности и EDS-распределению кислорода по поперечному сечению.

Помимо изменения массы учитывали данные XRD после HTSO и распределение кислорода на поперечных сечениях.

Различия в приросте массы между 2-, 4- и 6-слойными покрытиями не следует связывать только с количеством слоёв. На Δm одновременно влияют суммарная толщина покрытия, плотность сформированного слоя, локальные дефекты, соотношение фаз Cr/CrN и особенности образования Cr_2O_3 на внешней поверхности. Наименьшее значение Δm у 2-слойного покрытия показывает меньшую массу продуктов окисления в данной серии, однако данные XRD, СЭМ и EDS свидетельствуют, что 6-слойная архитектура лучше сохраняет внутренние Cr/CrN слои и обеспечивает более стабильное состояние покрытия после воздействия пара.

Таблица 3 – Изменение массы образца до и после испытаний на высокотемпературное паровое окисление (ВТПО)

№	Тип покрытия	m до испыт., г	m после испыт., г	Δm, г
1	Е110 без покрытия	10.875	11.255	+0.380
2	CrN (1 слой)	10.432	10.731	+0.299
3	Cr/CrN (2 слоя)	9.223	9.342	+0.119
4	Cr/CrN (4 слоя)	10.823	11.017	+0.194
5	Cr/CrN (6 слоёв)	11.901	12.142	+0.241
Примечание: относительное увеличение массы рассчитывали по формуле: Δm% = ((mпосле − mдо) / mдо) × 100				

После HTSO у однослойного CrN на XRD присутствуют продукты окисления, а также t-ZrO_2 и m-ZrO_2. Значит, при таком покрытии подложка участвует в окислении.

Для 2-слойного образца фиксируются Cr_2O_3 и слабые линии ZrO_2. У 4- и 6-слойных покрытий линии ZrO_2 слабее; вместе с ними сохраняются отражения CrN и Cr.

На рентгенограмме 6-слойного покрытия после HTSO есть пики Cr_2O_3, а также слабые отражения CrN (111) и Cr (200). Следовательно, после испытания верхняя часть окислена, но часть внутренних Cr/CrN слоёв ещё определяется.

Влияние толщины отдельных слоёв Cr и CrN проявляется через формирование и сохранность защитного оксидного слоя. При одинаковом времени осаждения одного слоя увеличение числа слоёв повышает суммарную толщину покрытия и количество границ раздела. Более развитая Cr-содержащая часть способствует формированию Cr_2O_3, а CrN-слои ограничивают сквозное окисление и повышают механическую устойчивость покрытия. Если суммарная толщина барьера недостаточна, паровая среда быстрее достигает циркониевой подложки, что

сопровождается более заметным образованием ZrO_2. Для 6-слойной архитектуры сочетание большей толщины и чередующихся границ объясняет сохранение слабых отражений CrN и Cr после испытания.

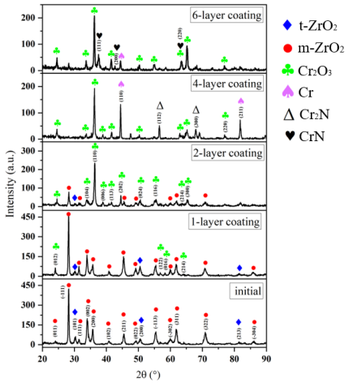


Рисунок 9 – Рентгенодифракционные картины исходного образца E110 и покрытий Cr/CrN с различной многослойной архитектурой (1-, 2-, 4- и 6-слойные) после испытаний на высокотемпературное паровое окисление при 1100 °C

СЭМ поверхности после HTSO представлена на рис. 10. У непокрытого E110 заметны грубый рельеф и микротрещины. У покрытых образцов поверхность повреждена меньше. Среди них 6-слойный вариант имеет наиболее ровный вид после испытания.

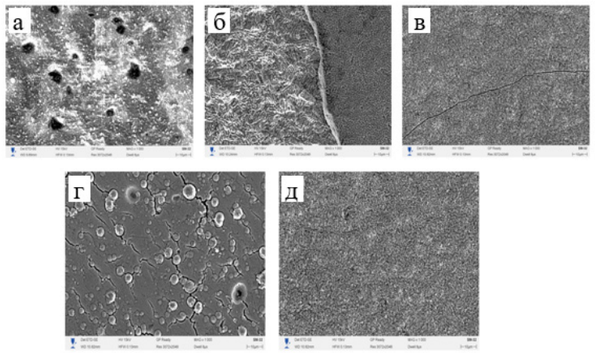
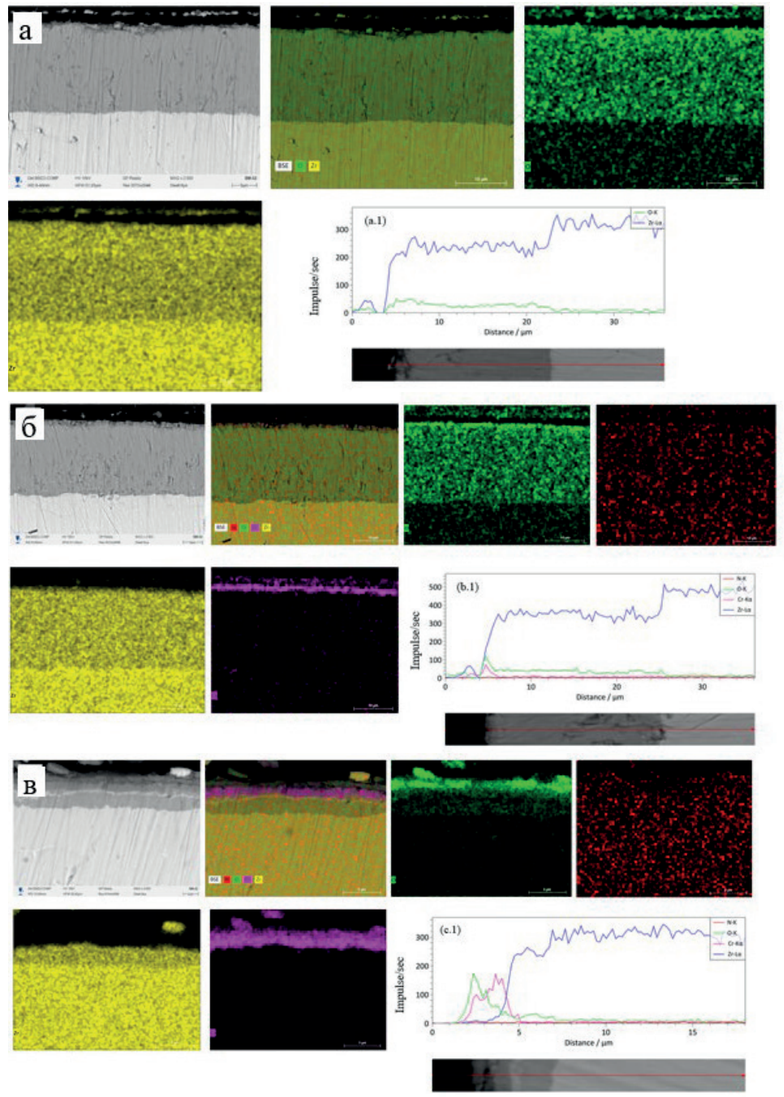


Рисунок 10 – Морфология поверхности образца без покрытия (а) и с покрытиями Cr/CrN различной многослойной архитектуры – однослойным (б), двухслойным (в), четырехслойным (г) и шестислойным (д) – после испытаний на высокотемпературное паровое окисление при 1100 °C в течение 2 часов

На EDS-картах 6-слойного образца кислород расположен в основном у внешней поверхности. Сигнал Zr появляется преимущественно в подложке. Между верхним окисленным слоем и сплавом E110 сохраняется промежуточная зона покрытия.



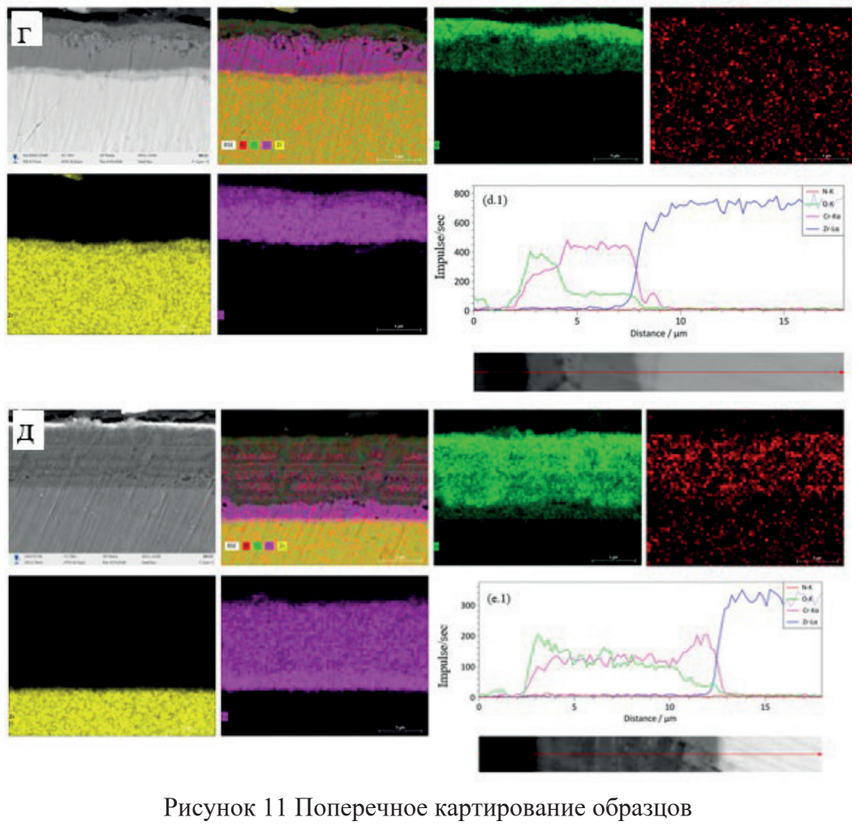


Рисунок 11 Поперечное картирование образцов
(а) без покрытия и (б-д) с многослойным покрытием Cr/CrN после высокотемпературного парового окисления, а также линейный профиль EDS (б.1, в.1, г.1, д.1) по толщине покрытия и (а.1) без покрытия.

Сравнение XRD и EDS после ВТПО показывает: у 6-слойного Cr/CrN слоя лучше сохраняется исходная послойность. Наружный слой Cr_2O_3 образуется первым, а внутренние CrN/Cr слои остаются частично различимыми.

Выводы

На пластины E110 нанесены однослойные CrN и многослойные Cr/CrN покрытия. Сравнивались три расхода Ar/N_2 для CrN и три варианта архитектуры Cr/CrN: 2, 4 и 6 слоёв.

Для однослойного CrN выбран режим Ar/N_2 = 80/40 ст.см³/мин. В этом образце отмечена кубическая фаза CrN (Fm–3m), а шероховатость составила Ra = 0,114±0,006 мкм.

При увеличении числа слоёв от 2 до 6 выросли толщина и твёрдость. Для 6-слойного Cr/CrN получены H = 5,00±0,27 ГПа, E = 110±4 ГПа и скорость износа $2{,}26\times10^{-4}$ мм³ ·Н$^{-1}$ ·м$^{-1}$.

После выдержки в паре при 1100 °C на покрытиях сформировался Cr_2O_3. В однослойном CrN дополнительно появились t-ZrO_2 и m-ZrO_2. В 6-слойном покрытии после испытания сохранялись слабые отражения CrN и Cr.

По данным XRD, СЭМ и EDS-картирования 6-слойный Cr/CrN образец сохранился лучше остальных исследованных покрытий.

Таким образом, результаты показывают, что многослойная Cr/CrN архитектура может быть использована как основа для разработки защитных покрытий циркониевых оболочек ТВЭЛ, поскольку она сочетает повышенную твёрдость, низкую скорость износа и частичную сохранность внутренних слоёв после воздействия водяного пара при 1100 °C.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ji, P.F. et al.** Effect of laser surface re-melting on the microstructure and properties of Zr alloy // Materials Letters. – 2020. – Vol. 264. – P. 127352. – https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127352

2 **Duan, Z. et al.** Current status of materials development of nuclear fuel cladding tubes for light water reactors // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Vol. 316. – P. 131–150. – https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.031

3 **Li, Z. et al.** Microstructure, high-temperature corrosion and steam oxidation properties of Cr/CrN multilayer coatings prepared by magnetron sputtering // Corrosion Science. – 2021. – Vol. 191. – P. 109755. – https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109755

4 **Kim, H.G. et al.** A study of the breakaway oxidation behavior of zirconium cladding materials // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 418. – № 1–3. – P. 186–197. – https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.06.039

5 **Yang, J. et al.** Review on chromium coated zirconium alloy accident tolerant fuel cladding // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 895. – P. 162450. – https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162450

6 **Krejčí, J. et al.** Development and testing of multicomponent fuel cladding with enhanced accidental performance // Nuclear Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 52. – № 3. – P. 597–609. – https://doi.org/10.1016/j.net.2019.08.015

7 **Fazi, A. et al.** CrN–NbN nanolayered coatings for enhanced accident tolerant fuels in BWR // Journal of Nuclear Materials. – 2023. – Vol. 586. – P. 154681. – https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154681

8 **Meng, C. et al.** Study of the oxidation behavior of CrN coating on Zr alloy in air // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 515. – P. 354–369. – https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.01.006

9 **Tang, C. et al.** Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings // Corrosion Reviews. – 2017. – Vol. 35. – № 3. – P. 141–165. – https://doi.org/10.1515/corrrev-2017-0010

10 **Ševeček, M. et al.** Development of Cr cold spray–coated fuel cladding with enhanced accident tolerance // Nuclear Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 50. – № 2. – P. 229–236. – https://doi.org/10.1016/j.net.2017.12.011

11 **Han, X. et al.** An interesting oxidation phenomenon of Cr coatings on Zry-4 substrates in high temperature steam environment // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 156. – P. 117–124. – https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.017

12 **Liu, J. et al.** Oxidation behavior, thermal stability, and the coating/substrate interface evolution of CrN-coated Zircaloy under high-temperature steam // Corrosion Science. – 2021. – Vol. 185. – P. 109416. – https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109416

13 **Kim, H.G. et al.** Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 465. – P. 531–539. – https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.06.030

Поступило в редакцию 03.03.26.
Поступило с исправлениями 21.05.26.
Принято в печать 22.07.26.

Б. К. Рахадилов[1], Н. Муктанова[2], *Э. К. Ахметова[3], Н. М. Магазов[4]
[1,2,3]«PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2,3]Материалтану және металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
03.03.26 ж. баспаға түсті.
21.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

РЕАКТИВТІ МАГНЕТРОНДЫ БҮШІРУ ӘДІСІ БОЙЫНША ӨНДІРІЛГЕН Е110 СУБСТРАТЫНДАҒЫ БІР ҚАТЫМТЫ CRN ЖӘНЕ КӨП ҚАТТЫ CR/CRN ЖАБЫНУЛАРЫН ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ ФУНКЦИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Жұмыстың мақсаты Е110 цирконий қорытпасының бетінде бір қабатты CrN және көп қабатты Cr/CrN жабындарын алу, сондай-ақ тұндыру кезіндегі газдық режим мен көп қабатты архитектураның құрылымдық күйге, механикалық-трибологиялық қасиеттерге және жоғары температуралы бу тотығуына төзімділікке әсерін бағалау болды. Жабындар хром нысанасын реактивті магнетронды тозаңдату арқылы алынды. Бір қабатты CrN үшін Ar/N_2 = 90/30, 85/35 және 80/40 ст.см³/мин режимдері қолданылды. Cr/CrN жүйесінде 2, 4 және 6 қабатты үлгілер дайындалды. Үлгілер СЭМ/EDS, XRD, GDOES, наноинденттеу, АСМ және үйкеліс сынақтары арқылы зерттелді; бу ортасындағы сынақ 1100 °С температурада 2 сағат жүргізілді. Ar/N_2 = 80/40 ст.см³/мин кезінде CrN қабатының кедір-бұдырлығы Ra = 0,114±0,006 мкм болды және XRD-де кубтық CrN сызықтары анық көрінді. 6 қабатты Cr/CrN үлгісінде қалыңдық шамамен 4,18 мкм-ге жетті, H = 5,00±0,27 ГПа, E=110±4ГПа, алтозужылдамдығы 2,26×10⁻⁴мм³·Н⁻¹·м⁻¹болды. Бутотығуынан кейін бетте Cr_2O_3 түзілді, ал 6 қабатты жабында CrN және Cr әлсіз сызықтары сақталды, бұл ішкі қабаттардың ішінара сақталғанын көрсетеді. Зерттеудің практикалық маңыздылығы Cr/CrN көп қабатты архитектурасын апаттық жұмыс режимдеріне төзімді жаңа буын ТВЭЛ қабықшаларына арналған қорғаныш тосқауыл жабын ретінде қолдану мүмкіндігін негіздеумен байланысты.

Кілтті сөздер: Е110 цирконий қорытпасы, Cr/CrN жабындары, магнетронды шашыраңқылық, жоғары температуралы бу тотығуы, көп қабатты құрылым, апатқа төзімді отын.

B. K. Rakhadilov[1], N. Muktanova[2], *E. K. Akhmetova[3], N. M. Magazov[4]
[1,2,3]LLP «PlasmaScience», Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2,3]Institute of Materials Science and Metallurgy,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[4]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 03.03.26.
Received in revised form 21.05.26.
Accepted for publication 22.07.26.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF MONOLAYER CRN AND MULTILAYER CR/CRN COATINGS ON E110 SUBSTRATE DEPOSITED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING

The aim of this work was to deposit monolayer CrN and multilayer Cr/CrN coatings on E110 zirconium alloy and to evaluate the effect of the deposition gas flow and multilayer architecture on their structural state, mechanical and tribological properties, and resistance to high-temperature steam oxidation. The coatings were prepared by reactive magnetron sputtering of a chromium target. For the single CrN layer, Ar/N_2 gas flow ratios of 90/30, 85/35 and 80/40 sccm were tested. The multilayer Cr/CrN samples contained 2, 4 and 6 alternating layers. The samples were examined by SEM/EDS, XRD, GDOES, nanoindentation, AFM and ball-on-disc testing; steam oxidation was carried out at 1100 °C for 2 h. The CrN layer deposited at Ar/N_2 = 80/40 sccm showed the lowest roughness, Ra = 0.114±0.006 μm, and clear cubic CrN reflections in the XRD pattern. In the Cr/CrN series, the coating thickness increased with the number of layers and reached about 4.18 μm for the 6-layer sample. This coating showed H = 5.00±0.27 GPa, E = 110±4 GPa and a wear rate of 2.26×10⁻⁴ mm³·N⁻¹·m⁻¹. After steam exposure, Cr_2O_3 was detected on the coating surface, while weak CrN and Cr reflections remained in the 6-layer coating, indicating partial preservation of the internal layers. The practical significance of the study is the substantiation of multilayer Cr/CrN architecture as a promising protective barrier coating for next-generation zirconium fuel claddings under accident-tolerant fuel conditions.

Keywords: zirconium alloy E110, Cr/CrN coatings, magnetron sputtering, high-temperature steam oxidation, multilayer structure, accident tolerant fuel.

SRSTI 53.39.01

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/422-434

***A. V. Revutskiy[1], B. V. Syrnev[2], V. Yu. Lopatin[3]**

[1,2]D. Serikbayev EKTU, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

[3]National University of Science and Technology MISIS, Russian Federation, Moscow.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3321-135X

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3085-3341

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

*e-mail: vutskiyAV@mail.ru

DEVELOPMENT OF A FLEXIBLE TECHNOLOGICAL REGULATION FOR QUALITY CONTROL OF HOT-PRESSED BERYLLIUM

This paper presents the results of statistical studies on the quality stabilization of beryllium semi-finished products obtained by vacuum hot pressing. The quality of hot-pressed products, as regulated by technical specifications, is primarily characterized by impurity content and physical-mechanical properties. The main unstable parameter is the ultimate tensile strength. The article examines the causes of instability in the strength characteristics of technical-grade beryllium produced by powder metallurgy under industrial manufacturing conditions. Correlation analysis revealed the primary factors determining the quality of beryllium in terms of its mechanical properties. It is shown that the silicon impurity exerts a softening effect on hot-pressed beryllium. An increase in silicon content from 0.01–0.02 % to 0.02–0.03 % leads to a decrease in average tensile strength values from 377 to 357 MPa and increases the rejection rate from 6 % to 40 %. The authors propose a mathematical model for predicting the strength properties of sintered beryllium, derived through regression analysis, which accounts for the combined influence of the chemical and physical characteristics of the powders, as well as the consolidation parameters. The model enables the determination of optimal pressing parameters, ensuring stable quality of the finished products and, consequently, a reduction in the production rejection rate.

Keywords: Technical-grade beryllium, powder metallurgy, vacuum hot pressing, tensile strength, correlation and regression analysis.

Introduction

Beryllium is a unique structural material that combines a high modulus of elasticity, low density, and excellent nuclear-physical characteristics. This suite of properties makes it commercially and strategically indispensable in the production of aerospace engineering components, precision navigation systems, and neutron reflectors for nuclear power engineering. The primary industrial method for obtaining isotropic technical-grade beryllium is powder metallurgy, specifically vacuum hot pressing (VHP) [1; 2]. Despite long-standing industrial experience with this technology, the instability of the mechanical properties of sintered beryllium remains an urgent scientific and technical challenge. Under conditions of mass production of TGP-56 grade billets, following the

transition to a dry ingot comminution scheme, a significant scatter in strength indicators was observed, with the rejection rate (values below the established lower tensile strength limit of 350 MPa) occasionally reaching substantial levels [3]. Traditionally, quality control has focused primarily on the content of chemical impurities in the metal. However, industrial experience has demonstrated that even when the impurity composition fully complied with regulatory requirements, the strength characteristics of the billets remained unstable [4; 5]. The degradation of the strength properties of beryllium during powder consolidation is attributed to numerous factors, primarily the ratio of strengthening to softening impurities, as well as the dispersion characteristics of the starting powders. These factors determine the conditions under which the micro- and nanostructure of sintered beryllium is formed (including grain size and the morphology of the strengthening oxide phase localized at the grain boundaries) [6]. In addition, the process of structure and property formation in sintered beryllium depends on a complex set of technological regulations: the temperature-time parameters of pressing and the geometric dimensions of the billets being compacted. The lack of scientifically grounded algorithms for optimizing pressing parameters often led to the empirical selection of technological regimes, which failed to ensure the stability of the physical-mechanical properties of the finished products [7].

The aim of this work was to identify the key destabilizing factors in the vacuum hot pressing process and to develop scientific and technical recommendations aimed at stabilizing and increasing the strength properties of technical-grade beryllium.

Materials and methods

All Characterization of starting materials. All experiments were conducted at the beryllium production facility. Industrial batches of PTB-56 grade technical-grade beryllium powders, obtained by mechanical grinding (disc attrition) of technical-grade beryllium ingots, were used as the starting material. Quality control of the starting powders included the determination of the following physicochemical and structural parameters:

Chemical (impurity) composition: The concentration of key impurity elements (Si, Fe, Al, O, Ni, Cr, Cu, Mg, Mn) was determined using chemical-analytical and spectral analysis methods in accordance with the requirements of MVI 0306 385-2000 (carbon) on a LECO CS-400 series gas analyzer; MVI 0306 386-2000 (Al, Fe, Si, Mn, Mg, Cu, Ni, Pb, Cr) on a Perkin Elmer Elan 9000 ICP/MS inductively coupled plasma mass spectrometer; and MVI 0306 384-2004 (oxygen) on a LECO TC-436 series gas analyzer.

Granulometric composition and powder dispersion were determined using the following methods:

– Sedimentation analysis of the powders, with separation into fractions (<5 μm, 5–10 μm, 10–20 μm, 20–30 μm, 30–40 μm, 40–60 μm), was carried out in accordance with the requirements of MVI 0306 429-2002 «Metallic Beryllium» using an FSH-6 photometric sedimentometer.

– Additionally, the weight-average particle diameter ($d_{avg.wt}$) and the specific surface area of the powder, measured by gas chromatography (via thermal desorption of nitrogen)

on a «Sorbi®-M» automated instrument for measuring specific surface area using the multi-point BET method, were recorded.

Vacuum hot pressing. The consolidation of powder compacts was carried out by vacuum hot pressing (VHP). At the preliminary preparation stage, cold isostatic pressing (CIP) of the powders was performed in flexible molds under pressures up to 2000 bar. The VHP process was implemented in industrial vacuum resistance furnaces using high-strength graphite tooling (molds). During the experiments and the analysis of pilot-industrial batches, the process parameters were varied. The operating temperature (T_{press}) was varied in the range of 1020–1080 °C. The specific pressing pressure (P) was set within the range of 2.5 to 4.0 MPa (25–40 bar), depending on the diameter of the graphite dies used.

The role of the scale-geometric factor of the billets during the pressing of various standard sizes was investigated:

– Small billets: diameter Ø210 mm, pressure 2.5 MPa, height-to-diameter ratio (H/D) in the range of 2.4–3.2;

– Medium billets: diameter Ø300 mm, pressure 4.0 MPa, H/D ratio in the range of 2.3–2.7;

– Large billets: diameter Ø460 mm, pressure 2.5 MPa, H/D ratio in the range of 1.4–2.0.

The duration of isothermal holding (t)—the total time the billet remained under pressure at the operating temperature (until the completion of shrinkage)—was varied in the range of 5 to 50 hours.

Testing methods. To evaluate the quality of the pressed beryllium, specimens for mechanical testing were cut from various sections of the obtained billets (along the height and radius) in accordance with GOST 1497-84. The mechanical properties were determined via tensile testing at room temperature in accordance with standard procedures. The lower quality compliance limit according to the technical specifications (TS) was 350 MPa; values below this level were classified as technological rejection [8].

Statistical data processing and mathematical modeling. To identify regularities and minimize the influence of random factors in the production process, a set of mathematical statistics methods was applied:

Comparative and group analysis: Production batches of beryllium were differentiated into representative groups based on geometric characteristics and impurity levels to subsequently evaluate the occurrence frequency of defects.

Correlation and regression analysis: Mathematical processing of production statistics over several years was performed to construct multiple linear and non-linear regression equations. Standard MS Excel functions were used as the analysis tool. The impurity concentrations, dispersion parameters, and pressing temperature served as independent variables, while the ultimate tensile strength of the consolidated metal acted as the response function (Y).

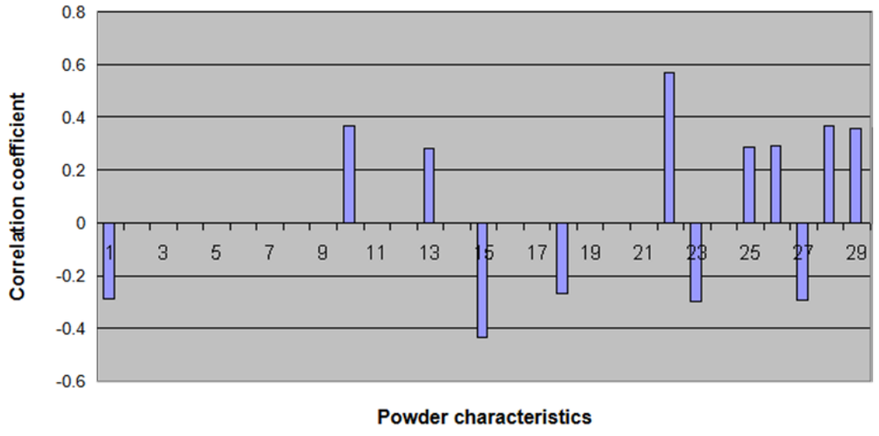
Evaluation of adequacy and convergence of the developed predictive models (Y_1, Y_2, Y_3) was carried out by comparing the calculated strength values with the actual results of acceptance-delivery tests.

Results and discussion

After obtaining the billets, the first stage involved conducting a correlation analysis to identify the factors determining the strength level of the hot-pressed products.

Correlation coefficients were calculated between the impurity content, particle size distribution, and the ultimate tensile strength of the sintered beryllium. The obtained results are presented as histograms. To construct the histograms, only significant correlation coefficients were taken into account, the absolute values of which exceeded the critical value of 0.32.

Figure 1 shows the correlation coefficients with the ultimate tensile strength for billets with a diameter of 210 mm. Analysis of the diagram indicated that the following factors exerted a negative influence: silicon content (1), content of the 30–40 μm fraction (15), mean particle size (18), Al+Si content (23), and the content of the fraction greater than 20 μm (27). Conversely, the following factors exerted a positive influence: specific surface area (10), content of fine fractions of 10–20 μm (13), content of fine fractions of 5–20 μm (15), yield strength (22), O / (Al+Si) ratio (25), content of fractions less than 20 μm (26), specific surface area to Al+Si ratio (28), and specific surface area to Al ratio (29).



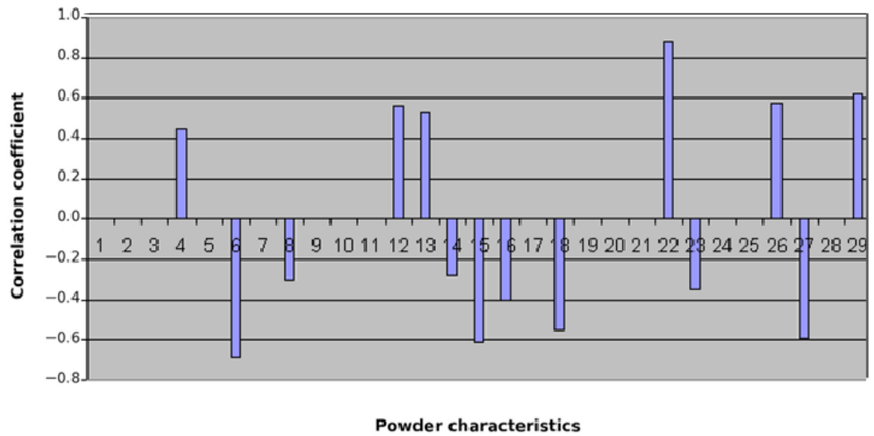
Powder characteristics: 1-Si, 2-Mn, 3-Fe, 4-Mg, 5-Ni, 6-Al, 7-O, 8-Cr, 9-Ti, 10-S.S.A. (specific surface area), 11-fraction <5 μm, 12-fraction 5–10 μm, 13-fraction 10–20 μm, 14-fraction 20–30 μm, 15-fraction 30–40 μm, 16-fraction 40–60 μm, 17-fraction >60 μm, 18-mean particle size, 22-Y.S. (yield strength), 23-Al+Si content, 24-Al/Si, 25-O/(Al+Si), 26-fraction <20 μm, 27-fraction >20 μm, 28-S.S.A./(Al+Si), 29-S.S.A./Al

Figure 1 – Correlation between ultimate tensile strength and the characteristics of the starting beryllium powder for billets with a diameter of 210 mm

Figure 2 shows the correlation coefficients with ultimate tensile strength for billets with a diameter of 460 mm. Analysis of the diagram indicated that the following factors

exerted a negative influence: Al content (6), content of the 30–40 μm fraction (15), mean particle size (18), and content of the fraction greater than 20 μm (27). Conversely, the following factors exerted a positive influence: content of fine fractions of 5–20 μm (15), and the ratio of specific surface area to Al content (29).

It is noteworthy that the strength of the statistical correlation changes significantly for billets of different diameters. The influence of powder characteristics on quality is variable and depends on the billet dimensions [9].



Powder characteristics: 1-Si, 2-Mn, 3-Fe, 4-Mg, 5-Ni, 6-Al, 7-O, 8-Cr, 9-Ti, 10-S.S.A. (specific surface area), 11-fraction <5 μm, 12-fraction 5–10 μm, 13-fraction 10–20 μm, 14-fraction 20–30 μm, 15-fraction 30–40 μm, 16-fraction 40–60 μm, 17-fraction >60 μm, 18-mean particle size, 22-Y.S. (yield strength), 23-Al+Si content, 24-Al/Si, 25-O/(Al+Si), 26-fraction <20 μm, 27-fraction >20 μm, 28-S.S.A./(Al+Si), 29-S.S.A./Al.

Figure 2 – Correlation between ultimate tensile strength and the characteristics of the starting beryllium powder for billets with a diameter of 460 mm

Thus, it follows from the correlation analysis that for both diameters, the correlation of the strength properties of the billets is most stable with the particle size distribution parameters:

– «Positive»: the fraction of the «<20 μm» size range (k = 0.25 to 0.57), and the «Specific surface area/Al» ratio (k = 0.36 to 0.62).

– «Negative»: the fractions of the «>20 μm» size range (k = -0.25 to -0.59), and the «30–40 μm» fraction (r = -0.43 to -0.61).

At the second stage, the role of technological factors and the influence of the most significant impurities were evaluated:

A comparative statistical analysis was conducted on the quality of HP billets depending on the height-to-diameter ratio (H/D) and the silicon content. For this purpose, the batches of hot-pressed products compacted at identical pressures of approximately

25 bar (460 mm and 210 mm diameter billets) were divided into groups differing in their height-to-diameter ratio (Table 1):

Group 1 – batches with an H/D ratio of 1.4–2.0,

Group 2 – batches with an H/D ratio of 2.4–3.2.

Table 1 – Ultimate tensile strength and rejection rate of HP billets depending on the height-to-diameter ratio of CIP compacts

Group №	H/D ratio	Si content, %	Ultimate tensile strength, MPa	Rejection rate, %
1	1.4 - 2.1	0.01-0.02	370	6
		0.02-0.03	350	40
2	2.4 - 3.2	0.01-0.02	364,5	12
		0.02-0.03	351	32

From the analysis of the results, it follows that the silicon impurity exerts a softening effect on hot-pressed beryllium of all studied dimensions. An increase in the silicon content from 0.01–0.02% to 0.02–0.03% leads to a decrease in the average values of ultimate tensile strength from 377 to 357 MPa (i.e., by 20 MPa) and increases the rejection rate from 6–12% to 32–40%. Thus, increasing the height-to-diameter ratio of the CIP compacts from 1.4–2.0 to 2.4–3.2 (see Table 1), which leads to an increase in pressing time, causes a decrease in ultimate tensile strength and an increase in the rejection rate from 6% to 12% (at a Si content of less than 0.02%). At elevated silicon contents (greater than 0.02%), the strength decreases to 357 MPa and is practically independent of the H/D ratio, while the rejection rate of the HP billets reached 30–40%. Furthermore, it was established that at short pressing times (up to 15 hours), the role of silicon dominates as a factor that reduces strength (Figure 3).

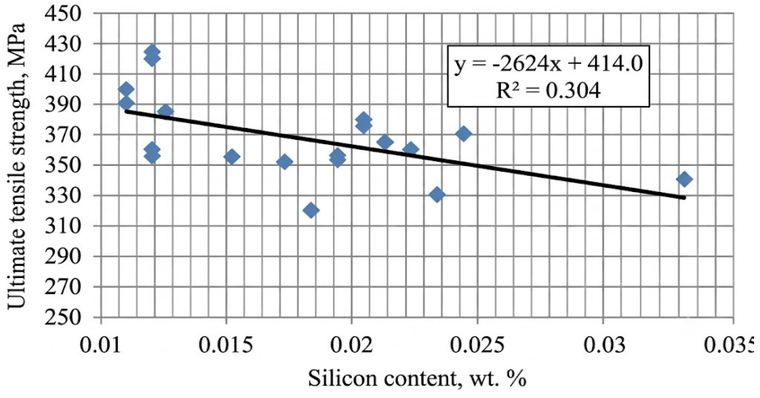


Figure 3 – Ultimate tensile strength of HP billets as a function of silicon content for pressing times up to 15 hours

At long pressing times (15–50 hours), the Fe/Si ratio acts as a factor that increases strength (Figure 4).

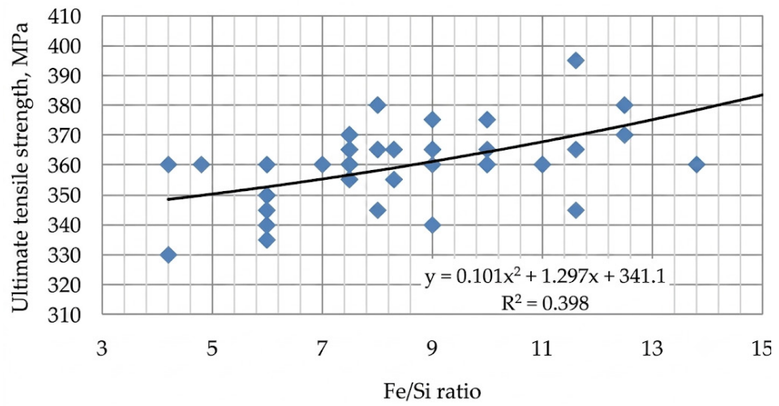


Figure 4 – Ultimate tensile strength of HP billets as a function of the Fe/Si ratio for pressing times of 15–50 hours

This is likely due to the fact that the diffusion processes controlling the binding of silicon by iron into a compound require increased time or temperature [10]. In addition, there is a second factor that plays a significant role in the development of strength properties – namely, the billet dimensions: diameters of 210, 300, and 460 mm (Figure 5).

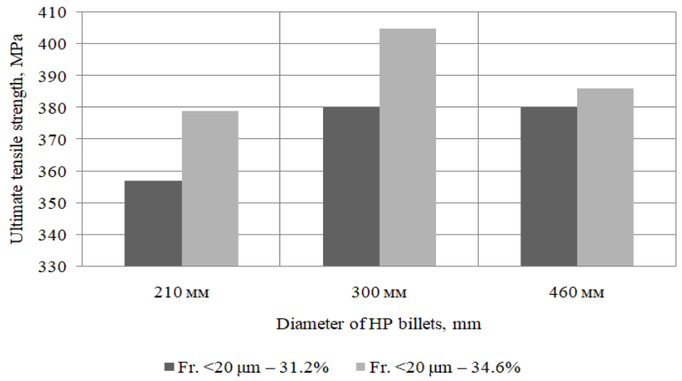


Figure 5 – Ultimate tensile strength as a function of HP billet dimensions and average values of the «<20 μm» fraction content in the powder for the first quarter (31.2 %) and second quarter (34.6 %) of 2026

The obtained dependencies of the ultimate tensile strength of the billets on their dimensions should be attributed to two factors: the pressing pressure, which for the specified sizes (210, 300, and 460 mm) is 2.5, 4.0, and 2.5 MPa, respectively, and the height-to-diameter ratio, which is 2.4–3.2, 2.3–2.7, and 1.4–2.0, respectively. The higher the pressing pressure and the lower the height-to-diameter ratio of the billet, the shorter the pressing time, thereby minimizing grain growth that leads to softening. Thus, the development of the strength properties of sintered beryllium depends on a variety of significant factors. However, it must be acknowledged that the established graphical-analytical relationships exhibit a low correlation coefficient of 0.3–0.4. Therefore, to predict these strength properties, a mathematical model is required that accounts for the complex, combined influence of the factors under consideration.

In the third stage of the study, a regression analysis of billet quality was performed using datasets collected over a three-year period. As a result of the regression analysis of the 1-, 2-, and 3-year datasets, mathematical models were developed to predict strength properties and determine the hot-pressing temperature. A comparative evaluation of the effectiveness of the obtained regression equations was then carried out (Table 2 and Figure 6).

Table 2 – Coefficients of the regression equations

Parameters	Model index		
	Y_1	Y_2	Y_3
Y-intercept	-922,693	59,21425	168,3146956
Si	109,5072	-95,2947	-30,29688078
Fe	-0,84354	0	1,583720956
Ni	-323,745	0	-176,6352449
Al	-149,297	-239,599	29,96413307
O	-4,68724	0	-7,62988002
Cr	-96,0207	0	-26,70989512
Sum of Cu, Mg, Mn, and Ni impurities	0	-62,0901	0
Specific surface area	3,28162	0	4,715351171
<5	8,663736	0	-2,53067504
5-10	9,246835	0	-0,306431294
10-20	6,584155	0	-1,227478523
20-30	5,264359	0	-0,595695943
30-40	3,200891	0	-0,214987575
40-60	-0,80564	0	-0,798045061
d_{wav}	19,58549	-0,08136	-1,721500394
T_{press}	-0,00363	-0,01001	0,001692186

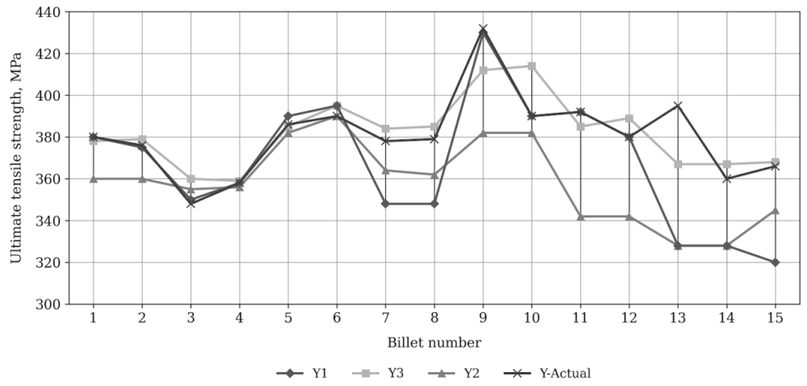


Figure 6 – Actual and predicted strength values

The model Y_3 demonstrates the highest convergence of results with the actual data. The sufficiently high convergence between the strength predicted by the equation Y3 and the actual strength provides a solid basis for recommending it for testing and for determining the pressing temperature.

Thus, the complete regression equation for the Y_3 model (1) is as follows:

$$\sigma_B = 168{,}315 - 30{,}297 \cdot Si + 1{,}584 \cdot Fe - 176{,}635 \cdot Ni + 29{,}964 \cdot Al - 7{,}630 \cdot O - 26{,}710 \cdot Cr + 4{,}715 \cdot S_{SSA} - 2{,}531 \cdot w_{<5} - 0{,}306 \cdot w_{5-10} - 1{,}227 \cdot w_{10-20} - 0{,}596 \cdot w_{20-30} - 0{,}215 \cdot w_{30-40} - 0{,}798 \cdot w_{40-60} - 1{,}722 \cdot d_{wav} + 0{,}0017 \cdot T_{Press} \quad (1)$$

Where:

σ_B – predicted ultimate tensile strength, MPa;

Si, Fe, Ni, Al, O, Cr – content of the respective elements in the powder, wt. %;

S_{SSA} – specific surface area of the powder, m2/g;

$w_{<5}$, w_{5-10},…, w_{40-60} – mass fraction content of the respective powder sizes, %;

d_{wav} – weight-average particle diameter of the powder, μm;

T_{Press} – hot-pressing temperature, °C.

In order to use the obtained model for production-line engineering calculations, we rearrange the equation to solve for the pressing temperature as the target variable. This will allow for the calculation of the required temperature necessary to achieve the target ultimate tensile strength:

$$T_{press} = 590{,}94 \cdot \sigma_B + 17904 \cdot Si - 936 \cdot Fe + 104383 \cdot Ni - 17707 \cdot Al + 4509 \cdot O + 15784 \cdot Cr - 2786 \cdot S_{уд} + 1496 \cdot w_{<5} + 181 \cdot w_{5-10} + 725 \cdot w_{10-20} + 352 \cdot w_{20-30} + 127 \cdot w_{30-40} + 472 \cdot w_{40-60} + 1017 \cdot d_{wav} - 99466.$$

To evaluate the adequacy of the Y_3 model, a comparison was made between the calculated strength values and the actual acceptance test data for 15 industrial batches (Figure 6). The average relative prediction error was 4.2 %, with the maximum deviation

not exceeding 7 %. This confirms the model's representativeness for series production conditions, where properties are affected by a significant number of random factors.

The softening effect of silicon identified in this work is explained by the formation of low-melting eutectics at grain boundaries, which aligns with the theoretical results of Zhu et al. [5], pointing to the tendency of Si impurities toward segregation and the reduction of grain boundary cohesive energy. In contrast to the work of He et al. [2], which focused on microstructural evolution during deformation, our study demonstrates that under static hot-pressing conditions, the governing factor is not only the grain size but also the morphology of the secondary phases.

Conclusion

As a result of the conducted research, the correlation coefficients between the impurity content, particle size distribution, and the ultimate tensile strength of sintered beryllium were calculated. It was established that for both diameters, the particle size distribution metrics have a «positive» effect on the strength properties of the billets: the fraction share of «<20 μm» (k = 0.25 – 0.57) and the «Specific surface area/Al» ratio (k = 0.36 – 0.62). Conversely, a «negative» impact is exerted by the fractions «>20 μm» (k = -0.25 to -0.59) and the «30–40 μm» fraction (k = -0.43 to -0.61).

A mathematical model was developed to predict the strength properties of sintered technical-grade beryllium (TGP-56), taking into account the chemical and particle size distribution characteristics of the initial powders as well as the technological process parameters. Equations were obtained to calculate the optimal vacuum hot-pressing temperature for PTB-56 powders, ensuring the production of materials that meet standard specification requirements for mechanical properties.

The proposed flexible process parameters underwent pilot-plant testing at the beryllium production facility. Its implementation reduced the manufacturing scrap rate related to mechanical strength from 20 % to less than 5 %.

Future research will focus on investigating the mechanisms of grain boundary nanostructuring during hot isostatic pressing (HIP) to produce instrument-grade beryllium.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Папиров, И. И., Тихинский, Г. Ф.** Физическое металловедение бериллия. – М. : Атомиздат, 1968. – 450 с.

2 **He, X., Luo, J., Xu, Q., Jiang, C., Bao, Y., Dong, X., Wang, J., Yu, L., Qu, F., Xu, D., Li, J., Zhang, P.** Hot compression behaviors and microstructural evolution of beryllium by vacuum hot pressing // Materials Letters. – 2021. – Vol. 302. – P. 130193. – https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130193

3 **Ревуцкий, А. В., Сырнев, Б. В., Семилуцкая, О. В.** Исследование причин нестабильности промышленного процесса вакуумного горячего прессования порошков бериллия // Вестник КазНИТУ. – 2021. – № 5.

4 **Ревуцкий, А. В., Сырнев, Б. В., Семилуцкая, О. В.** Влияние технологического регламента процесса вакуумного горячего прессования на качество спеченного бериллия // Вестник ВКГТУ имени Д. Серикбаева. – 2020. – № 1(87).

5 **Zhu, Y. et al.** Solution and segregation behaviors of impurity atoms in beryllium by experimental and theoretical investigations // Computational Materials Science. – 2025. – Vol. 258. – P. 114066. – https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114066

6 Савчук, В. В., Сырнев, Б. В., Шахворостов, Ю. В., Туганбаев, Ф. С. Наноструктура границ зерен – важный фактор управления качеством спеченного бериллия // Промышленность Казахстана. – 2005. – № 8.

7 **Сырнев, Б. В., Куленова, Н. А., Лопатин, В. Ю., Ревуцкий, А. В., Семилуцкая, О. В.** Некоторые проблемы и перспективы развития производства бериллиевой продукции // Вестник ВКТУ имени Д. Серикбаева. – 2021. – № 4.

8 **Фридляндер, И. Н., Яценко, К. П., Терентьев, В. Ф. и др.** Бериллий – материал современной техники. – М. : Металлургия, 1992. – 128 с.

9 **Сырнев, Б. В. и др.** Дисперсионное упрочнение изостатически прессованного бериллия // Материаловедение. – 2000. – № 12.

10 **Revutsky, A. V., Syrnev, B. V., Lopatin, V. Yu., Semilutskaya, O. V., Segeda, T. A.** Research of reinforcement phase formation on the borders of sintered beryllium grains // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021. – № 1.

REFERENCES

1 **Papiroff, I. I., Tikhinsky, G. F.** Fizicheskoe metallovedenie berilliya [Physical metallurgy of beryllium]. – Moscow : Atomizdat, 1968. – 450 p.

2 **He, X., Luo, J., Xu, Q., Jiang, C., Bao, Y., Dong, X., Wang, J., Yu, L., Qu, F., Xu, D., Li, J., Zhang, P.** Hot compression behaviors and microstructural evolution of beryllium by vacuum hot pressing // Materials Letters. – 2021. – Vol. 302. – P. 130193. – https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130193

3 **Revutsky, A. V., Syrnev, B. V., Semilutskaya, O. V.** Issledovanie prichin nestabil'nosti promyshlennogo processa vakuumnogo goryachego pressovaniya poroshkov berilliya [Investigation of the causes of instability in the industrial process of vacuum hot pressing of beryllium powders] // Bulletin of KazNRTU. – 2021. – № 5.

4 **Revutsky, A. V., Syrnev, B. V., Semilutskaya, O. V.** Vliyanie tekhnologicheskogo reglamenta processa vakuumnogo goryachego pressovaniya na kachestvo spechennogo berilliya [Effect of the manufacturing execution schedule of the vacuum hot pressing process on the quality of sintered beryllium] // Bulletin of D. Serikbayev EKSTU. – 2020. – № 1(87).

5 **Zhu, Y. et al.** Solution and segregation behaviors of impurity atoms in beryllium by experimental and theoretical investigations // Computational Materials Science. – 2025. – Vol. 258. – P. 114066. – https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114066

6 **Savchuk, V. V., Syrnev, B. V., Shakhvorostov, Yu. V., Tugambaev, F. S.** Nanostruktura granits zeren – vazhnyi faktor upravleniya kachestvom spechennogo berilliya [Grain boundary nanostructure as an important factor in quality control of sintered beryllium] // Industry of Kazakhstan. – 2005. – № 8.

7 **Syrnev, B. V., Kulenova, N. A., Lopatin, V. Yu., Revutsky, A. V., Semilutskaya, O. V.** Nekotorye problemy i perspektivy razvitiya proizvodstva berillievoi produktsii [Some problems and prospects for the development of beryllium production] // Bulletin of D. Serikbayev EKTU. – 2021. – № 4.

8 **Fridlyander, I. N., Yatsenko, K. P., Terent'ev, V. F. et al.** Berillii – material sovremennoi tekhniki [Beryllium as a material of modern engineering]. – Moscow : Metallurgiya, 1992. – 128 p.

9 **Syrnev, B. V. et al.** Dispersionnoe uprochnenie izostaticheski pressovannogo berilliya [Dispersion hardening of isostatically pressed beryllium] // Materials Science. – 2000. – № 12.

10 **Revutsky, A. V., Syrnev, B. V., Lopatin, V. Yu., Semilutskaya, O. V., Segeda, T. A.** Research of reinforcement phase formation on the borders of sintered beryllium grains // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021. – № 1.

Received 22.07.26.
Received in revised form 22.07.26.
Accepted for publication 28.08.26.

А. В. Ревуцкий[1], Б. В. Сырнев[2], В. Ю. Лопатин[3]
[1,2]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]МИСИС» ұлттық зерттеу технологиялық университеті,
Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.
22.07.26 ж. баспаға түсті.
22.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
28.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЫСТЫҚТАЙ ПРЕССТЕЛГЕН БЕРИЛЛИЙДІҢ САПАСЫН БАСҚАРУДЫҢ ИЛГІШ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ РЕГЛАМЕНТІН ӘЗІРЛЕУ

Жұмыста вакуумдық ыстықтай престеу әдісімен алынатын бериллий жартылай фабрикаттарының сапасын тұрақтандыру бойынша статистикалық зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Техникалық шарттармен регламенттелетін ыстықтай престелген өнімнің сапасы, ең алдымен, қоспалардың мөлшерімен және физика-механикалық қасиеттерімен сипатталады. Негізгі тұрақсыз параметр — созылу кезіндегі беріктік шегі. Мақалада өнеркәсіптік өндіріс жағдайында ұнтақты металлургия әдісімен алынатын техникалық бериллийдің беріктік сипаттамаларының тұрақсыздық себептері қарастырылған. Корреляциялық талдау нәтижесінде бериллийдің механикалық қасиеттері бойынша сапасын анықтайтын негізгі факторлар белгіленді. Кремний қоспасы ыстықтай престелген бериллийге беріктікті төмендететін әсер ететіні көрсетілген. Кремний мөлшерінің 0,01–0,02 %-дан 0,02–0,03 %-га дейін артуы беріктік шегінің орташа мәндерінің 377-ден 357 МПа-га дейін төмендеуіне әкеледі және жарамсыз өнім (брак) үлесін 6 %-дан 40 %-га дейін арттырады. Авторлар регрессиялық талдау нәтижесінде шығарылған, ұнтақтардың химиялық және физикалық сипаттамаларының, сондай-ақ консолидация параметрлерінің жиынтық

әсерін ескеретін, күйдірілген бериллийдің беріктік қасиеттерін болжаудың математикалық моделін ұсынды. Модель дайын өнімнің тұрақты сапасын және нәтижесінде өндірістік жарамсыздық деңгейін төмендетуді қамтамасыз ете отырып, престеудің оңтайлы параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: техникалық бериллий, ұнтақты металлургия, вакуумдық ыстықтай престеу, беріктік шегі, корреляциялық-регрессиялық талдау.

А. В. Ревуцкий[1], Б. В. Сырнев[2], В. Ю. Лопатин[3]
[1,2]ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Российская федерация, г. Москва.
Поступило в редакцию 22.07.26.
Поступило с исправлениями 22.07.26.
Принято в печать 28.08.26.

РАЗРАБОТКА ГИБКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННОГО БЕРИЛЛИЯ

В работе представлены результаты статистических исследований по стабилизации качества бериллиевых полуфабрикатов, получаемых методом вакуумного горячего прессования. Качество горячепрессованной продукции, регламентированное техническими условиями, характеризуется, в первую очередь, содержанием примесей и физико-механическими свойствами. Основным нестабильным параметром является предел прочности на растяжение. В статье рассмотрены причины нестабильности прочностных характеристик технического бериллия, получаемого методом порошковой металлургии в условиях промышленного производства. В результате корреляционного анализа установлены основные факторы, определяющие качество бериллия по механическим свойствам. Показано, что примесь кремния оказывают разупрочняющее влияние на горячепрессованный бериллий. Повышение содержания кремния с 0.01-0.02 до 0.02-0.03 % ведет к снижению средних значений предела прочности с 377 до 357 МПа и увеличивает брак с 6 до 40%. Авторами предложена математическая модель прогнозирования прочностных свойств спеченного бериллия, выведенная в результате регрессионного анализа, учитывающая совокупное влияние химических и физических характеристик порошков, а также параметров консолидации. Модель позволяет определять оптимальные параметры прессования, обеспечивая стабильное качество готовой продукции и как следствие снижение уровня производственного брака.

Ключевые слова: технический бериллий, порошковая металлургия, горячее вакуумное прессование, предел прочности, корреляционный регрессионный анализ.

SRSTI 53.41.01
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/435-445

Zh. I. Sagintaeva[1], M. A. Issabayeva[2], Ye .Ye. Kuanyshbekov[3], B. K. Kasenov[4], A. Tozlu[5]
[1,3,4]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[5]Bayburt University, Turkiye, Bayburt.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8655-356X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8119-3865
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9172-9566
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9394-0592
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2610-5279
*e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru

SYNTHESIS, X-RAY DIFFRACTION AND THERMODYNAMICS OF CUPRATE-VANADATE-MANGANITE LABACUVMNO$_{7,5}$

The paper reports the preparation and characterization of the cuprate–vanadate manganite $LaBaCuVMnO_{7,5}$. The compound was obtained by a ceramic solid-state route, after which its phase composition and structural features were examined by X-ray diffraction. Analytical indexing of the diffraction pattern showed that LaBaCuVMnO7.5 is described by a cubic unit cell with the following parameters: a = 14,99 ± 0,02 Å; V0 = 3367,85 ± 0.06 Å^3; Z = 4; V0el.cell = 841,96 ± 1.58 Å^3; $\rho_{x\text{-}ray}$ = 4,46 g/cm^3; $\rho_{пусн.}$ = 4,45 ± 0,007 g/cm^3.

The heat capacity of $LaBaCuVMnO_{7,5}$ was measured on an IT-S-400 calorimeter over the temperature interval 298,15–673 K. Prior to the measurements, the calorimetric system was calibrated through the thermal conductivity of the heat-flow meter using a copper standard and an empty ampoule. For each temperature point, taken at 25 K intervals, five repeated measurements were carried out; the resulting values were averaged and statistically processed. The reliability of the apparatus was additionally checked by measuring the heat capacity of α-Al_2O_3. On the basis of the experimental Cp data, equations for the corresponding temperature intervals were obtained. The Cp(T) curve contains λ-type anomalies, which indicate second-order phase transformations. The thermodynamic functions H°(T) – H°(298,15), S°(T), and Φ^{xx}(T) were calculated for the investigated compound. The obtained results provide a basis for subsequent studies of the electrophysical behavior of $LaBaCuVMnO_{7,5}$ and may be used when assessing its physicochemical characteristics and certifying the laboratory sample.

Keywords: Cuprate-vanadate-manganite, solid-phase synthesis, X-ray diffraction, thermodynamics, heat capacity.

Introduction

During recent decades, transition-metal manganites have remained an important class of oxide materials. Particular attention has been paid to systems with the general composition $La_{1-x}A_xMnO_3$, where A denotes an alkaline-earth divalent cation such as Ca, Ba, or Sr. Variation of the substitution level x over a wide range strongly affects the state of the material and may lead to magnetic, structural, and electronic transformations [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10].

One of the most widely discussed features of manganite materials is colossal magnetoresistance (CMR), which was identified in earlier studies and has since stimulated extensive experimental and theoretical work [1]. In compositions where a ferromagnetic metallic state is formed, the electrical resistance can decrease noticeably under an applied magnetic field. This effect is usually most pronounced near the Curie temperature, and its magnitude in fields of about 1 T may reach tens of percent. The combination of magnetic, transport, and structural phenomena explains the continuing interest in these compounds from both fundamental and applied perspectives [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10].

The purpose of the present study was to obtain the $LaBaCuVMnO_{7,5}$ cuprate–vanadate manganite and to carry out its structural and thermodynamic characterization. The work included determination of the crystal-lattice parameters, analysis of the temperature behavior of heat capacity, and calculation of thermodynamic functions needed to evaluate the physicochemical features of the synthesized compound.

Materials and methods

$LaBaCuVMnO_{7,5}$ was prepared by a ceramic synthesis procedure based on intensive mechanical homogenization of the initial reagents followed by staged heat treatment. This route was selected because it is technologically simple and suitable for obtaining oxide phases with the required stoichiometric composition.

Lanthanum(III), copper(II), vanadium(V), and manganese(III) oxides, together with barium carbonate of analytical-grade purity, were used as starting materials. Before weighing, the reagents were heated at 300 °C in order to remove adsorbed moisture. Stoichiometric portions of the components were then carefully ground in an agate mortar until a homogeneous reaction mixture was formed. The powder was placed into alundum crucibles preliminarily calcined at 600 °C and annealed in a SNOL muffle furnace at 600 °C for 5 h. After cooling to room temperature, the material was reground and mixed. The same sequence of heating, cooling, grinding, and homogenization was continued at 700 °C for 10 h, then at 800 °C for 15 h and 1000 °C for 15 h. At the final stage, after additional grinding, the sample was annealed at 400 °C for 10 h to approach the low-temperature equilibrium state.

The phase composition of the synthesized sample was analyzed on a DRON-2,0 diffractometer using CuKα radiation. The operating parameters were U = 30 kV and I = 10 mA; the counting rate was 100 pulses per second, the time constant was $\tau = 5$ s, and diffraction data were collected within the 2 θ range of 10–90°. Relative peak intensities were estimated using a 100-point scale.

The diffraction pattern was indexed analytically according to the approaches described in [2; 3].

Heat-capacity measurements for the synthesized La–Ba cuprate–vanadate manganite were performed between 298,15 and 673 K using an IT-S-400 calorimeter. The sample was heated monotonically at an average rate of approximately 0.1 K/s. During the experiment, the temperature difference between the sample and the surrounding medium was maintained within 3–30 K, which made it possible to determine the delay time on the heat meter.

In this calorimetric scheme, the temperature gradient is governed by the heat-flow intensity. The measuring system records temperature levels at fixed points with a 25 K step. According to the technical characteristics of the instrument, measurements are limited by a volumetric heat capacity of $Cp = 10 \cdot 106$ J/(K · m^3). The heat meter, functioning as a heat-flow converter, registers the thermal flux, helps equalize the surface temperature of the sample, and permits calibration directly in the thermal block, thereby reducing instrumental errors.

A complete measurement cycle over the studied temperature interval lasted about 2,5 h. The maximum permissible instrumental error stated in the equipment documentation is ±10 % [4].

Calibration was performed by evaluating the thermal conductivity of the Ct heat meter [4; 5]. For this purpose, measurements were first made with a copper reference sample and then with an empty ampoule. At every 25 K temperature step, five replicate experiments were conducted; the obtained values were averaged and treated using standard statistical procedures.

The performance of the calorimeter was checked using α-Al_2O_3 of c.f.a. grade (TU 6,09-426-75). To verify the accuracy of the measurements, the obtained heat-capacity values for α-Al_2O_3 were compared with published data, as shown in Table 1 [6].

Table 1 – Experimental heat-capacity values for α-Al_2O_3 used for calorimeter verification and comparison with reference data [7]

T, K	C_p°(T), J/(mol·K)		T, K	C_p°(T), J/(mol·K)	
	Our data	Data [42]		Our data	Data [42]
300	76,31	79,41	500	105,47	106,1
350	86,49	88,86	550	110,09	109,7
400	94,12	95,21	600	114,29	112,5
450	100,26	101,8	650	118,20	114,9

The comparison presented in Table 1 shows that the measured C_p values for α-Al_2O_3 in the 300–673 K range are consistent with the published values within the accuracy limits of the IT-S-400 calorimeter.

The experimentally obtained heat-capacity values, together with the calculated standard entropy of the synthesized La–Ba cuprate–vanadate manganite, were used to determine the temperature dependences of the thermodynamic functions.

The functions S°(T), H°(T) − H°(298,15), and Φxx(T) were evaluated using equations (1)–(3):

$$H^0(T) - H^0(298{,}15) = \int_{298,15}^{T} C_p^0\, dT \quad (1)$$

$$S^0(T) = S^0(298{,}15) + \int_{298,15}^{T} \frac{C_P}{T} dT \quad (2)$$

$$\Phi^{xx}(T) = S^0(T) - \frac{H^0(T) - H^0(298{,}15)}{T} \quad (3)$$

Equations (1)–(3) make it possible to derive entropy, enthalpy increment, and the reduced thermodynamic potential from the measured heat-capacity data. These parameters are required for describing phase transformations and for interpreting the thermodynamic behavior of the synthesized oxide. The uncertainties of the calculated functions were estimated by taking into account both the average random error of Cp measurements and the uncertainty in the standard entropy value, which was approximately 3 %.

Results and discussion

The results of the diffraction-pattern indexing are summarized in Table 2.

Table 2 – X-ray diffraction data for La–Ba cuprate–vanadate manganite

I/I_o	d/Å	$10^4/d^2_{exp.}$	Hkl	$10^4/d^2_{cal.}$
$LaBaCuVMnO_{7.5}$				
10	4,10	594,88	440	594,88
21	3,90	657,46	531	650,65
100	3,73	718,76	611	706,42
74	2,88	1206	810	1208
64	2,77	1303	653	1301
74	2,75	1322	660	1339
30	2,50	1600	655	1598
I/I_o	d/Å	$10^4/d^2_{exp.}$	Hkl	$10^4/d^2_{cal.}$
28	2,25	1975	950	1971
29	2,15	2163	10.4.0	2156
58	1,94	2657	12.0.0	2677
14	1,72	3380	10.9.0	3365
29	1,59	3955	14.4.1	3960
14	1,40	5102	15.5.5	5112

The indexing results indicate that LaBaCuVMnO7.5 belongs to a cubic crystal system. The calculated structural parameters are as follows: a = 14,99 ± 0,02 Å; V^0 = 3367,85 ± 0,06 Å^3; Z = 4; $V^0_{el.cell}$ = 841,96 ± 1,58Å^3; $\rho_{x\text{-}ray}$ = 4,46 g/cm^3; and $\rho_{pycn.}$ = 4,45 ± 0,007 g/cm^3.

The reliability of the indexing and lattice-parameter determination is supported by the close correspondence between the experimental and calculated 104/d2 values, as well as by the agreement between the X-ray and pycnometric densities. By comparison

with the structural data reported in [7], the synthesized cuprate–vanadate manganite may be assigned to the perovskite-type space group Pm3m.

The Cp(T) dependence shows λ-type features at 373 K and 473 K, which can be related to second-order phase transformations (Table 3). These anomalies may be associated with Schottky-type contributions, changes in charge-transport behavior from semiconducting to metallic, and rearrangements affecting capacitance and dielectric permittivity, including possible ferroelectric transitions near Curie or Néel points [7; 8].

Table 3 – Experimental heat-capacity values for $LaBaCuVMnO_{7.5}$ [$C_p \pm \delta$, J/(K·g); $C_p° \pm \Delta$, J/(mol · K)]

T, K	$C_P \pm \overline{\delta}$	$C_P° \pm \overset{o}{\Delta}$	T, K	$C_P \pm \overline{\delta}$	$C_P° \pm \overset{o}{\Delta}$
298.15	0,4632±0,0055	262±9	498	0,5652±0,0081	320±13
323	0,5797±0,0078	328±12	523	0,5246±0,0110	297±17
348	0,6092±0,0154	345±24	548	0,4872±0,0050	276±8
373	0,6500±0,0063	368±10	573	0,5298±0,0043	300±7
398	0,5941±0,0062	336±10	598	0,5429±0,0044	307±7
423	0,6644±0,0098	376±15	623	0,5753±0,0088	325±14
448	0,6669±0,0124	377±19	648	0,6520±0,0071	369±11
473	0,6727±0,0061	380±10	673	0,6610±0,0076	374±12

As illustrated in Figure 1, the temperature dependence of heat capacity contains λ-shaped deviations typical of second-order phase transitions. The observed behavior may reflect a combination of electronic and structural factors, including Schottky contributions, modification of the conductivity mechanism, and changes in dielectric-related characteristics [7; 8].

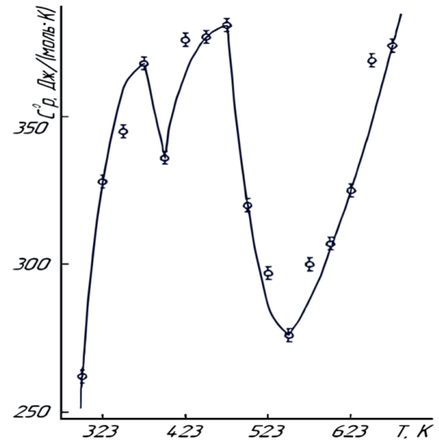


Figure 1 – Heat-capacity temperature dependence for $LaBaCuVMnO_{7,5}$ cuprate–vanadate manganite

Taking into account the detected transition regions, the following equations were obtained to describe the $C_p^\circ = f(T)$ dependences for $LaBaCuVMnO_{7,5}$:

$$C_p^0 = (2488 \pm 92) - (3826{,}0 \pm 141{,}5)10^{-3}T - (963{,}84 \pm \pm 35{,}66)10^5 T^{-2}, (298 - 373К \quad (4)$$

$$C_p^0 = (840 \pm 31) - (1265{,}2 \pm 46{,}8)10^{-3}T, (373 - 398К) \quad (5)$$

$$C_p^0 = (2221 \pm 82) - (2645{,}5 \pm 97{,}9)10^{-3}T - -(1317{,}67 \pm 48{,}75)10^5 T^{-2}, (398 - 473К), (398 - 473К) \quad (6)$$

$$C_p^0 = -(4183 \pm 155) + (5411{,}9 \pm 200{,}2)10^{-3}T + +(4481{,}77 \pm 165{,}81)10^5 T^{-2}, (473 - 548\ К) \quad (7)$$

$$C_p^0 = -(1106 \pm 41) + (1820{,}6 \pm 67{,}4)10^{-3}T + +(1151{,}91 \pm 42{,}62)10^5 T^{-2}, (548 - 673К) \quad (8)$$

The presence of the relatively large Ba^{2+} ion is important for the crystal chemistry of $LaBaCuVMnO_{7,5}$. Substitution by barium can expand the lattice framework and thereby influence the mobility of oxygen vacancies. In addition, the coexistence of manganese and copper ions with variable oxidation states may affect the spin configuration of electrons. These features make the compound potentially relevant for studies related to spin-dependent functional materials.

Table 4 – Temperature dependences of thermodynamic functions for $LaBaCuVMnO_{7,5}$ [Cp°(T), S°(T), Φ_{xx}(T), J/(mol·K); H°(T) − H°(298,15), J/mol]

T, K	C_p°(T)	S°(T)	H°(T)-H°(298,15)	Φ^{xx}(T)
298.15	250±9	292±9	-	292±11
300	269±10	294±20	530±39	292±19
325	331±12	318±21	8115±60	293±20
350	361±13	344±23	16838±1245	296±20
375	367±13	369±25	25995±1923	300±20
400	333±12	391±26	34728±2570	305±20
425	366±13	413±28	43589±3225	310±21
450	379±14	434±29	52950±3918	317±21

475	380±14	455±30	62470±4622	323±22
500	316±12	473±32	70750±5235	331±22
525	285±10	487±33	78211±578	338±23
550	275±10	500±33	85174±6302	345±23
575	289±11	513±34	92240±6825	352±23
600	306±11	525±35	99686±7376	359±24
625	327±12	538±36	107602±7962	366±24
650	350±13	552±37	116065±8588	373±25
675	376±14	565±38	125141±9259	379±25

$LaBaCuVMnO_{7,5}$ should be considered not as a ready-made device material by itself, but as a functional component that may be incorporated into different systems. Depending on its properties, it could be examined as a sensitive layer for sensor structures, as an electrode-related material for fuel-cell applications, or as a magnetic layer in spintronic devices.

Financing information

The research was carried out within program BR23991563, «Creation of innovative resource-saving technologies for the extraction and integrated processing of mineral and man-made raw materials», supported for 2024–2026 by the Committee of Industry of the Ministry of Industry and Construction of the Republic of Kazakhstan.

Conclusions

The study provides new experimental information on the thermodynamic behavior of a complex oxide material. LaBaCuVMnO7,5 was synthesized and characterized by X-ray diffraction, and its heat capacity was measured in the range 298,15–673 K. The obtained data made it possible to identify second-order phase-transition features and to calculate the temperature dependences of the main thermodynamic functions. These results broaden the understanding of La–Ba cuprate–vanadate manganite systems and support further evaluation of their possible functional applications.

REFERENCES

1 **Изюмов, Ю. А., Скрябин, Ю. Н.** Модель двойного обмена и уникальные свойства манганитов [Текст] // Успехи физических наук. – 2001. – № 2. – Т. 171 –С. 121–148.

2 **Ковба, Л. М., Трунов, В. К.** Рентгенофазовый анализ [Текст]. – М. : МГУ, 1976. – 256 с.

3 **Вест, А.** Химия твердого тела [Текст] – М. : Мир, 1988. – Ч. 1. – 588 с.

4 Техническое описание и инструкции по эксплуатации ИТ-С-400 [Текст] – Актюбинск : Актюбинский завод «Эталон», 1986. – 48 с.

5 **Платунов, Е. С.** Теплофизические измерения и приборы [Текст] – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 256 с.

6 **Бодряков, В. Ю.** Корреляционные характеристики температурного коэффициента объемного расширения и теплоемкости корунда [Текст] // Стекло и керамика. – 2015. – № 2. – С. 30.

7 «Новые наноструктурированные оксидные соединения, обладающие полифункциональными свойствами»: отчет о НИР (инв. № 0222РК00127) /ХМИ имени Ж. Абишева; рук., д.х.н., проф. Касенов Б.К. Караганда, 2022. 93с.

8 **Shivakumara, C.** Synthesis, structural and ferromagnetic properties of $La_{1-x}K_xMnO_3$ (0.0 ≤x≤0.25) phases by solution combustion method [Текст] // Bull. Mater. Sci. – 2009. – Vol. 32. – № 4. – P. 443. – https://doi.org/10.1007/s12034-009-0065-1.

9 **Нагаев, Э. Л.** Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитоспоротивлением [Текст] // Успехи физических наук. – 1996. – № 8. – Т. 166 – С. 833–858. – https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199608b.0833

10 **Булатов, А. Р., Богданова, Х. Г., Голенищев-Кутузов, В. А. и др.** Решеточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана $La_{1-x}K_xMnO_3$ (x = 0.125, 0.15, 0.175) [Текст] // Физика твердого тела. −2010. − Т. 52. – вып. 11. – С. 2238–2244.

REFERENCES

1 **Izyumov, Yu. A., Skryabin, Yu. N.** Model dvoinogo obmena i unikalnogo svoistva manganitov [Double exchange model and unique properties of manganites] [Text] // Uspekhi Fizicheskih Nauk. – 2001. – № 2. – Vol. 171 – P. 121–148.

2 **Kovba, L. M., Trunov, V. K.** Rentgenofaznyi analiz [X-ray phase analysis] [Text] – Moscow : Moscow State University, 1976. – 2nd ed. – 256 p.

3 **Vest, A.** Chimia tverdogo tela [Solid state chemistry] [Text] – Moscow : Mir, 1988. – P. 1. – 588 p.

4 Texnicheskoe opisanie i instrukcii po ekspluatacii IT-C-400 [Technical description and operating instructions for IT-S-400] [Text] – Aktobe : Aktobe plant «Etalon», 1986. – 48 p.

5 **Platunov, Ye. S.** Teplofizicheskie izmerenia i pribory [Thermophysical measurements and instruments] [Text] / – Leningrad : Mashinostroenie, 1986. – 256 p.

6 **Bodryakov, V. Yu.** Korreliacionnye charakteristiki temperaturnogo koefficienta obiemnogo rasschirenia i teploemkosti korunda [Correlation characteristics of the temperature coefficient of volumetric expansion and heat capacity of corundum] [Text] // Glass and ceramics. – 2015. – № 2. – P. 30.

7 «Novye nanostrukturirovannye oksidnye soedinenia, obladaiuschie polifunktsionalnymi cvoistvami»: otcheto NIR (inv. № 0222PK00127) [«New nanostructural oxide compounds with polyfunctional properties research report (inv. № 0222PK00127)] [Text] / KhMI named after Zh. Abishev; head, Doctor of Chemical Sciences, prof. Kasenov B. K. Karaganda, 2022. – 93 p.

8 **Shivakumara, C.** Synthesis, structural and ferromagnetic properties of $La_{1-x}K_xMnO_3$ (0.0 ≤x≤0.25) phases by solution combustion method [Текст] // Bull. Mater. Sci. – 2009. – Vol. 32. – № 4. – P. 443. – https://doi.org/10.1007/s12034-009-0065-1.

9 **Nagayev, E. L.** Manganityi lantana i drugie magnitnyie provodniki s gigantskim magnitosoprotivleniem [Lanthanum manganites and other magnetic conductors with giant magnetoresistance] [Text] // Uspekhi Fizicheskih Nauk. – 1996. – № 8. – Vol. 166 – P. 833–858. – https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199608b.0833

10 **Bulatov, A. R., Bogdanova, H. G., Golenischev-Kutuzov, V. A. et al.** Reschetochnyie elektricheskie i magnitnye effekty v manganitach lantana $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ (x = 0.125, 0.15, 0.175) [Lattice, electrical and magnetic effects in manganites $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ (x = 0.125, 0.15, 0.175)] [Text] // Solid state physics. − 2010. − Vol. 52. – № 11. – P. 2238–2244.

Received 30.04.26.
Received in revised form 04.05.26.
Accepted for publication 22.07.26.

Ж. И. Сағынтаева[1], М. А. Исабаева[2], Е. Е. Қуанышбеков[3], Б. Қ. Қасенов[4], А. Тозлу[5]
[1,3,4]Ж.Әбішев атындағы химико-металлургиялық институт, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[2]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[5]Байбурт университеті, Түркия, Байбурт қ.

30.04.26 ж. баспаға түсті.
04.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

LABACUVMNO$_{7,5}$ КУПРАТ-ВАНАДАТ-МАНГАНИТІНІҢ СИНТЕЗІ, РЕНТГЕНОГРАФИЯСЫ ЖӘНЕ ТЕРМОДИНАМИКАСЫ

Мақалада купрат-ванадат-манганит LaBaCuVMnO7,5қосылысының синтезі, рентгенографиялық және термодинамикалық зерттеулерінің нәтижелері ұсынылған. Керамикалық технологияны қолдана отырып, жаңа LaBaCuVMnO7,5купрат-ванадат-манганиті синтезделді. Құрылымдық талдау рентгенофазалық талдау әдісімен жүргізілді. Рентгенограммаларды индицирлеу аналитикалық әдіспен орындалды.

Рентгенограммаларды индицирлеунегізінде купрат-ванадат-манганит келесітор параметрліменкубтық сингонияда кристалданатыны анықталды: $LaBaCuVMnO_{7,5}$ – a=14,99±0,02 Å; V^o=3367,85±0,06 $Å^3$; Z=4; $V_{оял.яч.}$= 841,96±1,58$Å^3$; $\rho_{рент}$.=4,46; $\rho_{пикн}$.=4,45±0,007 г/см3.

ИТ-С-400 сериялық калориметрінде 298,15–673 К аралығында $LaBaCuVMnO_{7,5}$ жылу сыйымдылығының температураға тәуелділігі зерттелді. Құралдың калибрлеуі жылуөлшегіштің жылу өткізгіштігін

анықтау негізінде жүзеге асырылды. Осы мақсатта мыс үлгісімен және бос ампуламен эксперименттер жүргізілді. Әр температурада (25 К сайын) бес параллель тәжірибе орындалып, нәтижелері математикалық статистика әдістерімен орташа есептеліп өңделді. Құрылғы жұмысы α-Al_2O_3-тың жылу сыйымдылығын анықтау арқылы тексерілді. Тәжірибелік деректер негізінде температураға тәуелділікті сипаттайтын теңдеулер анықталды. Зерттелген қосылыстардың жылу сыйымдылықтарының температураға тәуелділіктерінде, II текті фазалық ауысуға қатысты болатын λ-тәрізді аномалиялар анықталды. Есептік әдіспен зерттелген купрат-ванадат манганитінің H°(T)-H°(298,15), S°(T), Ф^{vx}(T) термодинамикалық функцияларының мәндері бағаланды. Зерттеу нәтижелері осы қосылыстың электрфизикалық қасиеттерін әрі қарай зерттеулер үшін, сонымен қатар $LaBaCuVMnO_{7.5}$ затының құнды физика-химиялық қасиеттерін болжауда және осы тәжірибелік үлгіні паспорттаудамаңызды болып табылады.

Кілтті сөздер: Купрат-ванадат-манганит, қатты фазалық синтез, рентгенография, термодинамика, жылу сыйымдылық.

Ж. И. Сағынтаева[1], М. А. Исабаева[2], Е. Е. Қуанышбеков[3], Б. Қ. Қасенов[4], А. Тозлу[5]

[1,3,4]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;

[2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

[5]Байбуртский университет, Турция, г. Байбурт.

Поступило в редакцию 30.04.26.

Поступило с исправлениями 04.05.26.

Принято в печать 22.07.26.

СИНТЕЗ, РЕНТГЕНОГРАФИЯ И ТЕРМОДИНАМИКА КУПРАТО-ВАНАДАТО-МАНГАНИТА LABACUVMNO$_{7,5}$

В данной статье представлены результаты синтеза, рентгенографического и термодинамического исследования соединения купрато-ванадато-манганита $LaBaCuVMnO_{7,5}$. Используя керамический метод, синтезировали новый купрато-ванадато-манганит $LaBaCuVMnO_{7,5}$. Анализ структуры был проведен методом рентгенофазного анализа. Индицирование рентгенограмм проводили аналитическим методом. На основании индицирования рентгенограммы установлено, что купрато-ванадато-манганит кристаллизуется в кубической сингонии со следующими параметрами решетки: $LaBaCuVMnO_{7.5}$ – a=14,99±0,02 Å; Vo=3367,85±0,06 Å^3; Z=4; $V_{оэл.яч.}$=841,96±1,58Å^3; $\rho_{рент.}$=4,46; $\rho_{пикн.}$=4,45±0,007 г/см^3.

На серийном калориметре ИТ-С-400 в интервале 298,15-673 К исследована температурная зависимость теплоемкости $LaBaCuVMnO_{7,5}$ Калибровка прибора осуществлялась на основе определения теплопроводности теплоизмерителя. Для этой цели были проведены эксперименты с медным образцом и пустой ампулой. При каждой температуре (с шагом 25 К) выполнялось пять параллельных экспериментов, результаты которых

обрабатывались методом математической статистики путем вычисления среднего значения. Работу устройства проверяли через определение теплоемкости α-Al_2O_3. На основании опытных данных выведены уравнения, описывающие зависимости от температуры. В температурных зависимостях теплоемкости исследуемых соединений обнаружены λ-образные аномалии, характерные для фазовых переходов II рода. Расчетным методом оценены значения термодинамических функций H°(T)-H°(298,15), S°(T), Ф^{vx} (T) исследуемого купрато-ванадато-манганита. Результаты исследования являются важными для дальнейших исследований электрофизических свойств данного соединения, так же представляют интерес для прогнозирования ценных физико-химических свойств и паспортизации лабораторного опытного образца $LaBaCuVMnO_{7,5}$

Ключевые слова: Купрато-ванадато-манганит, твердофазный синтез, рентгенография, термодинамика, теплоемкость.

ҒТАМР 53.09.91

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/446-459

Р. Б. Султангазиев[1], А. С. Орлов[2], *Қ. М. Титошева[3]

[1,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[2]Ж. Әбішев атындағы химико-металлургиялық институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3928-486X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7563-357X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7837-8667
*e-mail: titosheva@list.ru

ХРОМ-НИКЕЛЬДІ ФЕРРОҚОРЫТПАНЫ МЕТАЛЛОТЕРМИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛДЕУ

Бұл мақалада хром-никельді ферроқорытпаны металлотермиялық әдіспен өндіру технологиясын термодинамикалық модельдеу бойынша жүргізілген зерттеулердің нәтижелері қарастырылған. Зерттеудің негізгі мақсаты – металлотермиялық қалпына келтіру процестерін термодинамикалық тұрғыдан талдау арқылы хром мен никельдің қосылыстарын металдық күйге тиімді айналдырудың оңтайлы шарттарын анықтау.

Металлотермиялық әдіс жоғары температура жағдайында металл оксидтерін белсенді тотықсыздандырғыштар көмегімен қалпына келтіруге негізделеді. Бұл әдіс ферроқорытпалар өндірісінде кеңінен қолданылып, жоғары сапалы және құрамында бағалы компоненттері бар қорытпаларды алуға мүмкіндік береді. Термодинамикалық модельдеу арқылы жүйедегі химиялық реакциялардың жүру ықтималдығы, тепе-теңдік жағдайлары және температураның процестің тиімділігіне әсері анықталады.

Жүргізілген есептеулер мен талдаулар хром және никель оксидтерінің металлотермиялық жолмен қалпына келу мүмкіндігін, сондай-ақ процестің оңтайлы температуралық және құрамдық параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, алынған мәліметтер бастапқы шикізат құрамын таңдауға, тотықсыздандырғыш мөлшерін негіздеуге және балқу процесін басқаруға ғылыми негіз болады. Бұл өндірістік жағдайда технологиялық режимдерді нақтылауға және металдың шығымын арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері хром-никельді ферроқорытпа алу процесінің тиімділігін арттыруға, энергия шығындарын азайтуға, алынатын өнімнің сапасын жақсартуға және экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етуге көмектеседі.

Кілтті сөздер: металлотермиялық әдіс, хром, никель, термодинамикалық модельдеу, ферроқорытпа, тотықсыздану процессі.

Кіріспе

Ферроқорытпаларды алу әдістерінің ішінде металлотермиялық әдіс ерекше орын алады. Бұл әдіс жоғары температурада металдардың тотықтарын белсенді металдармен қалпына келтіруге негізделген. Электр энергиясын аз қажет етуі, экологиялық тұрғыдан таза болуы және көміртектің аз мөлшерде қатысуы-металлотермиялық әдістің басты артықшылықтары болып саналады [1; 2].

Металлотермиялық әдіс- химиялық тотықсыздандыру процесіне негізделген тәсіл, онда тотықтарды белсенді металлмен (мысалы, алюминий, кремний немесе кальциймен) қалпына келтіреді. Бұл әдістің басты артықшылығы - электр энергиясын көп қажет етпейді және жоғары сапалы, көміртексіз ферроқорытпа алуға мүмкіндік береді [3; 4].

Термодинамикалық модельдеу – металлургиялық процестерді зерттеуде және жобалауда маңызды ғылыми құралдардың бірі болып табылады. Оның қолданылуы химиялық реакциялардың өту мүмкіндігін теоретикалық бағалауға, жүйенің энергетикалық параметрлерін анықтауға және алынатын өнімнің құрамын эксперимент жүргізбестен алдын ала болжауға мүмкіндік береді. Хром-никельді ферроқорытпаны металлотермиялық әдіспен өндіру технологиясында термодинамикалық модельдеу метал оксидтерін қалпына келтіру процестерін талдауда және оптималды технологиялық параметрлерді таңдауда маңызды рөл атқарады [4; 5].

Термодинамикалық модельдеудің тағы бір маңызды мақсаты процестің технологиялық параметрлерін оңтайландыру. Бұл параметрлерге қалпына келтіру температурасы, шихта компоненттерінің қатынасы, қалпына келтіргіштің түрі мен мөлшері және реакцияның өту шарттары жатады. Есептеулер жүргізу арқылы процесс режимінің ең тиімді параметрлерін алдын ала анықтап, шикізат пен энергия шығынын азайтуға, сондай-ақ негізгі өнімнің шығымын арттыруға болады [6].

Термодинамикалық модельдеуді қолдану өндірістің экологиялық және экономикалық тиімділігін арттыруға да ықпал етеді. Теориялық талдау зиянды шығарындылар мен қалдықтардың түзілуін азайтуға, сондай-ақ шикізат ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе хром қосылыстарын өңдеу кезінде маңызды, өйткені олар қоршаған ортаға теріс әсер етуі мүмкін [7; 8; 9].

Осылайша, хром-никельді ферроқорытпаны металлотермиялық әдіспен өндіру технологиясында термодинамикалық модельдеуді қолдану қалпына келтіру процестерінің механизмін тереңірек түсінуге, қорытпа алу үшін оптималды шарттарды анықтауға, өндіріс тиімділігін арттыруға және дайын өнімнің сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер металлургиялық технологияларды жетілдіру және ферроқорытпаларды өндірудің жаңа, тиімді әдістерін әзірлеу үшін ғылыми негіз бола алады [10; 11; 12].

Материалдар мен әдістері

Процесті модельдеу және қалпына келтіру реакцияларының термодинамикалық мүмкіндіктерін бағалау үшін TERRA термодинамикалық кешені қолданылды. Бұл кешен жүйедегі химиялық реакциялардың өту ықтималдығын, тепе-теңдік

құрамын және процестің тиімді температуралық интервалдарын анықтауға мүмкіндік береді. Осы әдіс арқылы хром және никель оксидтерінің металдық күйге өту процесі бақыланып, алынған өнімдердің химиялық құрамы мен фазалық жағдайы анықталды.

Процестің физикалық қасиеттерін бағалау үшін металл ерітіндінің қалыптасуы, балқу және кристалдану температуралары зерттелді. Қорытынды-өлшеу жүйесіне жоғары дәлдіктегі термопаралар мен температураны тіркеу құралдары енгізілді. Металл шығымдылығы, қалпына келтіру дәрежесі және өнім сапасы тәжірибелік бақылаулар арқылы бағаланды.

Осы әдістемелік тәсіл TEPPA термодинамикалық кешенін қолдану арқылы теоретикалық модельдеу нәтижелерін тәжірибелік деректермен салыстыруға, процестің оңтайлы температуралық және құрамдық параметрлерін анықтауға және хром-никельді ферроқорытпаны металлотермиялық әдіспен өндіру технологиясын жетілдіруге мүмкіндік берді.

Батамша кенінің құрамындағы хром мен никель оксидтерін қалпына келтірудің негізгі металлотермиялық реакциялары мен олардың жоғары температуралық аймақтардағы жүру ықтималдығы TEPPA бағдарламалық кешені арқылы модельденді. Процестің негізін мынадай негізгі тотықсыздану және силицид түзілу реакциялары құрайды:

Алюминиймен хром оксидін қалпына келтіру:

$$Cr_2O_3 + 2Al \rightarrow 2Cr + Al_2O_3$$

Кремниймен никель оксидін қалпына келтіру:

$$2NiO + Si \rightarrow 2Ni + SiO_2$$

Жоғары температуралық аймақта хромның кремниймен әрекеттесіп, тұрақты силицид фазасын түзуі:

$$3Cr + Si \rightarrow Cr_3Si$$

Нәтижелер және талқылау

Батамша кенінің сынамасы кен жинақталған орыннан алынды. Батамша кені қара түсті, ұсақ дисперсті ұнтақ түріндегі минералдық шикізат болып табылады. Кеннің мұндай құрылымы оның құрамындағы оксидті қосылыстардың біркелкі таралуын және термиялық өңдеу кезінде белсенді әрекеттесу мүмкіндігін көрсетеді. Тәжірибелік сынаманың химиялық құрамы оның күрделі көпкомпонентті жүйеге жататынын дәлелдейді.

1-кесте – Тәжірибелік сынаманың химиялық құрамы (масс. %):

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cr_2O_3	NiO	P_2O_5	Al	Si	Cr	B	Fe	Ar
24,4	23,7	10,53	38,5	8,23	33,5	4,5	0,049	0,14	3,85	3,38	5,64	1,96	0,1

Көрсетілген мәліметтер бойынша Батамша кенінің құрамында кальций, кремний, алюминий, хром және магний оксидтері едәуір мөлшерде кездеседі. Әсіресе CaO және Cr_2O_3 мөлшерінің жоғары болуы кеннің хромқұрамды шикізат ретінде ғылыми және технологиялық тұрғыдан маңызды екенін көрсетеді. Сонымен қатар Al_2O_3 және SiO_2 қосылыстарының болуы қыздыру процесінде алюмосиликатты және силикатты фазалардың түзілуіне ықпал етуі мүмкін.

Батамша кенінің құрамындағы Fe_2O_3, NiO және MgO сияқты компоненттер де фазалық өзгерістерге әсер ететін маңызды оксидтер қатарына жатады. Бұл оксидтер жоғары температура жағдайында өзара әрекеттесіп, жаңа тұрақты қосылыстардың түзілуіне себеп болуы ықтимал. Кен құрамындағы бордың болуы балқу және фазалардың қайта түзілу процестеріне әсер ететін қосымша фактор ретінде қарастырылады. Фосфор оксидінің мөлшері өте төмен болғанымен, оның болуы металлургиялық процестерде ескерілуі тиіс.

Бастапқы кезеңде бейтарап газ – аргон атмосферасында 300–3000 К температура аралығында қыздыру кезінде Батамша кенінің фазалық құрамының өзгеруі бағаланды (График-1). Аргон атмосферасын қолдану тотықтырғыш немесе тотықсыздандырғыш әсерлерді шектеуге мүмкіндік береді. Бұл жағдай зерттелетін жүйеде жүретін фазалық түрленулерді нақтырақ талдауға жағдай жасайды. Температураның жоғарылауымен кен құрамындағы оксидті фазалар арасында күрделі физика-химиялық әрекеттесулер жүруі мүмкін. Осыған байланысты Батамша кенін термодинамикалық модельдеу оның жоғары температурадағы тұрақтылығын, фазалық құрамының өзгеруін және металлургиялық өңдеуге жарамдылығын бағалау үшін маңызды болып табылады.

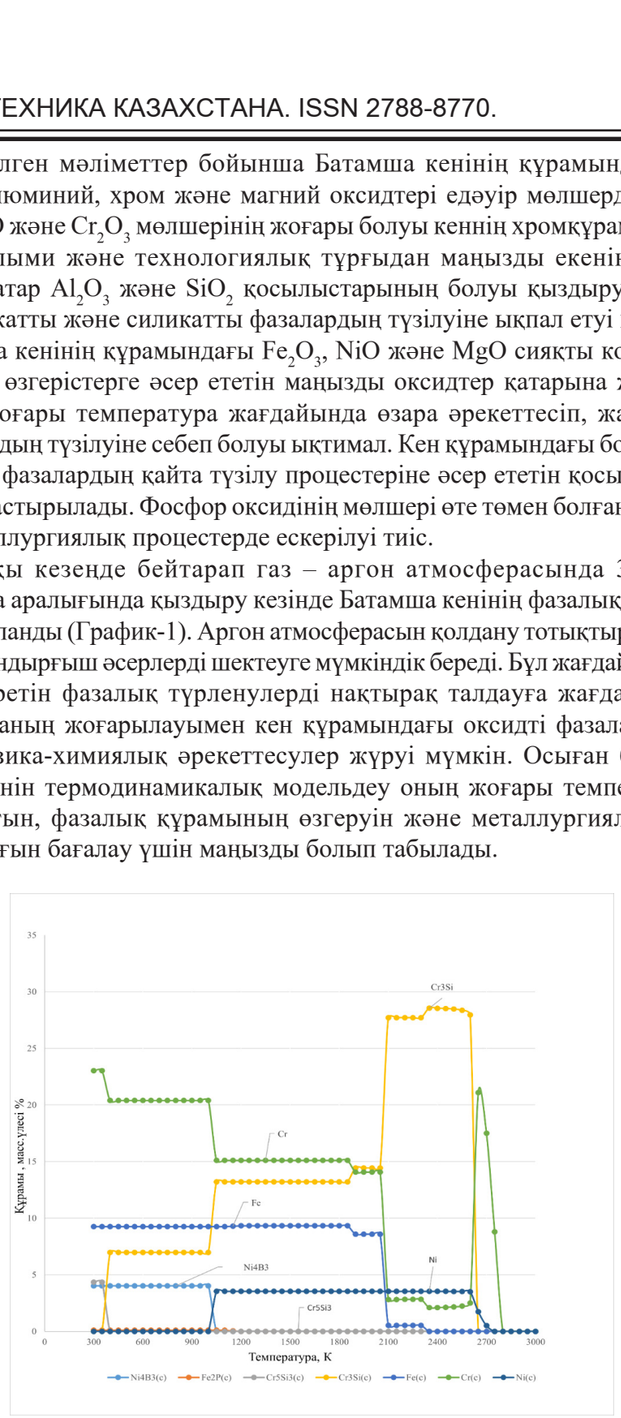


График 1 – Хромқұрамды шламның фазалық өзгеруі

Ұсынылған графикте бейтарап атмосферада 300–3000 К аралығында қыздыру кезіндегі шламның хромқұрамды бөлігінің фазалық құрамының өзгеруі көрсетілген. Талдау температураға байланысты хром, темір және никельдің әртүрлі фазалар арасында қайта таралуын бақылауға мүмкіндік береді.

Төмен температураларда, яғни 300–900 К аралығында, жүйеде металдық хром (Cr) басым болады, оның мөлшері шамамен 20–23 %-ды құрайды. Сонымен қатар металдық темірдің (Fe) мөлшері 9–10 % деңгейінде тіркеледі, сондай-ақ Ni_4B_3 және Cr_5Si_3 сияқты интерметаллидтік қосылыстардың аз мөлшері байқалады. Бұл температуралық аралықта жүйе елеулі фазалық түрленулерсіз салыстырмалы түрде тұрақты күйде болады.

900–1200 К аралығында хромның кремниймен белсенді әрекеттесуі басталып, Cr_3Si силициді түзіледі. Оның мөлшері шамамен 13 %-ға дейін артады, бұл бос хром үлесінің 15 %-ға дейін төмендеуімен қатар жүреді. Бұл хромның металдық күйден химиялық байланысқан күйге қайта таралатынын көрсетеді.

1200–1900 К диапазонында фазалық құрам тұрақтанады: Cr_3Si мөлшері айтарлықтай деңгейде (13–14 %) сақталады, сонымен қатар Fe және Cr металдық күйде кездеседі. Бұл аралықта фазалық құрамда елеулі өзгерістер байқалмайды.

1900–2100 К-ден жоғары температураларда күрт фазалық түрленулер жүреді. Металдық хром мөлшері күрт төмендейді 3 %-ға және одан да төмен мәндерге дейін, ал Cr_3Si силицидінің үлесі, керісінше, секірмелі түрде 27–29 %-ға дейін артады. Бұл хромның кремниймен қарқынды байланысып, тұрақты силицидтік фазалардың түзілетінін дәлелдейді. Сонымен қатар металдық темір іс жүзінде толық жойылады, бұл оның басқа қосылыстарға қатысуын немесе балқымаға өтуін көрсетуі мүмкін.

Никель мөлшері 2500 К-ге дейін салыстырмалы түрде тұрақты болып қалады, шамамен 3–4 %, одан кейін төмендейді. 2500–2700 К аймағында хром мөлшерінің қысқа мерзімді артуы байқалады, бұл силицидтердің ыдырауымен немесе элементтердің фазалар арасында қайта таралуымен байланысты болуы ықтимал. Алайда температура одан әрі жоғарылаған кезде, яғни 2700 К-ден жоғары, барлық қатты фазалар іс жүзінде жойылады, бұл жүйенің балқыған күйге өтуіне сәйкес келеді.

Осылайша, шламды қыздыру барысында хром негізінен металдық күйден жоғары температурада тұрақты фаза болып табылатын Cr_3Si силицидіне өтеді. Жоғары температураларда темір мен никель жеке фазалық тұрақтылығын жоғалтады. Алынған деректер қалпына келтіріп балқыту жағдайларын таңдауда маңызды, өйткені олар хромның неғұрлым тұрақты және ықтимал қауіптілігі төмен қосылыстарға байланысуы қандай температуралық аралықтарда жүретінін көрсетеді.

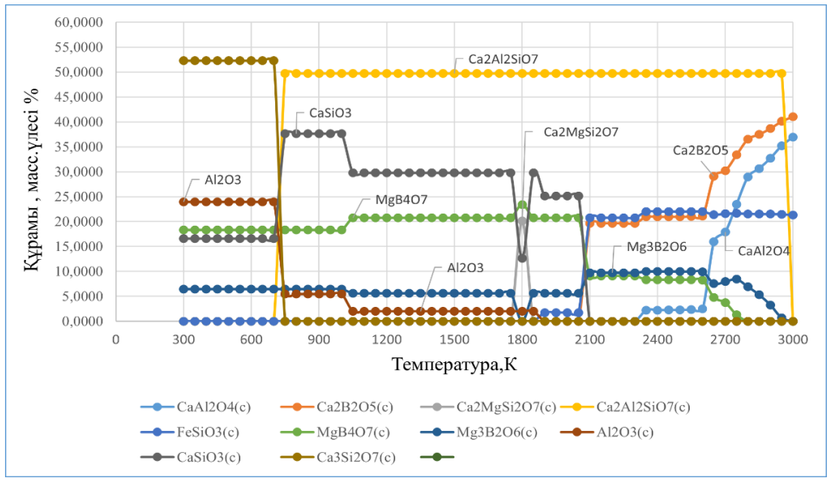


График 2 – Шламның фазалық құрамының өзгеруі

Алдымен 300–2500 К температура аралығында қыздыру кезіндегі шламның фазалық құрамының өзгеруіне бағалау жүргізілді (График-2). Талдау жүйеде силикатты, алюминатты және магнийқұрамды қосылыстардың кең спектрі түзілетінін, олардың тұрақтылығы температураға айтарлықтай тәуелді екенін көрсетеді.

Төмен температураларда, яғни 300–700 К аралығында, жүйеде бастапқы оксидтер мен қарапайым қосылыстар басым болады. Едәуір үлес Ca-құрамды фазаларға, атап айтқанда CaSi және CaAl қосылыстарына тиесілі, сондай-ақ MgO және Fe-құрамды компоненттер де кездеседі.

Температура 800–1200 К-ге дейін жоғарылаған кезде кальций оксидінің кремний диоксидімен белсенді әрекеттесуі байқалып, $CaSiO_3$ және Ca_2SiO_4 сияқты кальций силикаттары түзіледі. Сонымен қатар кальций алюминаттары ($CaAl_2O_4$) және темірқұрамды фазалар қалыптасады. Осы температуралық аралықта магнийдің қайта таралуы тіркеліп, $Mg_3B_2O_6$ және $Mg_4B_7O_7$ типті қосылыстар түзіледі, бұл MgO-ның қоспа компоненттерімен реакцияларға қатысатынын көрсетеді.

1200–1800 К температура аймағында фазалық құрам тұрақтанады: Ca_2SiO_4 және $CaAl_2O_4$ сияқты негізгі кальций силикатты және алюминатты фазалар сақталады, сондай-ақ $Ca_2MgSi_2O_7$ тәрізді күрделірек қосылыстар түзіледі. Бос MgO мөлшері айтарлықтай деңгейде қалады, бұл негіздік оксидтің артық болуымен және қышқылдық компоненттердің жеткіліксіздігімен түсіндіріледі.

Температура одан әрі жоғарылаған кезде, яғни 1800–2200 К аралығында, фазалық түрленулер және бірқатар қосылыстардың жартылай ыдырауы жүреді. Кальций және магний силикаттарының мөлшері өзгеріп, компоненттердің сұйық және қатты фазалар арасында қайта таралуы байқалады. Бұл аралықта күрделі

кальций-магний силикаттарын қоса алғанда, тұрақты жоғары температуралық фазалар қалыптасады.

2200 К-ден жоғары температураларда қосылыстардың бір бөлігінің бұзылуы және күрделі силикаттар үлесінің төмендеуі басталады, бұл жүйенің балқыған күйге өтуімен байланысты. Шығару температураларына жақындағанда, яғни 1900–2100 К аралығында, жүйе тұрақты кальцийқұрамды силикаттар мен алюминаттардың, сондай-ақ магнийқұрамды фазалардың болуымен сипатталады.

Осылайша, қыздыру кезіндегі шламның фазалық құрамы кальций оксидінің басым болуымен анықталады. Ол SiO_2, Al_2O_3 және басқа компоненттермен белсенді әрекеттесіп, қиын балқитын қосылыстар түзеді. MgO-ның артық мөлшері оның бос күйде немесе магний силикаттарының құрамында ішінара сақталуына әкеледі. Алынған деректер қалпына келтіріп балқыту кезінде фазалардың түзілу жағдайларын бағалауға және оларды экологиялық қауіпті қосылыстарды, соның ішінде хром қосылыстарын, бейтараптандыру әдістерін әзірлеу барысында ескеруге мүмкіндік береді.

2-кесте – Температураға байланысты хромқұрамды шламның негізгі фазалық өзгерістері (салыстырмалы сандық мәндері)

Температуралық интервал (К)	Басым фазалар мен олардың мөлшері (масс.%)	Фазалық күйдің қысқаша сипаттамасы
300–900 К	Cr (20–23 %), Fe (9–10 %), Ni_4B_3, Cr_5Si_3 (5 %)	Жүйе тұрақты, айтарлықтай фазалық ауысулар байқалмайды.
900–1200 К	Cr (15 %-ға дейін төмендейді), Cr_3Si (13%-ға дейін артады)	Хромның кремниймен белсенді әрекеттесуі және силицидтердің түзілуі басталады.
1200–1900 К	Cr_3Si (13–14 %), Fe және Cr металдық күйде	Фазалық құрам тұрақталады, айтарлықтай ауытқулар жоқ.
1900–2100 К	Cr_3Si (27–29 %-ға секірмелі арту), Cr (3 %-ға төмендеу)	Қарқынды фазалық түрленулер, металдық темірдің толық жойылуы.
2100–2700 К	Ni (3–4 % деңгейінде), Cr (2500 К аймағында қысқа мерзімді өсім)	Силицидтердің ішінара ыдырауы және элементтердің қайта таралуы.
2700 К жоғары	Барлық қатты фазалар жойылады	Жүйенің толық балқыған күйге (сұйық фазаға) өтуі.

3-кесте – Шламның оксидті және силикатты фазаларының температуралық интервалдары

Температуралық интервал (К)	Түзілетін негізгі фазалар мен қосылыстар	Сипаттамасы
300–700 К	Бастапқы оксидтер, Ca-Si, Ca-Al қосылыстары, MgO, Fe-компоненттері	Қарапайым оксидті фазалардың басым болуы.
800–1200 К	$CaSiO_3$, Ca_2SiO4, $CaAl_2O_4$, $Mg_3B_2O_6$, $Mg_4B_7O_7$	Кальций оксидінің SiO_2 және Al_2O_3 белсенді әрекеттесуі.
1200–1800 К	Ca_2SiO_4, $CaAl_2O_4$, $Ca_2MgSi_2O_7$, бос MgO	Күрделі силикаттар мен алюминаттардың тұрақтану аймағы.
1800-2200 К	Компоненттердің сұйық және қатты фазалар арасында қайта таралуы	Тұрақты жоғары температуралық фазалардың ішінара ыдырауы.

2200 К жоғары	Күрделі силикаттар үлесінің төмендеуі	Шламның толықтай шлак балқымасына айналу процесі.

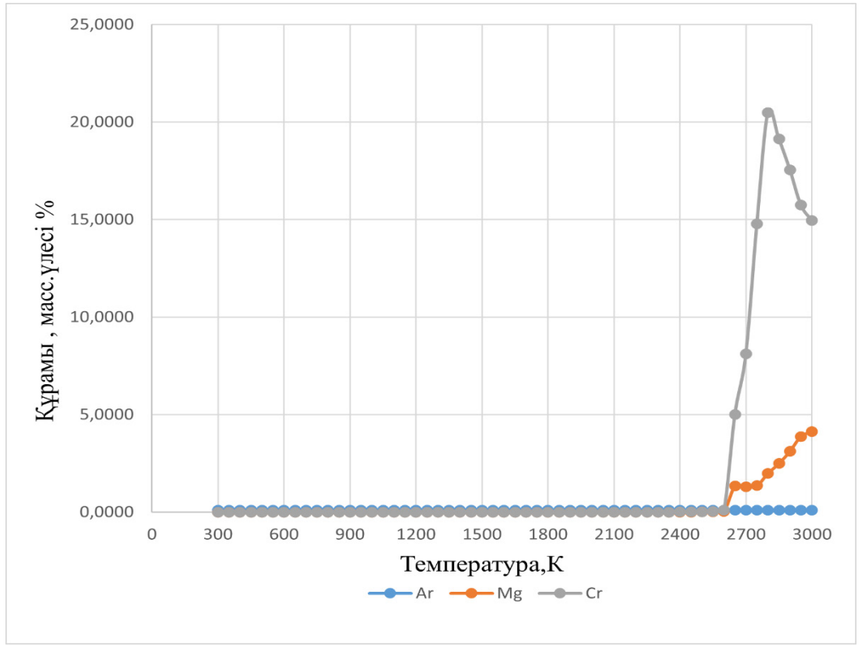


График 3 – Газ компоненттерінің өзгеру мөлшері

Ұсынылған графикте 300–3000 К температура аралығында жүйені қыздыру кезіндегі газтәрізді компоненттердің (Cr, Mg және Ar) мөлшерінің өзгеруі көрсетілген. 300–2500 К температура аралығында газ фазасы іс жүзінде байқалмайды: барлық компоненттердің (Cr, Mg және Ar) мөлшері нөлге жақын болып қалады. Бұл элементтердің конденсацияланған күйде, яғни қатты немесе сұйық күйде болатынын және газ фазасына өтпейтінін көрсетеді.

Шамамен 2600–2700 К-ден бастап жағдай күрт өзгереді: газ фазасының қарқынды түзілуі байқалады. Бұл, ең алдымен, хромға (Cr) қатысты, оның мөлшері секірмелі түрде артып, 2800 К маңында ең жоғары мәнге (20–21 %) жетеді. Бұл өте жоғары температураларда хромқұрамды қосылыстардың белсенді буланууын немесе сублимациялануын көрсетеді.

Сонымен қатар магнийдің (Mg) буланууы да басталады, алайда оның газ фазасындағы мөлшері едәуір төмен болады. Температура артқан сайын Mg концентрациясы біртіндеп жоғарылап, 3000 К кезінде 4 %-ға жетеді, бұл жоғары температураларда магнийдің жоғары ұшқыштығымен байланысты.

Инертті газ ретінде аргонның (Ar) мөлшері бүкіл температуралық аралықта іс жүзінде өзгеріссіз қалып, нөлге жақын болады. Бұл оның химиялық түрленулерге қатыспайтын бейтарап қорғаныш атмосферасы ретіндегі рөлін растайды.

Максимумға жеткеннен кейін газтәрізді хром мөлшері біршама төмендейді, бұл заттың газ және сұйық фазалар арасында қайта таралуымен немесе неғұрлым тұрақты қосылыстардың түзілуімен байланысты болуы мүмкін.

Осылайша, график 2600 К-ден жоғары температураларда компоненттердің, ең алдымен хромның және аз дәрежеде магнийдің, қарқынды булануы басталатынын көрсетеді. Бұл қалпына келтіріп балқыту үдерістері үшін маңызды, өйткені хромның газ фазасымен бірге жоғалу мүмкіндігін және оның ұшып кетуін азайту үшін температуралық режимді бақылау қажеттілігін көрсетеді.

TERRA бағдарламалық кешенінде алынған термодинамикалық модельдеу нәтижелері бақылау термопаралары мен температураны тіркеу құралдары қолданылған тәжірибелік балқыту деректерімен жоғары деңгейдегі сәйкестікті көрсетті. Тәжірибе жүзінде 1900–2100 К (1627–1827 °C) температуралық интервалында металл мен шлактың бөлінуі ең тиімді көрсеткішке ие болды, бұл модельдеудегі күрделі кальций-магний силикаттарының ($Ca_2MgSi_2O_7$) түзілу және жүйенің оңтайлы сұйыққоюлық күйге өту температурасымен (1900–2100 К) толық сәйкес келеді.

Сонымен қатар, 2600 К-ден жоғары температурада хромның газ фазасына қарқынды өтуі туралы теориялық болжам тәжірибелік балқытуларда жоғары температура кезінде хромның улану (sublimation) шығындарының артуымен дәлелденді. Бұл жағдай модельдеудің нақты өндірістік процестерді алдын ала болжау дәлдігінің жоғары екенін көрсетеді.

Қорытынды

Жүргізілген талдау бейтарап атмосферада Батамша кенінің сынамасын қыздыру кезінде оның фазалық құрамында елеулі өзгерістер болатынын көрсетті. Бұл өзгерістер жүйенің негізгі оксидтері арасындағы күрделі өзара әрекеттесулермен байланысты. Фазалардың түзілуінде кальций оксиді анықтаушы рөл атқаратыны анықталды, өйткені ол SiO_2 және Al_2O_3-пен белсенді әрекеттесіп, тұрақты кальций силикаттары мен алюминаттарын түзеді.

800–1800 К температура аралығында силикатты және алюминатты фазалардың тұрақты жиынтығы қалыптасады, ал жоғары температураларда, яғни 1900 К-нен жоғары, ыдырау, компоненттердің қайта таралуы және жүйенің балқыған күйге өту процестері байқалады.

Хром қыздыру кезінде негізінен металдық күйден химиялық байланысқан күйге өтіп, әсіресе жоғары температура аймағында тұрақты Cr_3Si силицидін түзетіні көрсетілді. Бұл ретте темір мен никель фазалық тұрақтылығын жоғалтып, балқымаға немесе екіншілік қосылыстарға өтеді.

Зерттеу нәтижелері бойынша өндіріске енгізу үшін мынадай нақты технологиялық ұсыныстар беріледі:

Оңтайлы температуралық режим: Балқыту процесін 1900–2100 К температуралық интервалында жүргізу ұсынылады. Бұл аймақта хром мен

никельдің металдық және тұрақты силицидтік фазаларға өту дәрежесі максималды болып, металдың шлактан бөлінуі жоғары тиімділікпен жүреді.

Жоғары температуралық шектеу: Балқыту температурасының 2500–2600 К-нен асып кетуіне жол бермеу керек, себебі бұл хромның газ фазасына қарқынды булануына және оның технологиялық шығынының (20-21%-ға дейін) күрт артуына әкеледі.

Шихта құрамын түзету: Кендегі CaO мен MgO мөлшерінің жоғары болуын ескере отырып, балқыманың тұтқырлығын төмендету және қиын балқитын алюмосиликатты фазаларды бейтараптандыру үшін шихта құрамына кремнийқұрамды флюстерді (SiO_2) оңтайлы қатынаста қосу қажет.

Алынған нәтижелер хромқұрамды техногендік қалдықтарды қайта өңдеудің экологиялық қауіпсіздігін арттыруға және ферроқорытпа өндірісінде энергия шығындарын азайтуға мүмкіндік береді.

Осылайша, алынған нәтижелер хромды тұрақты қосылыстар түрінде байланыстыруға қолайлы температуралық аралықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Бұл хромқұрамды қалдықтардың экологиялық қауіптілігін төмендету және тиімді қалпына келтіріп балқыту технологияларын әзірлеу үшін маңызды мәнге ие.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Привалов, О. Е., Платонов, В. Ю., Головачев, Н. П., Такенов, Т. Д.** Производственный опыт освоения технологии выплавки ферросиликохрома на мощных печах типа РКЗ-63И1 [Текст] // Физико-химические и технологические вопросы металлургического производства Казахстана : сб. науч. тр. Химико-металлургического института имени Ж. Абишева. – Алматы, 2002. – С. 206–208.

2 **Фадеев, В. И., Островский, Я. И., Веселовский, И. А.** Использование шубаркольского угля при производстве ферросиликохрома [Текст] // Научно-технический прогресс в металлургии : сб. науч. тр. РИК по учебной и методической литературе. – Алматы, 2009. – С. 265–268.

3 **Удалов, Ю. П.** Применение программных комплексов вычислительной и геометрической термодинамики в проектировании технологических процессов неорганических веществ : учебное пособие [Текст]. – СПб. : СПбГТИ (ТУ), 2012. – 147 с.

4 **Трусов, Б. Г.** Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах [Текст] // Сб. материалов 3-го Междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. – Иваново, 2002. – Т. I. – С. 217–220.

5 **Kryukov, R. E., Kozyrev, N. A., Usoltsev, A. A.** Use of barium-strontium carbonatite for flux welding and surfacing of mining machines [Text] // International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR). – 2017. – № 84. – P. 1245–1251.

6 **Vu, H. Q., Tran, V. H., Le, M. T.** Radiation Shielding Properties Prediction of Barite used as Small Aggregate in Mortar [Text] // Engineering Technology & Applied Science Research. – 2020. – Vol. 10. – № 6. – P. 6469–6475.

7 **Mamontova, S. G., Zelentcov, S. Z.** Thermodynamic estimation of the reaction implementation possibility of Beryllian indialite generation from oxides in the BeO–MgO–Al_2O_3–SiO_2 system [Text] // 16th International Conference on Luminescence and Laser Physics Devoted to the 100th Anniversary of Irkutsk State University. – 2019. – Vol. 2069. – P. 645–649.

8 **Kim, M., Jung, I.** Coupled experimental phase diagram study and thermodynamic optimization of the Na_2O–B_2O_3–Fe_2O_3 system in air [Text] // Calphad. – 2022. – Vol. 76. – P. 124–131.

9 **Заякин, О. В., Жучков, В. И.** Получение и свойства новых никелевых сплавов [Текст] // Современные технологии освоения минеральных ресурсов : сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Красноярск : Изд-во ГОУ ВПО «ГУЦМИЗ», 2006. – С. 379–381.

10 **Гасик, М. И., Лякишев, Н. П., Емлин, Б. И.** Теория и технология производства ферросплавов [Текст]. – М. : Металлургия, 1988. – 784 с.

11 **Рысс, М. А.** Производство ферросплавов [Текст]. – М. : Металлургия, 1985. – 344 с.

12 **Лякишев, Н. П., Гасик, М. И.** Металлургия хрома [Текст]. – М. : Элиз, 1999. – 582 с.

REFERENCES

1 **Privalov, O. E., Platonov, V. Yu., Golovachev, N. P., Takenov, T. D.** Proizvodstvennyi opyt osvoeniya tekhnologii vyplavki ferrosilikokhroma na moshchnykh pechakh tipa RKZ-63I1 [Production experience in mastering the technology of smelting ferrosilicochrome in powerful RKZ-63I1 furnaces] [Text]. In Fiziko-khimicheskie i tekhnologicheskie voprosy metallurgicheskogo proizvodstva Kazakhstana : collection of scientific papers of the Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev. – Almaty, 2002. – P. 206–208.

2 **Fadeev, V. I., Ostrovskii, Ya. I., Veselovskii, I. A. et al.** Ispolzovanie shubarkolskogo uglya pri proizvodstve ferrosilikokhroma [Use of Shubarkol coal in the production of ferrosilicochrome] [Text]. In Nauchno-tekhnicheskii progress v metallurgii : collection of scientific papers of the Republican Publishing Cabinet on educational and methodological literature. – Almaty, 2009. – P. 265–268.

3 **Udalov, Yu. P.** Primenenie programmnykh kompleksov vychislitelnoi i geometricheskoi termodinamiki v proektirovanii tekhnologicheskikh protsessov neorganicheskikh veshchestv [Application of software complexes of computational and geometric thermodynamics in the design of technological processes of inorganic substances] : textbook [Text]. – Saint Petersburg : SPbGTI (TU), 2012. – 147 p.

4 **Trusov, B. G.** Programmnaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesii v plazmokhimicheskikh sistemakh [TERRA software system

for modeling phase and chemical equilibria in plasma-chemical systems] [Text]. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry. – Ivanovo, 2002. – Vol. I. – P. 217–220.

5 **Kryukov, R. E., Kozyrev, N. A., Usoltsev, A. A.** Use of barium-strontium carbonatite for flux welding and surfacing of mining machines [Text] // International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR). – 2017. – № 84. – P. 1245–1251.

6 **Vu, H. Q., Tran, V. H., Le, M. T.** Radiation Shielding Properties Prediction of Barite used as Small Aggregate in Mortar [Text] // Engineering Technology & Applied Science Research. – 2020. – Vol. 10. – № 6. – P. 6469–6475.

7 **Mamontova, S. G., Zelentcov, S. Z.** Thermodynamic estimation of the reaction implementation possibility of Beryllian indialite generation from oxides in the BeO–MgO–Al_2O_3–SiO_2 system [Text] // 16th International Conference on Luminescence and Laser Physics Devoted to the 100th Anniversary of Irkutsk State University. – 2019. – Vol. 2069. – P. 645–649.

8 **Kim, M., Jung, I.** Coupled experimental phase diagram study and thermodynamic optimization of the Na_2O–B_2O_3–Fe_2O_3 system in air [Text] // Calphad. – 2022. – Vol. 76. – P. 124–131.

9 **Zayakin, O. V., Zhuchkov, V. I.** Poluchenie i svoistva novykh nikelevykh splavov [Production and properties of new nickel alloys] [Text]. In Sovremennye tekhnologii osvoeniya mineralnykh resursov : collection of scientific papers of the IV International Scientific and Technical Conference. – Krasnoyarsk : Publishing House of GOU VPO «GUTSMIZ», 2006. – P. 379–381.

10 **Gasik, M. I., Lyakishev, N. P., Emlin, B. I.** Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov [Theory and technology of ferroalloy production] [Text]. – Moscow : Metallurgiya, 1988. – 784 p.

11 **Ryss, M. A.** Proizvodstvo ferrosplavov [Ferroalloy production] [Text]. – Moscow : Metallurgiya, 1985. – 344 p.

12 **Lyakishev, N. P., Gasik, M. I.** Metallurgiya khroma [Metallurgy of chromium] [Text]. – Moscow : Eliz, 1999. – 582 p.

30.04.26 ж. баспаға түсті.
12.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Р. Б. Султангазиев[1], А. С. Орлов[2], *Қ. М. Титошева[3]
[1,3]Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[2]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда.
Поступило в редакцию 30.04.26.
Поступило с исправлениями 12.05.26.
Принято в печать 22.07.26.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ХРОМ-НИКЕЛЕВОГО ФЕРРОСПЛАВА МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

В данной статье рассмотрены результаты исследований по термодинамическому моделированию технологии получения хромоникелевого ферросплава металлотермическим способом. Основная цель исследования – определение оптимальных условий эффективного перевода соединений хрома и никеля в металлическое состояние путем термодинамического анализа процессов металлотермического восстановления.

Металлотермический способ основан на восстановлении оксидов металлов с помощью активных восстановителей в условиях высоких температур. Данный метод широко применяется в производстве ферросплавов и позволяет получать высококачественные сплавы, содержащие ценные компоненты. С помощью термодинамического моделирования определяются вероятность протекания химических реакций в системе, условия равновесия и влияние температуры на эффективность процесса.

Проведенные расчеты и анализ позволяют установить возможность восстановления оксидов хрома и никеля металлотермическим способом, а также определить оптимальные температурные и составные параметры процесса. Кроме того, полученные данные служат научной основой для выбора состава исходного сырья, обоснования количества восстановителя и управления процессом плавки. Это позволяет уточнить технологические режимы в производственных условиях и повысить выход металла.

Результаты исследования направлены на повышение эффективности процесса получения хромоникелевого ферросплава, снижение энергозатрат, улучшение качества получаемого продукта и обеспечение экологической безопасности.

Ключевые слова: металлотермический метод, хром, никель, термодинамическое моделирование, ферросплав, процесс восстановления.

R. B. Sultangaziyev[1], A. S. Orlov[2], *K. M. Titosheva[3]
[1,3]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2]Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 30.04.26.
Received in revised form 12.05.26.
Accepted for publication 22.07.26.

THERMODYNAMIC MODELING OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING CHROMIUM-NICKEL FERROALLOY BY THE METALLOTHERMIC METHOD

This article presents the results of studies on thermodynamic modeling of the technology for producing chromium-nickel ferroalloy by the metallothermic method. The main objective of the study is to determine the optimal conditions for the efficient conversion of chromium and nickel compounds into the metallic state through thermodynamic analysis of metallothermic reduction processes.

The metallothermic method is based on the reduction of metal oxides using active reducing agents under high-temperature conditions. This method is widely used in ferroalloy production and makes it possible to obtain high-quality alloys containing valuable components. Thermodynamic modeling allows determining the probability of chemical reactions occurring in the system, equilibrium conditions, and the effect of temperature on process efficiency.

The calculations and analyses performed make it possible to establish the feasibility of reducing chromium and nickel oxides by the metallothermic method, as well as to determine the optimal temperature and composition parameters of the process. In addition, the obtained data provide a scientific basis for selecting the composition of the initial raw materials, justifying the amount of reducing agent, and controlling the melting process. This makes it possible to refine technological regimes under industrial conditions and increase metal yield. The research results are aimed at improving the efficiency of chromium-nickel ferroalloy production, reducing energy consumption, improving the quality of the final product, and ensuring environmental safety.

Keywords: metallothermic method, chromium, nickel, thermodynamic modeling, ferroalloy, reduction process.

SRSTI 53.03.09, 53.03.03

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/460-471

V. V. Tolokonnikova[1], S. Baisanov[2], O. B. Kenzhaliyev[3],
****A. S. Orlov[4], V. A. Salina[5]***

[1,2,4]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;
[5]Institute of Metallurgy named after Academician N. A. Vatolin UO RAS, Russian Federation, Ekaterinburg.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3386-0966
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7328-2921
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3776-9724
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7563-357X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7415-717X
*e-mail: wolftailer@mail.ru

MODELING CRYSTALLIZATION IN THE MG–SI SYSTEM USING THE BJERRUM–GUGGENHEIM CONCEPT

The aim of this work is to validate a mathematical approach for describing the liquidus and solidus lines in the Mg–Si system based on the behavior of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient in the melt, in order to reveal the nature of interatomic interactions in liquid magnesium alloys.

It is shown that, for the base Mg–Si system in the crystallization region of the congruently melting compound Mg_2Si, the dependence of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient on magnesium activity is characterized by strong interactions between unlike atoms, manifested as negative deviations from Raoult's law. Consequently, active interactions occur between magnesium and silicon atoms in the homogeneous melt, leading to the formation of the congruent compound Mg_2Si.

For the partial systems Mg_2Si–Mg and Mg2Si–Si, linear correlation relationships with high correlation coefficients were obtained. This indicates that, in the melt along the liquidus line, only van der Waals interaction forces predominate between the elementary structural units of the component under consideration (Mg2Si) and the second component (Mg or Si).

Keywords: phase diagrams, liquidus and solidus, Bjerrum-Guggenheim coefficient, mathematical model, activity.

Introduction

The crystallization fields of phases in different types of phase diagrams can be described by the fundamental Schröder–Le Chatelier equation for ideal systems; however, the resulting mathematical expressions for the liquidus and solidus lines do not coincide with experimental data.

At present, empirical studies have established regularities in the formation of phase crystallization fields based on phase diagrams of a significant number of metallic and

oxide systems, expressed in the form of correlation dependencies of the Bjerrum–Guggenheim coefficient. The combined solution of two mathematical expressions (with the Schröder–Le Chatelier equation for an ideal system in the numerator and the correlation dependence describing deviation from ideality in the denominator) made it possible to obtain, by calculation, the mathematical form of the real composition of the liquid and solid phases. In this case, the mathematical expressions of the liquidus and solidus lines are presented on a unified analytical basis [1].

The relevance of this work and its scientific novelty lie in the application of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient as a quantitative criterion for analyzing interatomic interactions in liquid metallic systems and constructing analytical expressions for crystallization lines. It is shown that the nature of deviations in the osmotic coefficient allows direct assessment of the nature of atomic interactions and the reliability of experimental data from phase diagrams. The proposed approach can be extended to multicomponent magnesium-containing systems and used to refine descriptions of phase equilibria of practical importance in metallurgy. This article is a continuation of [2], which examined a theoretical analysis of melt structure based on the behavior of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient for binary calcium systems.

Materials and methods

For a deeper understanding of the presented material, this text outlines the key equations of the methodology for the mathematical description of phase equilibrium lines, based on the Bjerrum-Guggenheim concept [1, 31 p.], [3].

The main formulas for calculating the compositions of the liquid and solid phases are given in the form of semi-empirical relationships:

$$\ln X_i^L = \frac{\frac{\Delta H_{m,i}}{R}\left(\frac{1}{T_{m,i}} - \frac{1}{T}\right)}{\Phi''_i} \quad (1)$$

$$\ln X_i^S = \frac{\Delta H_{m,i}}{R}\left(\frac{1}{T_{m,i}} - \frac{1}{T}\right)\cdot\left(\frac{1}{\Phi''_i} - \frac{1}{\Phi'_i}\right) \quad (2)$$

The developed approach to the mathematical description of lines of monovariant equilibria based on the Bjerum-Guggenheim concept has shown that along the liquidus and solidus lines, the behavior of the change in Φ_i differs. That is, if along the liquidus line only Van der Waals (intermolecular or interatomic interactions, which are inevitably present in the melt) forces of interaction between components dominate, then a linear dependence of Φ_i on a_i^L/a_i^S is observed:

$$\Phi_i = A_i + B_i \cdot a_i^L/a_i^S \quad (3)$$

In the case of directed interactions (associated with the emergence of hetero- and homopolarly bonds between components in the melt), the formation of various clusters

from the initial elements (association), or dissociation of the studied compound in the melt, a nonlinear dependence (4) must inevitably occur:

$$\Phi_i = A_i + B_i \cdot a_i^L/a_i^S + C/ a_i^L/a_i^S \quad (4)$$

All calculations were performed using programs written in Delphi.

Results and discussion

To calculate the numerical values of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient and to construct the plots of the dependence of Φ_i on activity, the initial phase-diagram data for the Mg–Si system were compiled (Table 1).

The magnesium-silicon phase diagram belongs to the class of eutectic phase diagrams with low solubility of silicon in magnesium (Figure 1) [4]. The general characteristics of the equilibrium phase diagram of Mg-Si are well established and generally accepted [5]. At the melting temperature of 1085 °C, a congruent compound Mg_2Si is formed in the Mg-Si system. The authors [6] determined the temperature dependences of heat capacity, entropy, and enthalpy of melting of silicides of alkaline – earth ($BaSi_2$) and transition metals (Fe_2Si, $Mn_{11}Si_{19}$) using semi-empirical methods [7, 8]. In this system, we considered two crystallization regions of the congruent compound Mg_2Si: the partial systems Mg-Mg_2Si and Si-Mg_2Si.

The initial data for the dependence of temperature on composition up to the eutectic line at 910.6 K are presented in Table 1. To calculate the activity using the Schröder - Le Chatelier equation for an ideal system, the following thermodynamic data were used: $\Delta H_m(Mg_2Si)$ = 90,244 J/mol, T_m = 1358 K [7, 221 p.].

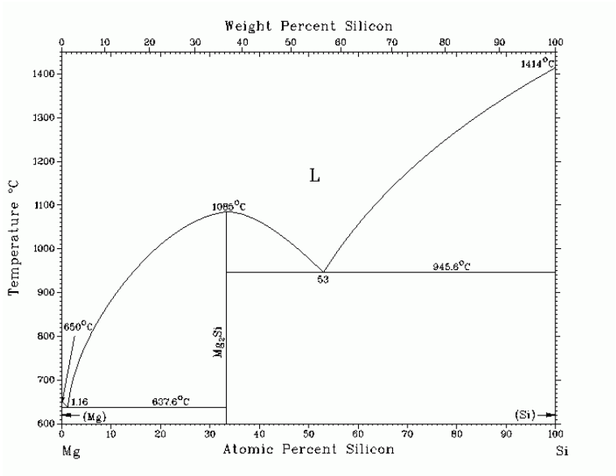


Figure 1 – Mg-Si phase diagram

Crystallization region of Mg_2Si for the particular Mg_2Si-Mg system.

When processing the initial liquidus and solidus line data by temperature (from the melting temperature of magnesium, 923 K, up to 1358 K for Mg_2Si) and composition (from 0.66 to 0.98 atomic fraction), a graph of the dependence of Φ''_{Mg} versus a^L_{Mg}/a^S_{Mg} was obtained (Figure 2) [9, 10].

The deviation from ideal behavior shifts toward negative values relative to Raoult's law. Since the coefficient Φ''_{Mg} characterizes the degree of deviation of the energetic state of magnesium from ideality under equilibrium conditions, the magnitude of this deviation increases with the strength of interparticle interactions between magnesium and the other components. This indicates that, in this region of the melt, strong interactions occur between magnesium and silicon atoms, leading to the formation of the chemical compound Mg_2Si.

It is evident that the solid solutions crystallizing in this region on the basis of the Mg_2Si compound contain an excess of one of the components relative to the stoichiometric composition of the compound. Within the homogeneity range, these solid solutions are unsaturated; therefore, the substitution process proceeds more intensively.

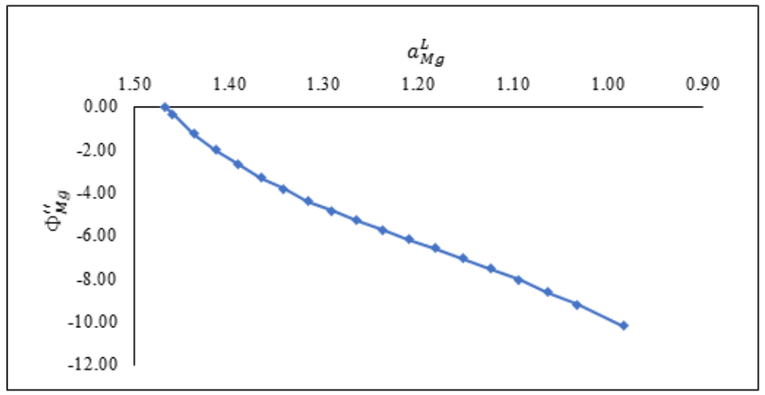


Figure 2 – Graph of the dependence of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient Φ''_{Mg} versus a^L_{Mg} of Mg crystallization for the basic Mg-Si system

The plot of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient of Φ''_{Mg} versus a^L_{Mg}/a^S_{Mg} of Mg crystallization for the basic Mg-Si system (Figure 2) showed that the formation of the compound gradually increases from the melting point of the congruent compound to the eutectic. When converting the initial composition data to the particular Mg_2Si-Mg system using formula 5 [1, 42 p.]:

$$x_1 = (Q_1 - (Q_1 + P_1).x_0)/((I_1 + J_1 - Q_1 - P_1).x_0 - I_1 + Q_1), \quad (5)$$

we obtained new composition data taking into account the formation of the Mg_2Si compound. The conversion factors for the particular Mg_2Si-Mg system: I = 2, J = 1, Q = 1, P = 0, are presented in Table 1. The tabulated data confirm that the recalculation

was performed correctly. When the compound is treated as an independent component and the phase diagram is divided into the two partial systems Mg_2Si–Mg and Mg_2Si–Si, each system can be represented in composition–temperature coordinates by taking the composition of the chemical compound Mg_2Si as 100 %. Consequently, at the melting temperature of Mg_2Si, the composition function of the liquid phase is equal to unity ($x^L_{Mg_2Si} = 1$).

After recalculating the composition in terms of compound formation, the numerical values of Φ''_{Mg_2Si} shifted into the positive region and exhibited a strong linear correlation. This behavior indicates that the chemical process of Mg_2Si formation has reached a stable state along the liquidus line. Therefore, as the temperature changes, the melt is governed predominantly by van der Waals interactions between the constituent particles, while no further significant chemical transformation occurs (Figure 3).

Table 1 – Initial data for the crystallization region of Mg_2Si for the particular Mg_2Si-Mg system

T. K						
1358	0.6666	0.6666	1.000	1.00000	0	0
1298	0.8	0.6666	0.333	0.69111	-2.04888	0.34001
1198	0.85	0.6666	0.214	0.34388	-4.43029	0.69839
1098	0.906	0.6666	0.116	0.15068	-6.21039	0.88266
1048	0.932	0.6666	0.079	0.09402	-7.09890	0.93445
998	0.954	0.6666	0.051	0.05596	-8.09016	0.97055
948	0.97	0.6666	0.032	0.03153	-9.26724	1.00701
910.6	0.98	0.6666	0.021	0.01970	-10.2462	1.01756

A new graph of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient was constructed for the particular Mg_2Si-Mg system (Figure 3).

The resulting calculated data were processed using the least squares method for linear regression for the Bjerrum – Guggenheim [1, 43 p.] osmotic coefficient Φ''_{Mg2Si} versus a^L_{Mg2Si} and presented graphically (Figure 3).

The mathematical expression for the osmotic coefficient Φ''_{Mg2Si} versus a^L_{Mg2Si} is presented as expression (6):

$$\Phi''_{calc} = 1.0384\text{-}1.0254 \cdot a^L_{Mg2Si},\ R_{xy} = -0.9997. \quad (6)$$

Using (6) and the Schröder - Le Chatelier equation for an ideal system (2) [1, 43 p.], we obtain a mathematical expression for the crystallization line of Mg2Si for the specific Mg_2Si -Mg system in the form of expression (7):

$$lnx^L_{Mg_2Si-Mg} = \frac{\frac{90244}{8.3143}\left(\frac{1}{1358}-\frac{1}{T}\right)+\int_T^{T_{m,i}}\left[\frac{1}{RT^2}\int_T^{T_{m,i}}\Delta C_p\, dT\right]dT}{1.0384-1.0254\cdot exp\left[\frac{90244}{8.3143}\left(\frac{1}{1358}-\frac{1}{T}\right)+\int_T^{T_{m,i}}\left[\frac{1}{RT^2}\int_T^{T_{m,i}}\Delta C_p\, dT\right]dT\right]}. \quad (7)$$

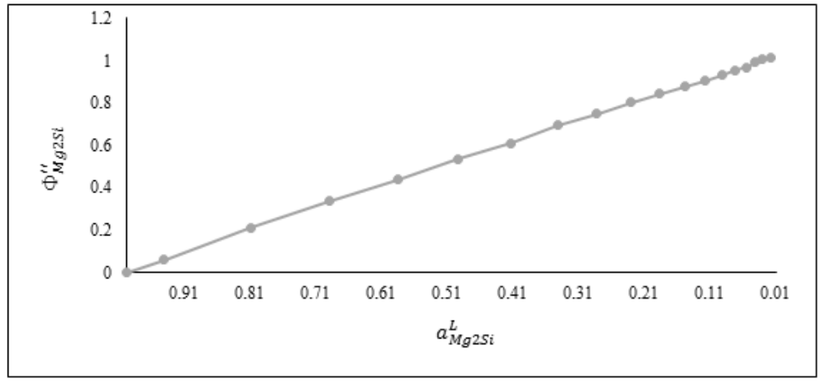


Figure 3 – Graph of the dependence of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient Φ''_{Mg_2Si} versus a^L_{Mg2Si} [1] on the crystallization of Mg_2Si for the particular Mg_2Si-Mg system

The obtained expressions (6) and (7) allow us to make a comparative analysis of the calculated and experimental data on the composition (Table 2).

Table 2 – Analysis of the agreement between calculated and experimental data for the Mg_2Si crystallization region within the Mg_2Si –Mg system.

T, K	$\Phi''_{Mg2Si,on}$	$\Phi''_{Mg2Si.calc.}$	a^L_{Mg2Si}	$x^L_{Mg2Si\ recalc.}$	$x^L_{Mg2Si.calc.}$
1358	0.0000	0.0134	1.00000	1.0010	1.0000
1298	0.3400	0.3300	0.69111	0.3330	0.3264
1198	0.6984	0.6859	0.34388	0.2140	0.2109
1148	0.8069	0.8009	0.23175	0.1610	0.1611
1098	0.8827	0.8840	0.15068	0.1160	0.1175
998	0.9706	0.9810	0.05596	0.0510	0.0529
948	1.0070	1.0061	0.03153	0.0320	0.0322
910.6	1.0176	1.0182	0.01970	0.0210	0.0211

Crystallization region of Mg_2Si-Si

The crystallization region of Mg_2Si for the particular Mg_2Si-Si system is quite small. Experimental data on composition and temperature were obtained up to the eutectic of 1218.3 K and are presented in Table 3.

Table 3 – Initial data for the crystallization region of Mg_2Si for the particular Mg_2Si - Si system

T, K	x^L_{Mg}	x^S_{Mg}	$x^L_{Mg_2Si}$	a^L_{Mg2Si}	Φ''_{Mg2Si}	Φ''_{Mg_2Si}
1358	0.6666	0.6666	1.000	1.00000	0	0.00000
1348	0.57	0.6666	0.663	0.94243	0.37874	0.14416
1298	0.526	0.6666	0.555	0.69111	1.55964	0.62721
1248	0.505	0.6666	0.510	0.49436	2.53748	1.04655
1218.3	0.488	0.6666	0.477	0.39991	2.93870	1.23659

The calculated data for Φ''_{Mg_2Si} versus a^L_{Mg2Si} (Figure 4) were processed using the least squares method (LSM) for linear regression. With a correlation coefficient R_{xy} = - 0.9998, the following mathematical dependence of the osmotic coefficient for the liquid - phase state (8) was obtained [1, 45 p.]:

$$\Phi''_{Mg_2Si} = 2.0486\text{-}2.0395 \cdot a^L_{Mg2Si} \quad (8)$$

The mathematical expression of the crystallization line of Mg_2Si for the particular system Mg_2Si-Si is presented by expression (9):

$$lnx^L_{Mg_2Si-Mg} = \frac{\frac{90244}{8{,}3143}\left(\frac{1}{1358}-\frac{1}{T}\right)+\int_T^{T_{m,i}}\left[\frac{1}{RT^2}\int_T^{T_{m,i}}\Delta C_p\, dT\right]dT}{2.0486-2.0395\cdot exp\left[\frac{90244}{8.3143}\left(\frac{1}{1358}-\frac{1}{T}\right)+\int_T^{T_{m,i}}\left[\frac{1}{RT^2}\int_T^{T_{m,i}}\Delta C_p\, dT\right]dT\right]} \quad (9)$$

By substituting the temperature values in the range of 1358 K to 1218.3 K into Equation (13), the calculated composition values of Mg_2Si were obtained.

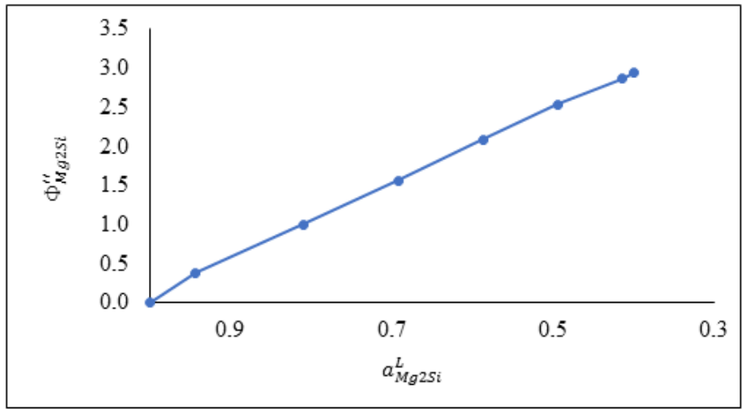


Figure 4 – Graph of the dependence of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficientΦ''_{Mg_2Si} versus a^L_{Mg2Si} on the crystallization of Mg_2Si for the particular Mg_2Si - Si system

Table 4 presents the calculated data for equations (8) and (9) and experimental data on composition and temperature.

Table 4 – Comparative Analysis of Calculated and Experimental Data for the Mg_2Si Crystallization Region of the Mg_2Si–Si Partial System

T, K	$\Phi''_{Mg,2Si,on}$	$\Phi''_{Mg,2Si,calc.}$	a^L_{Mg2Si}	$x^L_{Mg,recalc.}$	$x^L_{Mg,calc.}$
1358	0,0000	0,0091	1,0000	1,0000	1,0000
1348	0,1442	0,1265	0,9424	0,6630	0,6259
1323	0,3969	0,3978	0,8094	0,5870	0,5877
1298	0,6272	0,6391	0,6911	0,5550	0,5610
1273	0,8483	0,8526	0,5864	0,5330	0,5347
1248	1,0466	1,0404	0,4944	0,5100	0,5081
1223	1,2034	1,2046	0,4138	0,4800	0,4807
1218,3	1,2366	1,2330	0,3999	0,4770	0,4207

Thus, the obtained mathematical expressions describing the dependence of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient Φ''_{Mg_2Si} versus a^L_{Mg2Si} for the Mg_2Si crystallization lines of the two partial systems, Mg_2Si–Mg and Mg_2Si–Si, exhibited strong linear correlations with high correlation coefficients.

This type of versus relationship indicates that, in the melt along the liquidus line, the interactions are governed predominantly by van der Waals forces between the elementary structural units of the component under consideration and the second component. In other words, the dominant interactions occur between the congruently melting compound Mg_2Si and the parent components, magnesium and silicon.

Financing information

This research was carried out within the framework of the project of the Committee of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for 2025–2027. IRN AP 26194293

Conclusions

This work presents a mathematical modeling of crystallization lines in the region of the congruently melting compound Mg_2Si within the binary Mg–Si system based on the concept of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient.

It was shown that, in the Mg–Si system within the crystallization region of the congruent compound Mg_2Si, the dependence of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient on activity for the base system exhibits negative deviations from Raoult's law. This behavior indicates the intensive formation of the chemical compound Mg_2Si in the melt. Alloys located on either side of the stoichiometric composition of the Mg_2Si intermetallic compound form solid solutions possessing their own crystal structures, while their compositions remain close to the stoichiometric composition of the compound. Therefore, for the mathematical description of the liquidus line, the system was divided into the two partial systems that account for the formation of the intermetallic compound Mg_2Si.

The recalculation of compositions based on the formation of the congruent compound for the two partial systems, Mg_2Si–Mg and Mg_2Si–Si, revealed a linear dependence of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient on the activity of the liquid phase. This indicates that, with changing temperature, the melt is characterized predominantly by van der Waals interactions between the constituent particles.

Semi-empirical equations describing the crystallization lines of the congruently melting compound Mg_2Si were derived. In these equations, the numerator is represented by the Schröder–Le Chatelier equation for an ideal system, whereas the denominator contains the mathematical expression of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient. A comparative analysis of the calculated and experimental composition data demonstrated good agreement, thereby confirming the validity and reliability of the proposed method.

REFERENCES

1 **Байсанов, С. О.** Методы исследования линий гетерогенных фазовых равновесий на диаграмме состояния через осмотический коэффициент Бьеррума-Гуггенгейма [Текст] / С. О. Байсанов, В. В. Толоконникова, Г. И. Нарикбаева, И. Я. Корсукова // монография. – Караганда : Экожан, 2020. – 74 с.

2 **Baisanov, S. O., Lu, N. Y., Zhinova, Ye. V., Narikbaeva, G.** Thermodynamic analysis of phase diagrams based on the concert of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient // Acta Metallurgica Slovaca. – 2024. – Vol. 30. – № 2. – P. 77–89.

3 **Байсанов, С.** Теоретическое обоснование возможности изучения термодинамического применения приведенных коэффициентов Бьеррума-Гуггенгейма реакций восстановления элементов из жидких оксидных расплавов в металл: отчет о НИР (промежуточный) [Текст] / ХМИ имени Ж. Абишева: рук. Байсанов С.О.; исполн. Толоконникова В. В. и др. – Караганда, 2015. – 51 с. (Инв. № 0215РК01986).

4 **Rao, Yu. K., Belton, G. R.** Chemical metallurgy - a tribute to Karl Wagner, N. A. Gekchen, ed., AIME Metallurgical Society, 75–96 (1981). Published in Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys, 1988, and Bull. Alloy Phase Diagrams, 5(6), December 1984

5 **Самсонов, Г. В.** Силициды. [Текст] / Г. В. Самсонов, Л. А. Дворина, М. М. Рудь // – М.: Металлургия, 1979. – 272с.

6 **Салина, В. А.** Температурная зависимость теплоёмкости, энтальпия и энтропия плавления соединений $BaSi_2$, $Mn_{11}Si_{19}$, Fe_2Si. [Текст] / В. А. Салина, С. О. Байсанов // Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан. Серия химическая. – Алматы. – 2010. – № 2. – С. 7–10.

7 **Крестовников, А. Н.** Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций [Текст] / А. Н. Крестовников, Л. П. Владимиров, В. С. Гуляницкий, А. Я. Фишер // – М. : ГНТИ Литература по черной и цветной металлургии, 1968. – 416 с.

8 **Рузинов, Л. П.** Равновесные превращения металлургических реакций [Текст] / Л. П. Рузинов, В. С. Гуляницкий // – М. : Металлургия, 1975. – 417 с.

9 **Банных, О. А.** Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справочник [Текст] / О. А. Банных, П. Б. Будберг, С. П. Алисова и др. // – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.

10 **Лякишев, Н. П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст] / Под ред. Лякишева Н. П. // – М. : Машиностроение, 1996 г.

REFERENCES

1. Baisanov, S.O. Metody issledovaniya liniy geterogennykh fazovykh ravnovesiy na diagramme sostoyaniya cherez osmoticheskiy koeffitsiyent B'yerruma-Guggengeyma [Methods for studying lines of heterogeneous phase equilibria on the phase diagram using the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient: monograph] [Text] / S.O. Baisanov, V.V. Tolokonnikova, G.I. Narikbaeva, I.Ya. Korsukova // Karaganda : Ekozhan, 2020. – 74 p.

2 **Baisanov, S. O., Lu, N. Y., Zhinova, Ye. V., Narikbaeva, G.** Thermodynamic analysis of phase diagrams based on the concert of the Bjerrum-Guggenheim osmotic coefficient // Acta Metallurgica Slovaca. – 2024. – Vol. 30. – № 2. – P. 77–89.

3 **Baisanov, S.** Teoreticheskoye obosnovaniye vozmozhnosti izucheniya termodinami-cheskogo primeneniya privedennykh koeffitsiyentov B'yerruma-Guggengeyma reaktsiy vosstanovleniya elementov iz zhidkikh oksidnykh rasplavov v metall [Theoretical substantiation of the possibility of studying the thermodynamic application of the reduced Bjerrum-Guggenheim coefficients of the reduction reactions of elements from liquid oxide melts to metal] [Text] / R&D report (interim) CMI named after Zh. Abishev: supervised by Baysanov S. O.; executed by Tolokonnikova V.V. et al. // Karaganda, 2015. – 51 p. (Inv. № 0215PK01986).

4 **Rao, Yu. K., Belton, G. R.** Chemical metallurgy – a tribute to Karl Wagner, N. A. Gekchen, ed., AIME Metallurgical Society, 75–96 (1981). Published in Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys, 1988, and Bull. Alloy Phase Diagrams, 5(6), December 1984.

5 **Samsonov, G. V.** Silitsidy [Silicides] [Text] / G. V. Samsonov, L. A. Dvorina, M. M. Rud // Moscow: Metallurgy, 1979. – 272 p.

6 **Salina, V. A.** Temperaturnaya zavisimost' teployomkosti, ental'piya i entropiya plavleniya soyedineniy $VaSi_2$, $Mn_{11}Si_{19}$, Fe_2Si [Temperature dependence of heat capacity, enthalpy and entropy of melting of $BaSi_2$, $Mn_{11}Si_{19}$, Fe_2Si compounds] [Text]. / V. A. Salina, S. O. Baysanov // Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Chemical Series. – Almaty. – 2010. – № 2. – P. 7–10.

7 **Krestovnikov, A. N.** Spravochnik po raschetam ravnovesiy metallurgicheskikh reaktsiy [Handbook of calculations of equilibria of metallurgical reactions] [Text] / A. N. Krestovnikov, L. P. Vladimirov, V. S. Gulyanitsky, A. Ya. Fisher // Moscow: GNTI Literature on Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy, 1968. – 416 p.

8 **Ruzinov, L. P.** Ravnovesnyye prevrashcheniya metallurgicheskikh reaktsiy [Equilibrium Transformations of Metallurgical Reactions] [Text] / L. P. Ruzinov, V. S. Gulyanitsky // Moscow: Metallurgy, 1975. – 417 p.

9 **Bannykh, O. A.** Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: spravochnik [Phase Diagrams of Binary and Multicomponent Iron-Based Systems: Handbook] [Text] / O. A. Bannykh, P. B. Budberg, S. P. Alisova, et al. //. – Moscow: Metallurgy, 1986. – 440 p.

10 **Lyakishev, N. P.** Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskikh sistem [Phase Diagrams of Binary Metallic Systems] [Text] / Ed. by Lyakishev N. P. // Moscow: Mashinostroenie, 1996.

Received 02.03.26.
Received in revised form 11.04.26.
Accepted for publication 22.07.26.

В. В. Толоконникова[1], С. Байсанов[2], О. Б. Кенжалиев[3],
****А. С. Орлов[4], В. А. Салина[5]***
[1,2,4]Ж. Әбішев атындағы Химия–металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3]Қарағанды индустриялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;
[5]Академик Н. А. Ватолин атындағы металлургия институты РҒА УО
Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.
Поступило в редакцию 02.03.26.
Поступило с исправлениями 11.04.26.
Принято в печать 22.07.26.

MG–SI ЖҮЙЕСІНДЕГІ КРИСТАЛДАНУДЫ БЬЕРРУМ–ГУГГЕНГЕЙМ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ ТҰРҒЫСЫНАН МОДЕЛЬДЕУ

Бұл жұмыстың мақсаты – Бьеррум–Гуггенгеймнің осмостық коэффициентінің мінез-құлық заңдылықтарына негізделе отырып, Mg–Si бинарлық жүйесіндегі ликвидус және солидус сызықтарын сипаттаудың математикалық тәсілін валидациялау. Сұйық магний–кремний қорытпаларының құрылымдық және термодинамикалық ерекшеліктері осы тұжырымдама аясында талданады, бұл ерітіндінің идеал мінез-құлқынан ауытқуын сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді. Осмостық коэффициенттің сандық мәндері фазалық диаграмманың эксперименттік деректерін, Шрёдер–Ле Шателье теңдеуін және компоненттердің стандартты термодинамикалық қасиеттерін пайдалану арқылы есептелді. Mg_2Si конгруэнтті қосылысының кристалдануы кезінде балқымада айқын атомаралық өзара әрекеттесулер байқалады, бұл осмостық коэффициенттің бірліктен теріс ауытқуларымен сипатталады. Mg_2Si–Mg және Mg_2Si–Si қосалқы жүйелері үшін температура, құрам және осмостық коэффициент арасындағы жоғары корреляция коэффициенттерімен сипатталатын сызықтық тәуелділіктер анықталды. Алынған нәтижелер кристалдану сызықтарының аналитикалық өрнектерін алуға мүмкіндік береді және ұсынылған термодинамикалық модельдеу тәсілінің Mg–Si жүйесіндегі фазалық тепе-теңдікті болжауда қолдануға жарамдылығын растайды.

Кілтті сөздер: күй диаграммалары, ликвидус және солидус сызықтары, бьеррум-Гуггенгеймнің осмостық коэффициенті, математикалық модель, белсенділік.

В. В. Толоконникова[1], С. Байсанов[2], О. Б. Кенжалиев[3],
****А. С. Орлов[4], В. А. Салина[5]***
[1,2]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[3]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау;
[5]Институт металлургии имени академика Н. А. Ватолина УО РАН,
Российская Федерация, г. Екатеринбург.
Received 02.03.26.
Received in revised form 11.04.26.
Accepted for publication 22.07.26.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ MG–SI С ПОЗИЦИИ КОНЦЕПЦИИ БЬЕРРУМА–ГУГГЕНГЕЙМА

Целью данной работы является валидация математического подхода к описанию линий ликвидуса и солидуса в бинарной системе Mg–Si на основе закономерностей поведения осмотического коэффициента Бьеррума–Гуггенгейма. Структурные и термодинамические особенности жидких магний–кремниевых сплавов анализируются в рамках данной концепции, что позволяет количественно характеризовать отклонения от идеального поведения раствора. Численные значения осмотического коэффициента рассчитываются с использованием экспериментальных данных фазовой диаграммы, уравнения Шрёдера–Ле Шателье и табличных термодинамических свойств компонентов. Особое внимание уделено кристаллизации конгруэнтного соединения Mg_2Si, при которой в расплаве проявляются выраженные межатомные взаимодействия, приводящие к существенным отрицательным отклонениям осмотического коэффициента от единицы. Для подсистем Mg_2Si–Mg и Mg_2Si–Si установлены сильные линейные корреляционные зависимости между температурой, составом и осмотическим коэффициентом, характеризующиеся высокими коэффициентами корреляции. Полученные зависимости позволяют вывести аналитические выражения для линий кристаллизации и подтверждают применимость предложенного термодинамического подхода для прогнозирования фазовых равновесий в системе Mg–Si.

Ключевые слова: диаграммы состояния, линии ликвидус и солидус, осмотический коэффициент Бьеррума-Гуггенгейма, математическая модель, активность.

МРНТИ 53.31.21

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/472-487

Н. А. Улмаганбетов[1], М. С. Алмагамбетов[2],
А. А. Мырзагалиев[3], Д. А. Исагулова[4]
[1,2,3]ТОО «ERG Research and Development», Республика Казахстан, г. Актобе;
[4]Карагандинский технический университет имени Абылкасы Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4747-9381
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3167-3462
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1749-5154
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0166-0225
*e-mail: Nursultan.Ulmaganbetov@erg.kz

ОКУСКОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЖЕСТКОЙ ЭКСТРУЗИИ

В работе рассматривается возможность окускования мелкодисперсных хромсодержащих материалов ферросплавного производства методом жёсткой экструзии. Актуальность исследования обусловлена увеличением объёмов пылевидных и шламовых отходов, образующихся в металлургическом переделе, а также необходимостью их возврата (рециклинга) в технологический цикл без ухудшения условий плавки. Непосредственное использование таких материалов в исходном виде в плавильных агрегатах затруднено вследствие низкой газопроницаемости шихтового слоя, повышенного пылеуноса и нестабильности технологических показателей. Целью работы являлась сравнительная оценка эффективности бентонитового и полимерного связующих при получении брэксов из хромсодержащей пыли и определение металлургической применимости полученного продукта. В качестве исходного сырья использовали пыль газоочистных и аспирационных систем Актюбинского завода ферросплавов АО «ТНК Казхром», входящего в состав ERG. Промышленные испытания выполняли на действующем участке экструзии с использованием оборудования J. C. Steele and Sons. В качестве связующих применяли бентонит в количестве 10 мас. % и полимерное связующее ТД 021.005.БС в количестве 2,5 мас. %. Качество брэксов оценивали по геометрической форме, структурной целостности, а также прочности на удар и истирание по ГОСТ 15137-77 после 2 и 4 суток выдержки. Установлено, что применение полимерного связующего обеспечивает получение брэксов с более правильной формой, лучшей сохранностью структуры и более высокими прочностными характеристиками по сравнению с образцами на бентонитовой связке. Для оценки поведения брэксов в условиях металлургического передела выполнено термодинамическое моделирование плавки высокоуглеродистого феррохрома в программном комплексе FactSage 8.4. Расчёты показали, что замена промпродукта брэксами не приводит к существенным изменениям равновесного состава металлической и шлаковой фаз, а также расчётной вязкости шлака. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность применения полимерного связующего при жёсткой экструзии хромсодержащих пылей и перспективность использования полученных брэксов в действующей схеме ферросплавного производства.

Ключевые слова: жёсткая экструзия; хромсодержащая пыль; брэксы; полимерное связующее; бентонит; высокоуглеродистый феррохром; рециклинг; термодинамическое моделирование.

Введение

В металлургическом переделе растёт объём мелкодисперсных пылевидных и шламовых материалов, что связано с изменением качества сырья и интенсификацией технологических процессов [1]. В исходном виде такие фракции трудно использовать в печах: они ухудшают газопроницаемость шихтового слоя, усиливают пылеунос и повышают нестабильность плавки [2].

Для возврата дисперсного сырья в производство применяют холодное брикетирование, агломерацию, окомкование и экструдирование [3; 4; 5; 6]. Среди этих способов жёсткая вакуумная экструзия отличается возможностью переработки ультрадисперсных материалов без обжига, высокой производительностью и работой с материалами влажностью до 18 % [7; 8; 9].

Технология жёсткой вакуумной экструзии была адаптирована из керамического производства для металлургических задач; её эффективность определяется сочетанием давления 2,0-4,0 МПа, влажности смеси 12–16 % и вакуумирования, повышающего плотность и прочность свежесформованных брэксов [10; 11]. Одним из ключевых требований к брэксам как компоненту шихты является механическая прочность при транспортировке, загрузке и участии в металлургическом переделе [12].

На участке экструзии АктЗФ АО «ТНК Казхром» брэксы используются как подшихтовка при выплавке высокоуглеродистого феррохрома. Практика показала, что действующая схема с бентонитовым связующим сопровождается недостаточной прочностью брэксов, образованием мелочи при перевалке и повышенной остаточной влажностью. Поскольку термообработка брэксов на участке не предусмотрена, актуальны безобжиговые способы упрочнения с применением специальных связующих.

Для бентонитовых окатышей повышение прочности обычно достигается обжигом, что в условиях рассматриваемого участка затруднительно [13]. Поэтому особый интерес представляют полимерные органические связующие: они способны формировать клеящие плёнки и полимерные цепи между частицами, повышая холодную и эксплуатационную прочность окускованного сырья [14; 15; 16; 17; 18].

В работе рассмотрено водорастворимое полимерное связующее ТД 021.005. БС. Его точный рецептурный состав изготовителем не раскрывается, поэтому в настоящей работе приводится функциональная характеристика связующего. Полимерная основа содержит карбоксильные и амидные группы, способные взаимодействовать с поверхностью мелкодисперсных минеральных частиц. При увлажнении связующее улучшает смачивание и распределение частиц в смеси, а в процессе экструзии способствует образованию межчастичных контактных

мостиков. По мере выдержки и удаления влаги формируется непрерывная полимерная плёнка (матрица), которая фиксирует частицы, препятствует разрушению сформованной структуры и повышает прочность брэксов без дополнительного обжига [14; 15; 16; 17; 18].

Цель настоящей работы - сравнительно оценить эффективность бентонитового и полимерного связующих при получении брэксов из хромсодержащей пыли АктЗФ и определить металлургическую применимость полученного продукта с использованием промышленного испытания и термодинамического моделирования в FactSage 8.4.

Материалы и методы

Анализ исходного сырья.

Исходным сырьём для производства брэксов на участке экструзии служит пыль с газоочистных и аспирационных установок плавильных цехов. Средний химический состав сырья, применявшегося в период ОПЭ, представлен в таблице 1. Химический состав был определен титриметрическим методом (МВИ 08Х-18, МВИ 04Х-22).

Таблица 1 – Средний химический состав исходной пыли

Материал	W	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	C	S	P	ППП*
Исходное сырье (пыль)	0,79	28,89	10,59	1,47	20,75	6,39	10,71	10,15	0,26	0,01	10

*ППП – потеря при прокаливании

Описание оборудования.

В состав участка экструзии входят дозаторы КЛИМ-ВД-800-1500 и КЛИМ-ВД-800-2200, глиномялки 25А PUGMILL (22,4 кВт), 25А STAND ALONE (45 кВт) и 25А (45 кВт), экструдер 25 BEX C-25B, а также конвейерные ленты К1 и К4. Оборудование обеспечивает дозирование компонентов, сухое и влажное перемешивание смеси, корректировку влажности и формование брэксов через фильеры.

На рисунке 1 ниже приведена технологическая схема производства брэксов на АктЗФ.

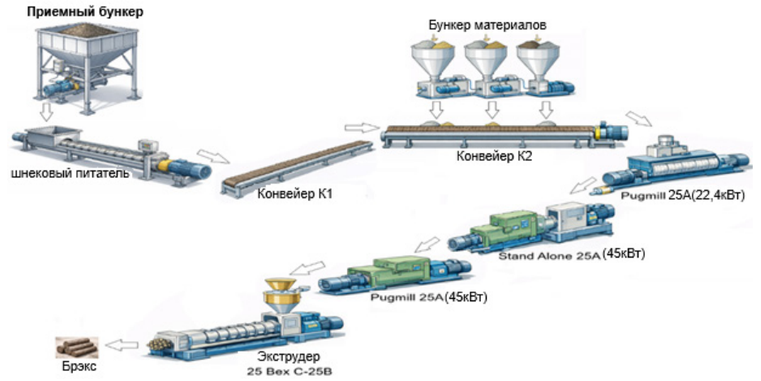


Рисунок 1 – Технологическая схема линии производства брэксов АктЗФ

Описание методов испытаний.

Для экструдирования пыли использовали несколько видов связующих материалов: бентонит в количестве 10 % как базовое связующее, а также полимерное связующее ТД 021.005.БС в количестве 2,5 % от массы материала.

Промышленные испытания были проведены непосредственно на участке экструзии на действующем оборудовании производства «J. C. Steele and Sons».

Исходный материал из приёмного бункера шнековым питателем подаётся на конвейеры К1 и К2, где дозируется связующий материал. Далее смесь последовательно проходит сухое перемешивание, увлажнение и окончательное влажное перемешивание, после чего направляется в экструдер. Внешний вид брэксов с бентонитом и с полимерным связующим представлен на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 – Брэксы с добавкой бентонита



Рисунок 3 – Брэксы с полимерным связующим ТД 021.005.БС

После формования брэксы вылеживаются в закромах до 4 суток и затем отправляются на переплав в плавильную печь. По истечении 2 и 4 суток были отобраны пробы брэксов для определения прочностных характеристик на удар и истирание согласно ГОСТ 15137-77. На рисунке 4 ниже представлены результаты определения прочности на удар брэксов с бентонитом и полимером ТД 021.005.БС.

В статье приведены фактические показатели промышленного опробования отдельных партий брэксов. Массив параллельных определений, необходимый для расчёта средних значений, стандартных отклонений и доверительных интервалов, в рамках данного этапа не был сформирован. В связи с этим статистическая обработка результатов не выполнялась. В последующих испытаниях планируется проведение не менее трёх параллельных определений для каждого варианта связующего и срока выдержки.

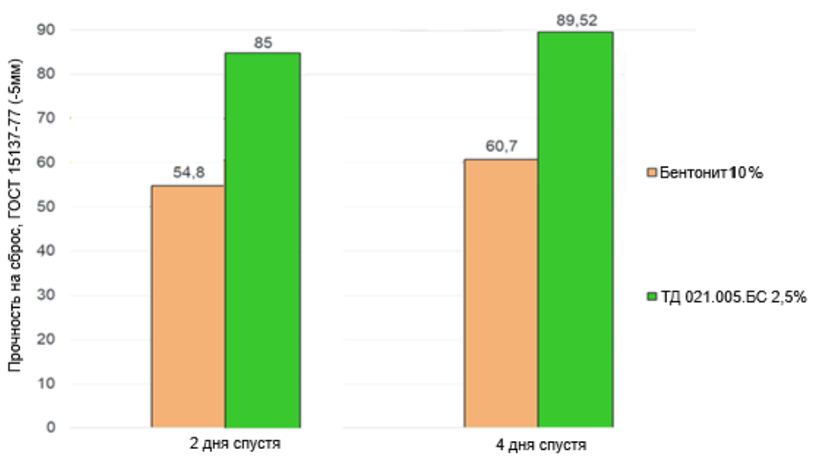


Рисунок 4 – Показатели прочности брэксов на удар спустя 2 и 4 суток

Прочность на удар определяли в соответствии с ГОСТ 15137–77. Данный метод основан на механическом воздействии на образец во вращающемся стальном барабане с последующим ситовым анализом для оценки изменения гранулометрического состава, характеризующего способность материалов сопротивляться ударным и истирающим нагрузкам. Методика определения прочности на удар и истирание происходит следующим образом: образец массой 10 кг загружается в стальной барабан диаметром 1000 мм, вращающийся со скоростью 25 об/мин. По истечении 200 оборотов образец выгружается и рассеивается на ситах с размерами +5 мм, 0,5–5 мм и −0,5 мм. Каждая фракция взвешивается отдельно, после чего показатель прочности рассчитывали по следующей формуле:

$$I = \frac{M_{+5}}{M_{исх}} \cdot 100\%$$

где I– показатель прочности, %;
M_{+5} – масса фракции крупнее 5 мм;
$M_{исх}$ – исходная масса образца.

Фракция +5 мм характеризует прочность на удар, фракция −0,5 мм отражает прочность на истирание. В соответствии с внутризаводским регламентом значение прочности брэксов при испытании на удар должно быть не ниже 85 %.

Термодинамическое моделирование.

Для оценки металлургической применимости брэксов выполнено термодинамическое моделирование плавки высокоуглеродистого феррохрома (ВУФХ) в программном комплексе FactSage 8.4, модуль Equilib. Целью расчёта было определить фазовые превращения при нагреве шихты, состав металлической и шлаковой фаз в интервале 1600–1700 °C, а также влияние замены промпродукта брэксами при сохранении общего химического баланса шихты.

В качестве исходных данных использован расчетный материальный баланс стандартной шихты, включающей рудную часть и углеродистый восстановитель. Данные по химическому составу исходных материалов и результатам расчета шихты представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Технический состав восстановителя

Шихтовые материалы	Технических состав, %				
	A^c	V^c	$C_{тв}$	W	S
Кокс металлургический	11,86	1,15	86,55	6,54	0,4
Спецкокс	6,94	1,35	91,49	12,64	0,2

Таблица 3 – Химический состав рудных и возвратных материалов

Материалы	Доля	Химический состав, %							
		Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	S	P_2O_5
Хромовая руда	44,44	42,67	10,68	6,33	0,39	20,96	10,22	0,039	0,0025
Окатыши 6-12 мм	44,44	50,34	8,36	6,6	0,44	18,8	12,38	0,027	0,027
Пром. продукт	11,11	28,45	15,48	4,22	0,3	25,48	10,09	0,017	0,0031
Брэксы		28,73	10,46	7,31	1,28	19,42	9,23	0,24	0,01

Моделирование выполнено в модуле Equilib с учетом возможного образования газовой, металлической, шлаковой и твердых фаз. Расчеты проведены при атмосферном давлении в диапазоне температур 500–2000 °С с шагом 100 °С, что позволило проследить динамику изменения фазового состава системы при нагреве.

На рисунке 5 представлена температурная зависимость фазового и химического состава системы, полученная в результате термодинамического моделирования процесса плавки ВУФХ. Видно, что с увеличением температуры происходит последовательное восстановление оксидов железа и хрома с образованием металлической фазы и интенсивным выделением CO, при этом в области высоких температур формируется устойчивое состояние «металл–шлак–газ», характерное для промышленного режима плавки

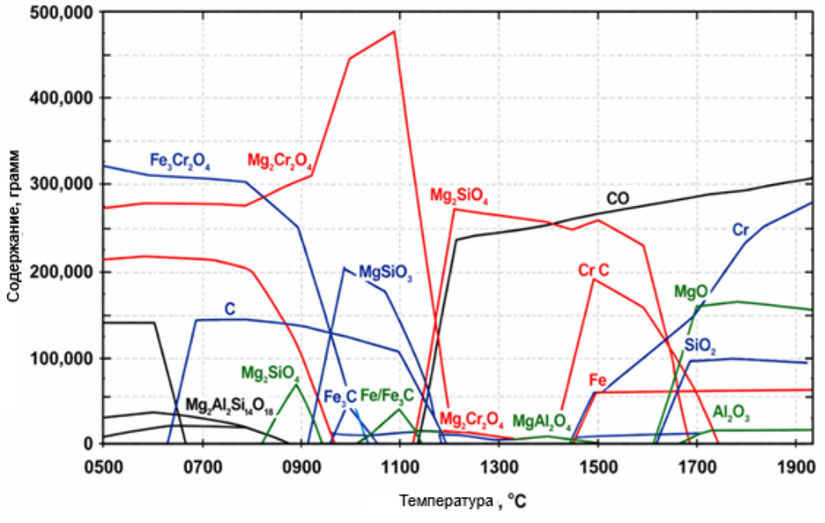


Рисунок 5 – Изменение фазового состава системы шихты при нагреве в процессе термодинамического моделирования плавки ВУФХ

По результатам моделирования при 500–800 °С система представлена преимущественно твёрдыми оксидными и шпинельными фазами. В интервале 800–1200 °С начинается восстановление FeO с ростом количества CO и частичным переходом железа в металлическое состояние. При 1200–1500 °С усиливается восстановление Cr_2O_3, формируется металлическая фаза, обогащённая хромом и железом, и появляется жидкий магнезиально-кремнеземистый шлак.

В рабочем интервале 1600–1700 °С система стабилизируется как «металл-шлак-газ»: металл представлен жидким высокоуглеродистым феррохромом, шлак - высокомагнезиальным расплавом $MgO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$ с низким содержанием FeO, а газовая фаза преимущественно CO. Это соответствует физико-химическим закономерностям промышленной плавки ВУФХ.

Сравнение состава металла при стандартной шихте и при добавке брэксов.

Для оценки влияния замены промпродукта (при стандартном режиме шихтовки) на брэксы выполнено сопоставление равновесного состава металлической фазы.

Таблица 4 – Сравнение химического состава металла при стандартной шихте и с брэксами, масс %

Вариант шихты	Cr,	Si	C	S	P
Стандартный	72,46	0,64	8,17	0,012	0,026
Брэксы	72,61	0,71	8,01	0,035	0,027

Полученные данные показывают, что химический состав металла соответствует марке ФХ 800 и ФХ 850 высокоуглеродистого феррохрома. Замена промпродукта на брэксы не оказывает существенного влияния на содержание хрома и углерода в металлической фазе.

Сравнение состава шлака при стандартной шихте и при добавке брэксов.

Химический состав шлака при добавке брэксов представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение состава шлака, масс. %

Вариант шихты	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	Расчетная вязкость, Па*с
Стандартный	3,49	28,08	13,82	3,65	50,13	0,81	0,066
Брэксы	3,40	27,96	14,24	3,13	50,46	0,77	0,067

Анализ данных таблицы показывает, что составы шлаков при использовании брэксов практически совпадают со стандартным вариантом. Во всех случаях формируются высокомагнезиальные шлаки с близкими содержаниями MgO, SiO_2 и Al_2O_3, что указывает на сохранение традиционного характера шлака, применяемого в действующей технологии. Для каждого варианта шихты дополнительно была определена расчетная вязкость шлака в рабочем температурном интервале плавки. Полученные значения вязкости практически идентичны и находятся в диапазоне

0,066–0,067 Па·с, что подтверждает отсутствие негативного влияния применения брикетов и брэксов на свойства шлакового расплава.

Итоги термодинамического моделирования.

Проведенное термодинамическое моделирование показало, что процесс плавки высокоуглеродистого феррохрома протекает с формированием устойчивой системы «металл–шлак–газ», характерной для промышленного режима работы печей. Замена промпродукта в стандартной технологии на брэксы не оказывает существенного влияния на химический состав металла и шлака, а также на свойства шлакового расплава. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность применения брэксов в действующей схеме плавки ВУФХ.

Результаты и обсуждение

Промышленные испытания показали выраженное влияние типа связующего на качество формования и механическую устойчивость брэксов. После 2 суток выдержки прочность на удар брэксов с 10 % бентонита составила 54,8 %, тогда как при использовании 2,5 % полимерного связующего ТД 021.005.БС достигла 85,0 %. После 4 суток значения составили соответственно 60,7 и 89,52 %. Таким образом, преимущество полимерного связующего составило 30,2 процентного пункта после 2 суток и 28,82 процентного пункта после 4 суток. Брэксы с полимером уже после 2 суток достигли установленного внутризаводского норматива 85 %, тогда как образцы с бентонитом не соответствовали этому требованию в оба срока выдержки.

Визуальная оценка согласуется с результатами барабанных испытаний: полимерсодержащие брэксы имели более ровную геометрическую форму, большую длину и лучше сохраняли структурную целостность. Повышение прочности связано с адсорбцией полимерных цепей на поверхности частиц и формированием после удаления влаги пространственной связующей матрицы. Такая матрица равномерно распределяет нагрузку между частицами и ограничивает развитие локальных зон разрушения. Бентонит в условиях безобжиговой технологии обеспечивает преимущественно физико-механическое сцепление частиц; без последующего термического упрочнения сформированные контакты оказались недостаточными для достижения требуемой ударной прочности.

Термодинамическое моделирование использовали как предварительную оценку металлургической применимости брэксов. Подробная температурная последовательность формирования фаз приведена выше, поэтому в настоящем разделе сопоставлены только ключевые показатели стандартной и опытной шихты. При замене промпродукта брэксами расчётное содержание хрома в металле изменилось с 72,46 до 72,61 %, углерода – с 8,17 до 8,01 %, Cr_2O_3 в шлаке – с 3,49 до 3,40 %, а вязкость шлака – с 0,066 до 0,067 Па·с. Незначительный характер различий показывает, что введение брэксов при сохранении общего химического баланса шихты не должно существенно изменять равновесные характеристики металлической и шлаковой фаз.

Следует учитывать, что расчёт FactSage характеризует равновесное состояние закрытой системы и не учитывает кинетику восстановления, фактическое

время пребывания материалов в печи, массоперенос, электрический режим и механическое разделение металла и шлака. Поэтому результаты моделирования подтверждают отсутствие явных термодинамических ограничений, но не заменяют опытно-промышленную проверку брэксов в плавильном агрегате.

Ограничения исследования и направления дальнейшей работы.

На данном этапе качество брэксов оценивали по геометрической форме, структурной целостности и прочности на удар и истирание. Кажущаяся и истинная плотность, открытая пористость, водопоглощение, прочность при сжатии и термическая устойчивость не определялись. Их исследование необходимо для более полной характеристики структуры и эксплуатационных свойств брэксов.

Кроме того, в работе не представлены результаты опытно-промышленных плавок с систематической регистрацией извлечения хрома, состава металла и шлака, расхода электроэнергии, пылеуноса и выхода мелочи. Проведение таких плавок является следующим этапом исследования и позволит экспериментально проверить выводы термодинамического моделирования.

Предварительная экономическая оценка.

Расход бентонита в исследованной технологии составлял 10 % от массы исходного сырья, а полимерного связующего ТД 021.005.БС – 2,5 %. В пересчёте на 1 т перерабатываемой пыли это соответствует 100 кг бентонита и 25 кг полимерного связующего. Таким образом, удельный расход полимерного связующего в четыре раза ниже, а масса вводимого связующего сокращается на 75 кг на 1 т исходного материала.

При стоимости бентонита 140 000 тг/т затраты на связующее составляют 14 000 тг на 1 т перерабатываемой пыли. Стоимость ТД 021.005.БС составляет 540 000 тг/т, однако вследствие его меньшего расхода соответствующие затраты составляют 13 500 тг/т пыли. Следовательно, прямые затраты на полимерное связующее ниже на 500 тг/т, или приблизительно на 3,6 %, по сравнению с применением бентонита.

Дополнительным преимуществом полимерного связующего является практически полное отсутствие привноса минеральной составляющей в шихту. Бентонит, напротив, содержит минеральные компоненты, которые переходят в шлаковую фазу и могут оказывать влияние на количество и химический состав шлака. Применение полимерного связующего позволяет уменьшить поступление балластных компонентов и сохранить химический баланс металлургической шихты.

Выводы

По результатам промышленных испытаний установлено, что применение 2,5 % полимерного связующего ТД 021.005.БС обеспечивает получение брэксов с более правильной формой, лучшей структурной целостностью и существенно большей прочностью по сравнению с 10 % бентонита. Прочность на удар после 2 и 4 суток составила соответственно 85,0 и 89,52 % для полимерного связующего против 54,8 и 60,7 % для бентонита.

Термодинамическое моделирование показало, что замена промпродукта брэксами при сохранении общего химического баланса шихты практически не изменяет расчётный состав металла и шлака и вязкость шлакового расплава. Эти результаты подтверждают термодинамическую допустимость применения брэксов, однако требуют проверки в опытно-промышленных плавках.

Расход полимерного связующего составляет 25 кг/т пыли против 100 кг/т бентонита. Прямые затраты составляют 13 500 и 14 000 тг/т соответственно, что обеспечивает экономию около 3,6 %. Дополнительным преимуществом полимера является отсутствие значительного привноса минеральных компонентов в шлак.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Zhumagaliyev, Y., Shabanov, Y., Almagambetov, M., Jundibayev, M., Ulmaganbetov, N., Laikhan, S., Jundibayeva, A., Abilberikova, A., Ubaidulayeva, N., Adaibayeva, R.** Processing of secondary raw materials from ferrochrome production via agglomeration and study of their mechanical properties // Metals. – 2025. – Vol. 15. – № 8. – Article 878. – https://doi.org/10.3390/met15080878.

2 **Ulmaganbetov, N. A., Almagambetov, M. S., Dossekenov, M., Myrzagaliev A. A., Zhdanov, R., Laikhan, S.** Remelting ferrochrome-crushing dust // Acta Metallurgica Slovaca. – 2024. – Vol. 30. – № 4. – P. 148–151. – https://doi.org/10.36547/ams.30.4.2069.

3 **Назимко, Е. И.** Окускование материалов как метод использования различных отходов // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования. - Симферополь: Ариал, 2019. – С. 367–373.

4 **Diez, M. A., Alvarez, R., Cimadevilla, J. L. G.** Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // Fuel. – 2013. – Vol. 114. – P. 216–223. – https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.018.

5 **Brozova, S., Pustejovska, P., Bilik, J., Jursova, S., Zbrankova, M., Havranek, J.** Innovated technologies of recycling of metallic wastes – modification of existing industrial processes // New Trends in Production Engineering. – 2019. – Vol. 2. – № 2. – P. 361–367. – https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0100.

6 **Murthy, Y. R., Kapure, G. U., Tripathy, S. K., Sahu, G. P.** Recycling of ferromanganese gas cleaning plant sludge by agglomeration // Waste Management. – 2018. – Vol. 80. – P. 457–465. – https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.023.

7 **Мадыгина, Л. Ю., Тырцева, К. Е., Олейникова, Л. Н., Горбунов, А. В.** Производство экструзионных брикетов на основе торфяного сырья. – Екатеринбург: УГГУ, 2016. – 202 с.

8 **Bizhanov, A. M., Pavlov, A. V., Bishenov, S. A.** Stiff vacuum extrusion agglomeration in ferro-alloys production // INFACON XV. – Cape Town, 2018. – P. 114–124.

9 **Bizhanov, A. M., Kurunov, I. F.** Extrusion briquettes (BREX): a new stage in pelletizing raw materials. – Moscow: Metallurgizdat, 2017. – 234 p.

10 **Bizhanov, A. M., Kurunov, I. F., Ivonin, D. V., Efimov, V. I.** Structure formation in extrusion briquettes (BREX) // Geotekhnologiya. Izvestiya TulGU. – 2013. – № 2. – P. 1–8.

11 **Bizhanov, A. M.** Обоснование выбора технологии производства и исследование металлургических свойств брикетов: дис. канд. техн. наук. – Москва, 2016. – 180 с.

12 **Bizhanov, A. M., Kurunov, I. F., Durov, N. M., Nushtaev, D. V., Ryzhov, S. A.** Study of the mechanical strength of brex. Part 1 // Metallurgist. – 2012. – Vol. 56. – P. 489–493. – https://doi.org/10.1007/s11015-012-9603-y

13 **Вайнштейн, Р. М.** Исследование технологии производства железорудных окатышей с органическим связующим: дис. канд. техн. наук. – М. : 2004. –160 с.

14 **Zhang, G., Sun, Y., Xu, Y.** Review of briquette binders and briquetting mechanism // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 477–487. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072.

15 **Kuskov, V., Kuskova, Y., Udovitsky, V.** Effective processing of iron ores // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 21. – Article 02010. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102010

16 **Хадыев, Я. А., Антонова, М. В.** Влияние состава связующего на свойства композиционного материала // Молодежь и XXI век. – Курск, 2020. – С. 411–413.

17 **Юленков, Н. С., Муравский, А. А., Литосов, Г. Э.** Свойства композиций полиакриламида и пентанпентаола // Наука сегодня: задачи и пути их решения. – Вологда, 2019. – С. 52–53.

18 **Аксенова, В. В., Алимбаев, С. А., Павлов, А. В., Мустафин, Р. М.** Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов органическими связующими // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 5. – С. 323–329. – https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329.

19 **Eisele, T. C., Kawatra, S. K.** A review of binders in iron ore pelletization // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2003. – Vol. 24. – № 1. – P. 53–55. – https://doi.org/10.1080/08827500306896.

REFERENCES

1 **Zhumagaliyev, Y., Shabanov, Y., Almagambetov, M., Jundibayev, M., Ulmaganbetov, N., Laikhan, S., Jundibayeva, A., Abilberikova, A., Ubaidulayeva, N., Adaibayeva, R.** Processing of secondary raw materials from ferrochrome production via agglomeration and study of their mechanical properties // Metals. – 2025. – Vol. 15. – № 8. – Article 878. – https://doi.org/10.3390/met15080878.

2 **Ulmaganbetov, N. A., Almagambetov, M. S., Dossekenov, M., Myrzagaliev A. A., Zhdanov, R., Laikhan, S.** Remelting ferrochrome-crushing dust // Acta Metallurgica Slovaca. – 2024. – Vol. 30. – № 4. – P. 148–151. – https://doi.org/10.36547/ams.30.4.2069.

3 **Nazimko, E. I.** Okuskovanie materialov kak metod ispolzovaniya razlichnykh otkhodov [Agglomeration of materials as a method for using various wastes] / E. I. Nazimko // Aktualnye problemy bioraznoobraziya i prirodopolzovaniya [Current Problems of Biodiversity and Nature Management]. – Simferopol : Arial, 2019. – P. 367–373.

4 **Diez, M. A., Alvarez, R., Cimadevilla, J. L. G.** Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // Fuel. – 2013. – Vol. 114. – P. 216–223. – https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.018.

5 **Brozova, S., Pustejovska, P., Bilik, J., Jursova, S., Zbrankova, M., Havranek, J.** Innovated technologies of recycling of metallic wastes – modification of existing industrial processes // New Trends in Production Engineering. – 2019. – Vol. 2. – № 2. – P. 361–367. – https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0100.

6 **Murthy, Y. R., Kapure, G. U., Tripathy, S. K., Sahu, G. P.** Recycling of ferromanganese gas cleaning plant sludge by agglomeration // Waste Management. – 2018. – Vol. 80. – P. 457–465. – https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.023.

7 **Madygina, L. Yu.** Proizvodstvo ekstruzionnykh briketov na osnove torfyanogo syrya [Production of extrusion briquettes based on peat raw materials] / L. Yu. Madygina, K. E. Tyrtseva, L. N. Oleynikova, A. V. Gorbunov. – Ekaterinburg : Ural State Mining University, 2016. – 202 p.

8 **Bizhanov, A. M., Pavlov, A. V., Bishenov, S. A.** Stiff vacuum extrusion agglomeration in ferro-alloys production // INFACON XV. – Cape Town, 2018. – P. 114–124.

9 **Bizhanov, A. M., Kurunov, I. F.** Extrusion briquettes (BREX): a new stage in pelletizing raw materials. – Moscow: Metallurgizdat, 2017. – 234 p.

10 **Bizhanov, A. M., Kurunov, I. F., Ivonin, D. V., Efimov, V. I.** Structure formation in extrusion briquettes (BREX) // Geotekhnologiya. Izvestiya TulGU. – 2013. – № 2. – P. 1–8.

11 **Bizhanov, A. M.** Обоснование выбора технологии производства и исследование металлургических свойств брикетов: дис. канд. техн. наук. – М. : 2016. – 180 с.

12 **Bizhanov, A. M., Kurunov, I. F., Durov, N. M., Nushtaev, D. V., Ryzhov, S. A.** Study of the mechanical strength of brex. Part 1 // Metallurgist. – 2012. – Vol. 56. – P. 489–493. – https://doi.org/10.1007/s11015-012-9603-y

13 **Vaynshteyn, R. M.** Issledovanie tekhnologii proizvodstva zhelezorudnykh okatyshey s organicheskim svyazuyushchim [Study of the production technology of iron ore pellets with an organic binder] : Cand. Sci. (Eng.) diss. / R. M. Vaynshteyn. – Moscow, 2004. – 160 p.

14 **Zhang, G., Sun, Y., Xu, Y.** Review of briquette binders and briquetting mechanism // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 477–487. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072.

15 **Kuskov, V., Kuskova, Y., Udovitsky, V.** Effective processing of iron ores // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 21. – Article 02010. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102010

16 **Khadyev, Ya. A.** Vliyanie sostava svyazuyushchego na svoystva kompozitsionnogo materiala [Influence of binder composition on the properties of a composite material] / Ya. A. Khadyev, M. V. Antonova // Molodezh i XXI vek [Youth and the 21st Century]. – Kursk, 2020. – P. 411–413.

17 **Yulenkov, N. S.** Svoystva kompozitsiy poliakrilamida i pentanpentaola [Properties of polyacrylamide and pentanpentaol compositions] / N. S. Yulenkov, A. A. Muravsky, G. E. Litosov // Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya [Science Today: Tasks and Ways to Solve Them]. – Vologda, 2019. – P. 52–53.

18 **Aksenova, V. V.** Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders / V. V. Aksenova, S. A. Alimbaev, A. V. Pavlov, R. M. Mustafin // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. – 2021. – Vol. 64, № 5. – P. 323–329. – https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329.

19 **Eisele, T. C., Kawatra, S. K.** A review of binders in iron ore pelletization // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2003. – Vol. 24. – № 1. – P. 53–55. – https://doi.org/10.1080/08827500306896.

Поступило в редакцию 30.05.26.
Поступило с исправлениями 30.06.26.
Принято в печать 11.08.26.

Н. А. Ұлмағанбетов[1], М. С. Алмағамбетов[2],
А. А. Мырзағалиев[3], Д. А. Исагулова[4]
[1,2,3]ЖШС «ERG Research and Development»,
Қазақстан Республикасы, Ақтобе қ.;
[4]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
30.05.26 ж. баспаға түсті.
30.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
11.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ ХРОМҚҰРАМДЫ МАТЕРИАЛДАРДЫ ҚАТАҢ ЭКСТРУЗИЯ ӘДІСІМЕН КЕСЕКТЕУ

Бұл жұмыста ферроқорытпа өндірісінің ұсақ дисперсті хромқұрамды материалдарын қатаң экструзия әдісімен кесектеу мүмкіндігі қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі металлургиялық өңдеу кезінде түзілетін шаң тәрізді және шламды қалдықтар көлемінің артуымен, сондай-ақ балқыту жағдайларын нашарлатпай оларды технологиялық циклге қайта қайтару, яғни рециклингтеу қажеттілігімен негізделеді. Мұндай материалдарды бастапқы күйінде балқыту агрегаттарында тікелей пайдалану шихта қабатының газ өткізгіштігінің төмендігіне, шаңның қарқынды ұшып шығуына және технологиялық көрсеткіштердің тұрақсыздығына байланысты қиындық туғызады.

Жұмыстың мақсаты хромқұрамды шаңнан брэкстер алу кезінде бентонитті және полимерлі байланыстырғыштардың тиімділігін салыстырмалы бағалау және алынған өнімнің металлургиялық қолдануға жарамдылығын анықтау болды. Бастапқы шикізат ретінде ERG құрамына кіретін «ТҰК Қазхром» АҚ Ақтөбе ферроқорытпа зауытының газтазалау және аспирациялық жүйелерінің шаңы пайдаланылды. Өнеркәсіптік сынақтар J. C. Steele and Sons жабдығы қолданылатын қолданыстағы экструзия учаскесінде жүргізілді. Байланыстырғыш ретінде 10 масс. % мөлшерінде бентонит және 2,5 масс. % мөлшерінде ТД 021.005.БС полимерлі байланыстырғышы қолданылды.

Брэкстердің сапасы геометриялық пішіні, құрылымдық тұтастығы, сондай-ақ 2 және 4 тәулік ұсталғаннан кейін ГОСТ 15137-77 бойынша соққыға және қажалуға беріктігі арқылы бағаланды. Полимерлі байланыстырғышты қолдану бентонитті байланыстырғыш негізіндегі үлгілермен салыстырғанда пішіні негұрлым дұрыс, құрылымы жақсы сақталған және беріктік сипаттамалары жоғары брэкстер алуға мүмкіндік беретіні анықталды.

Брэкстердің металлургиялық өңдеу жағдайындағы мінез-құлқын бағалау үшін FactSage 8.4 бағдарламалық кешенінде жоғары көміртекті феррохром балқыту үдерісінің термодинамикалық модельдеуі орындалды. Есептеулер өнеркәсіптік аралық өнімді брэкстермен алмастыру металл және қож фазаларының тепе-теңдік құрамына, сондай-ақ қождың есептік тұтқырлығына елеулі өзгерістер енгізбейтінін көрсетті. Алынған нәтижелер хромқұрамды шаңдарды қатаң экструзиялау кезінде полимерлі байланыстырғышты қолданудың технологиялық тұрғыдан тиімді екенін және алынған брэкстерді ферроқорытпа өндірісінің қолданыстағы сызбасында пайдаланудың перспективалы екенін растайды.

Кілтті сөздер: қатаң экструзия, хромқұрамды шаң, брэкстер, полимерлі байланыстырғыш, бентонит, жоғары көміртекті феррохром, рециклинг, термодинамикалық модельдеу.

N. A. Ulmaganbetov[1], M. S. Almagambetov[2],
A. A. Myrzagaliyev[3], D. A. Isagulova[4]
[1,2,3]LLP «ERG Research and Development», Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[4]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 30.05.26.
Received in revised form 30.06.26.
Accepted for publication 11.08.26.

AGGLOMERATION OF FINELY DISPERSED CHROMIUM-CONTAINING MATERIALS BY STIFF EXTRUSION

The paper examines the agglomeration of finely dispersed chromium-containing materials from ferroalloy production by stiff extrusion. The relevance of the study is associated with the growing amount of dust and sludge waste generated during metallurgical processing and the need to recycle these materials into the technological cycle without worsening smelting conditions. Direct charging of such materials into furnaces is limited by low gas permeability of the charge layer, increased dust carryover, and unstable process parameters.

The aim of the work was to compare the efficiency of bentonite and polymer binders in producing BREX from chromium-containing dust and to assess the metallurgical applicability of the product. Dust from the gas-cleaning and aspiration systems of the Aktobe Ferroalloys Plant of TNC Kazchrome JSC, a member of ERG, was used as the raw material. Industrial trials were conducted at an operating extrusion site equipped with J. C. Steele and Sons machinery. Bentonite was added at 10 wt. %, while the TD 021.005.BS polymer binder was added at 2.5 wt. %.

BREX quality was evaluated by geometric shape, structural integrity, and resistance to impact and abrasion according to GOST 15137-77 after 2 and 4 days of curing. The results showed that the polymer binder produced BREX with a more regular shape, better structural preservation, and higher strength characteristics than the bentonite-based samples.

To assess BREX behavior under metallurgical conditions, thermodynamic modeling of high-carbon ferrochrome smelting was performed in FactSage 8.4. The calculations showed that replacing the intermediate product with BREX did not significantly affect the equilibrium composition of the metal and slag phases or the calculated slag viscosity. The results confirm the technological feasibility of using a polymer binder for stiff extrusion of chromium-containing dusts and indicate the potential of the resulting BREX for use in existing ferroalloy production under current industrial conditions.

Keywords: stiff extrusion, chromium-containing dust, BREX, polymer binder, bentonite, high-carbon ferrochrome, recycling, thermodynamic modeling.

МРНТИ 53.39.01

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/488-500

***А. С. Уркунбай[1], Е. А. Кожахметов[2], Г. О. Нұрақова[3],
Е. Д. Даулетханов[4], М. Р. Мухаметхан[5]**

[1,2,4,5]Центр превосходства «VERITAS» Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Шәкәрім университет, Республика Казахстан, г. Семей.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7868-2393
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6778-1898
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9534-8899
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5632-0391
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9377-3398
*e-mail: urkunbay@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО TiC МЕТОДОМ ИПС ПОСЛЕ ПЛАНЕТАРНОГО СМЕШИВАНИЯ С $(NH_4)_2CO_3$

В данной работе получены пористые материалы на основе карбида титана методом механического смешивания порошковых компонентов с последующим искровым плазменным спеканием с использованием карбоната аммония в качестве порогена. Проведён комплексный анализ влияния параметров планетарного помола, включая скорость вращения и продолжительность обработки, а также размера частиц порогена на морфологические характеристики порошковых смесей, фазовый состав и особенности формирования пористой структуры после спекания. Особое внимание уделено оценке степени гомогенизации системы, характеру агломерации частиц и сохранности исходных компонентов в процессе механической обработки.

Установлено, что режимы планетарного смешивания оказывают определяющее влияние на распределение порогена в объёме порошковой системы и последующее формирование пористой архитектуры материала. Показано, что применение умеренных режимов смешивания способствует формированию рыхлой и равномерно распределённой порошковой структуры без существенной деградации карбоната аммония. Усиление механического воздействия на смесь порошков приводит к частичному разложению порогена и ухудшению контролируемости порообразования.

Это, в свою очередь, обеспечивает контролируемое разложение карбоната аммония и формирование однородной открытой пористости при искровом плазменном спекании. В результате установлены оптимальные технологические параметры подготовки порошков, обеспечивающие рациональный баланс между гомогенностью смеси, стабильностью фазового состава и воспроизводимостью пористой архитектуры материала.

Ключевые слова: карбид титана, пористые материалы, планетарная шаровая мельница, карбонат аммония, искровое плазменное спекание.

Введение

Аэрокосмическая, нефтехимическая, металлургическая и медицинская отрасли формируют устойчивый запрос на материалы с нетривиальным набором характеристик высокой прочностью, химической инертностью и одновременно развитой проницаемостью. Это непростое сочетание. Пористые структуры с регулируемой архитектурой применяются в фильтрации, катализе и теплоизоляции [1; 2]. Ключевой технологической проблемой при их создании остаётся поиск баланса между степенью пористости, механической прочностью и проницаемостью, поскольку повышение одного параметра, как правило, ухудшает другой. Порошковая металлургия позволяет прецизионно управлять этим балансом, обеспечивая воспроизводимый контроль над микроструктурой на всех стадиях синтеза. Формование и спекание остаются здесь основными операциями [3].

Среди тугоплавких соединений особое место занимает карбид титана (TiC), обладающий высокой твердостью, химической инертностью и термической стабильностью до 1000 °C. Это делает его перспективной основой для работы в экстремально агрессивных средах [3; 4]. Что делает его переспективным претендентом для создания пористой структуры.

Эксплуатационные свойства таких материалов определяются общей пористостью, размером, формой и взаимосвязанностью пор. Для создания фильтров критически важно формирование открытой пористости. Сочетание порогенов с методом искрового плазменного спекания (ИПС) позволяет прецизионно управлять структурой проницаемых материалов [5]. Технология ИПС, основанная на импульсном нагреве, существенно снижает температуру и длительность консолидации, что позволяет сохранить мелкозернистую структуру каркаса.

Для получения ультрачистой керамики эффективным порогеном является карбонат аммония, способный к полному разложению на газы при низких температурах. Это исключает необходимость химической очистки и риск загрязнения пор. Использование карбоната аммония позволяет варьировать пористость в широких пределах, при этом проницаемость напрямую зависит от концентрации порогена и режимов спекания [6; 7; 8].

Равномерность распределения пор обеспечивается на этапе подготовки смеси в планетарных мельницах. Интенсивное механическое перемешивание позволяет достичь высокой гомогенизации и предотвратить агломерацию частиц [9; 10]. Оптимизация параметров помола позволяет сформировать стабильную систему без деградации порогена [1; 11; 12].

При консолидации пористых систем на основе TiC, в отличие от металлического титана [7; 11], требуется особо тщательный контроль температурных полей для обеспечения прочности межчастичных перешейков [6; 7; 8]. Использование специальных режимов ИПС в сочетании с предварительной планетарной обработкой открывает путь к созданию высокоэффективных проницаемых материалов с прогнозируемыми свойствами [13].

Несмотря на имеющиеся работы, влияние режимов предварительной механической обработки на сохранность порогена и итоговую пористую структуру после ИПС изучено недостаточно. Целью данной работы является исследование влияния параметров планетарного смешивания на сохранность карбоната аммония и формирование пористой структуры карбида титана при искровом плазменном спекании.

Материалы и методы

В качестве основного порошкового материала использовался карбид титана (TiC) с чистотой 99,9 % производства Hebei Suoyi New Material Technology Co., Ltd. (КНР) со средним размером частиц около 0.5 мкм. В качестве порогена применялся карбонат аммония (NH4)2CO3 с исходным размером частиц порядка 250 мкм [14].

Для получения мелкодисперсной фракции карбоната аммония размером 40–50 мкм предварительное измельчение и классификация осуществлялись на вибрационном грохоте Fritsch Analysette 3 spartan.

Механическое смешивание порошков проводилось в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette Premium Line 7. Параметры смешивания приведены в таблице 1 и выбраны исходя из необходимости обеспечения гомогенизации порошковой системы при минимизации механотермической деградации карбоната аммония.

Таблица 1 – Параметры механического смешивания

Наименование	Параметры
Скорость смешивания	150/200/250 об/мин
Режим смешивания 5 мин	5 × (1 мин + 1 мин пауза)
Режим смешивания 10 мин	5 × (2 мин + 2 мин пауза)
Соотношение шариков и порошка, мас.%	10:1
Диаметр шаров, мм	5

Полученные порошковые смеси подвергались предварительному холодному подпрессовыванию при нагрузке 40 кН. Искровое плазменное спекание проводилось на установке GeniCore Compact 70 kN с графитовым тиглем, внутренний диаметр которого составляет 40 мм, при постоянном давлении 2 кН в два этапа. Первый этап удаление порогена скорость нагрева 50 °C/мин, температура удаления порогена 100 °C, выдержка 10 минут. Второй этап спекание скорость нагрева 100 °C/мин, температура 1300 °C, выдержка 5 минут [1; 6; 11; 12; 15].

Морфологию и характер агломерации порошков изучали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе TESCAN MIRA LMS (Brno, Чехия).

Фазовый состав и структурное состояние порошков анализировали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре X›Pert PRO (Malvern Panalytical Empyrean, Almelo, Нидерланды) с использованием CuKα-излучения (λ = 1,5406 Å).

Плотность полученных компактов определяли двумя методами. Первоначально рассчитывали геометрическую плотность () на основе измерений массы и объёма образцов правильной геометрической формы. Для более точной оценки пористости определяли относительную плотность (, %), представляющую собой отношение к теоретической плотности беспористого карбида титана (4.92 г/см3).

Основным методом измерения плотности служило аналитические весы Vibra HT 224 RCE с приставкой для гидростатического взвешивания.

Результаты и обсуждение

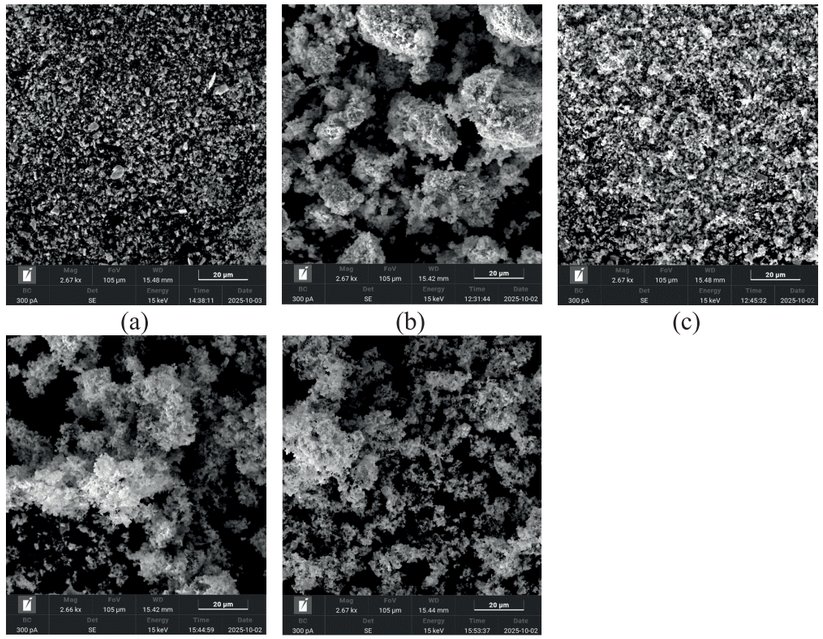
Сравнительный анализ СЭМ-изображений исходного порошка TiC и композитной смеси TiC+$(NH_4)_2CO_3$ демонстрирует значительное влияние режимов механической обработки в планетарно-шаровой мельнице на морфологию и степень агломерации частиц.

При обработке смеси со скоростью 150 об/мин в течение 10 минут Рис. 1(b) наблюдается образование плотных агломератов, состоящих из мелкодисперсных частиц, консолидированных в компактные кластерные структуры [10].

Увеличение скорости вращения до 200 об/мин при сохранении времени обработки (Рис. 1c) приводит к существенному уменьшению среднего размера агломератов и достижению более однородного их распределения в объёме порошка. Данный факт свидетельствует об интенсификации процессов диспергирования и фрагментации крупных частиц, а также о повышении степени гомогенизации всей порошковой системы [10; 13].

На фотографиях, представленных на Рис. 1(d) и (e), полученных при скоростях механической обработки 250 об/мин (10 мин) и 200 об/мин (5 мин) соответственно, наблюдается формирование рыхлой, пористой и хлопьевидной морфологии порошка. Процесс характеризуется образованием вторичных композитных агломератов, в ходе которого мелкодисперсные частицы карбида титана (TiC) адгезируют к более крупным и пластичным фрагментам карбоната аммония ($(NH_4)_2CO_3$) с характерным размером 40–50 мкм, формируя на их поверхности покрывающий слой. Указанный механизм агломерации обусловливает возникновение выраженной пористой, комковатой структуры материала. Следует отметить, что повышенная концентрация $(NH_4)_2CO_3$ в системе интенсифицирует эффект поверхностной зарядки частиц, что визуально проявляется в увеличении яркости на изображениях и свидетельствует о неоднородном распределении электростатического заряда по поверхности порошкового материала.

Полученные морфологические изменения свидетельствуют о том, что при повышении интенсивности механического воздействия возрастает вероятность локального повышения температуры в зоне контакта частиц и шаров, что приводит к частичной деградации карбоната аммония. Одновременно усиливается эффект механического покрытия крупных частиц порогена мелкодисперсным карбидом титана, формируя композитные агломераты с выраженной рыхлой структурой.

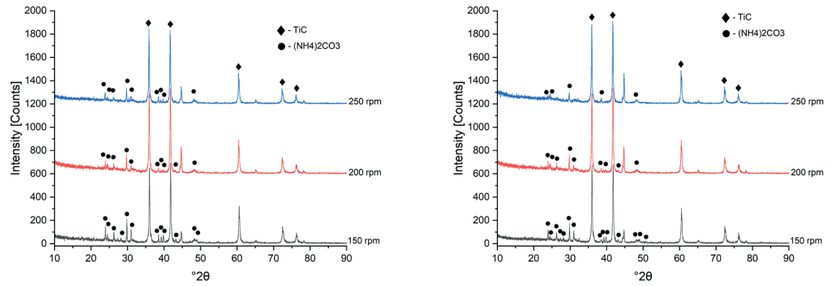


(a) (b) (c)

(d) (e)

Рисунок 1 – Снимки (a) исходный TiC, Смеси TiC и $(NH_4)_2CO_3$ 40–50мкм (b) после смешивания при 150 об и 10 мин, (c) после смешивания при 200 об и 10 мин, (d) после смешивания при 250 об и 10 мин, (e) после смешивания при 200 об и 5 мин

Анализ полученных рентгенодифракционных данных позволяет выявить закономерности, связанные с условиями механического смешивания порошков. На полученных дифрактограммах отчетливо прослеживается зависимость интенсивности пиков карбоната аммония от скорости вращения планетарно-шаровой мельницы. При увеличении числа оборотов и продолжительности обработки наблюдается снижение количества и интенсивности пиков, соответствующих карбонату аммония, в смесях с частицами $(NH_4)_2CO_3$ размером 40–50 мкм Рис. 2(a) и (b). Вероятнее всего, это обусловлено частичным разложением или испарением карбоната аммония в результате теплового и механического воздействия, возникающего в процессе интенсивного помола в планетарно-шаровой мельнице [9; 10].



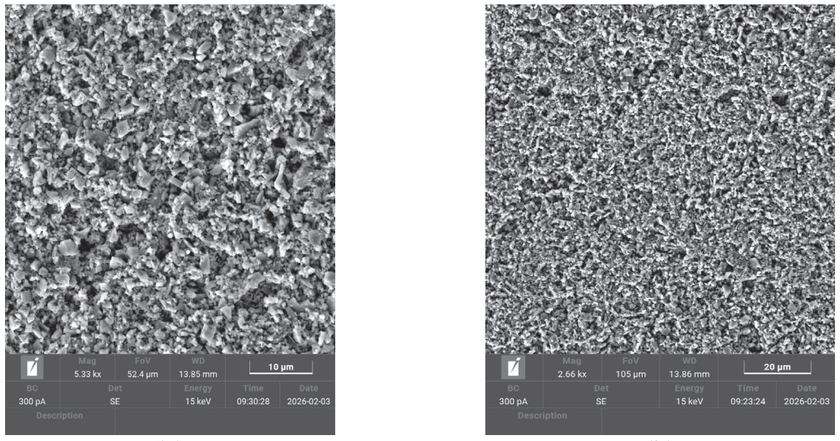
(a) (b)

Рисунок 2 – Снимки XRD TiC+$(NH_4)_2CO_3$ при 150, 200, 250 об (a) 40–50мкм 5мин, (b) 40–50мкм 10 мин

Из XRD анализа можно заключить, что наиболее эффективным сочетанием параметров для достижения равномерного смешивания порошков для смеси TiC+$(NH_4)_2CO_3$ является время 5 минут при скорости вращения 150 об/мин. Этот режим обеспечивает оптимальный баланс между сохранностью карбоната аммония и выраженностью пиков карбида титана.

Микроструктурный анализ поверхности образцов карбида титана, полученных методом ИПС, подтвердил формирование развитой пористой структуры. Поверхность спечённого материала характеризуется выраженной топографической неоднородностью. Это обусловливается чередованием пор и межпоровых перегородок. Снимки СЭМ свидетельствует о сохранении пористого каркаса материала после завершения процесса ИПС.

Межпоровые перегородки образованы частицами исходного TiC, соединёнными посредством сформированных контактных шеек. Данная морфология является характерным признаком протекания начальной и промежуточной стадий твёрдофазного спекания, при которых не наблюдается интенсивной уплотнения материала и роста зёрен. Структура сохраняет дисперсный характер, а межпоровые перегородки демонстрируют наличие микропористости. Рис. 3(a) и (b). Полученные результаты подтверждают формирование пористого материала из карбида титана [7; 11].



(a) (b)

Рисунок 3 – СЭМ снимки после искрового плазменного спекания карбида титана (a)10мкм, (b)20мкм

Согласно данным работы [15], размер пор в спечённом TiC приблизительно соответствует размеру частиц использованного порогена, а поры по всему объёму материала соединены между собой окнами, обеспечивая открытую взаимосвязанную пористость. Применение карбоната аммония с размером частиц 40–50 мкм, как в настоящей работе, соответствует формированию пор аналогичного масштаба.

Рентгенодифракционный анализ после искрового плазменного спекания показал что характерные пики $(NH_4)_2CO_3$ полностью исчезли. Что свидетельствует о полном термическом разложении и отсутствии остаточных фаз порогена в спечённом материале. Основной фазой спечённых образцов остаётся карбид титана с кубической кристаллической решёткой, при этом образование вторичных фаз или продуктов окисления не обнаружено Рис. 4. Отмечается увеличение интенсивности дифракционных пиков TiC по сравнению с исходным порошком Рис. 2(a). Это может быть связано с повышением степени кристалличности, снижением микродеформаций и ростом размера когерентно рассеивающих областей в результате термомеханического воздействия в процессе ИПС [13].

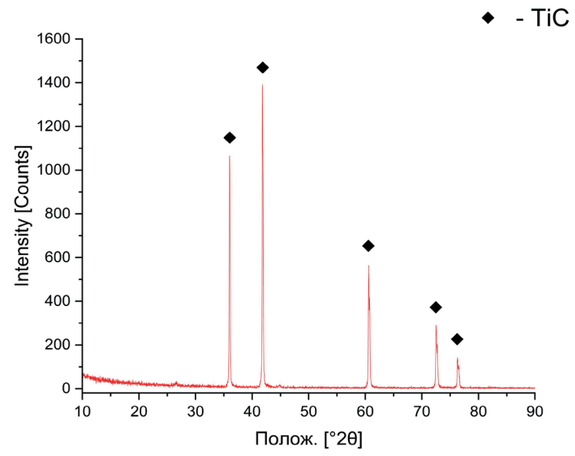


Рисунок 4 – Снимки XRD после искро плазменного спекания карбида титана

Из вышесказанного следует что микроструктурный и рентгенодифракционный анализ подтвердили формирование пористого каркаса TiC без остаточных фаз карбоната аммония. Для количественного подтверждения пористости и сопоставления с расчётным содержанием порогена была проведена оценка плотности образцов.

Для гидростатического взвешивания и последующих расчётов получены количественные результаты такие как масса образца в воздухе $m_а$ =5,70 г, масса в дистиллированной воде $m_в$ =1,87 г. По формуле Архимеда определена объёмная плотность (1).

$$\rho_{об} = \frac{m_а}{m_а - m_в} \cdot \rho_в = \frac{5{,}7\ г}{5{,}7\ г - 1{,}87\ г} \cdot 1{,}00\ г/см^3 = 1{,}488\ г/см^3 \qquad (1)$$

Используя теоретическую плотность TiC $\rho_{теор}$=4,93 $г/см^3$, находим общую пористость по формуле (2).

$$\rho_{общ} = \left(1 - \frac{\rho_{об}}{\rho_{теор}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1{,}488\ г/см^3}{4{,}93\ г/см^3}\right) \cdot 100\% = 69{,}81\% \qquad (2)$$

Вычисленное значение общей пористости 69,81% хорошо согласуется с проектным содержанием порогена 75%, расхождение составляет ≈5,2 п.п., что типично для данного класса материалов. В работах [8; 15] при аналогичных условиях спекания TiC с карбонатом аммония получена пористость 66–84 % и 74–76 % соответственно. Для указанного диапазона пористости предел прочности на изгиб составляет ~2–18 МПа и закономерно снижается с ростом пористости [8]. Это свидетельствует о формировании в настоящей работе материала с характеристиками, типичными для высокопористой керамики на основе TiC.

Выводы

В ходе исследования были определены оптимальные условия подготовки и смешивания порошков карбида титана с карбонатом аммония для получения материала с заданной пористой структурой. Из эксперементов было установлены режимы планетарного смешивания смеси порошков TiC + $(NH_4)_2CO_3$ при 150 об/мин в течение 5 минут обеспечивает наилучшую гомогенизацию и сохранение порогена. Повышение скорости до 200–250 об/мин приводит к частичной деградации карбоната аммония из-за интенсивного механического воздействия.

Искровое плазменное спекание (ИПС) при температуре 1300 °C позволяет сформировать устойчивый каркас без образования вторичных фаз. Согласно данным РФА, в процессе спекания происходит полное разложение порогена, а TiC остается единственной кристаллической фазой. При этом наблюдается рост интенсивности дифракционных пиков, что свидетельствует о повышении степени кристалличности и снижении микродеформаций решетки.

Результаты СЭМ-анализа подтверждают наличие развитой открытой пористости. Структура представлена частицами TiC, соединенными контактными шейками. Выраженного роста зерен или избыточного уплотнения не зафиксировано, что указывает на сохранение дисперсной микроструктуры после ИПС.

Метод гидростатического взвешивание показал общую пористость на уровне 69,81 %, что практически соответствует расчетному содержанию порогена. Подводя итоги выбранная методика от планетарного смешивания до ИПС является эффективным подходом к получению пористых материалов на основе карбида титана с воспроизводимой архитектурой пор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Chen, B. et al.** Research and improvement of SPS spark plasma sintering equipment //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – Vol. 2483. – № 1. – P. 012039. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/2483/1/012039

2 **Sari, W., Sari, M., Yusuf, Y.** The cell viability assay analysis and physicochemical characterization of porous hydroxyapatite scaffold using honeycomb and paraffin wax as polymeric porogen for bone tissue engineering //Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology. – 2022. – T. 13. – №. 1. – P. 015013. – https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac5d43

3 **Munir, Z. A., Anselmi-Tamburini, U., Ohyanagi, M.** The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method //Journal of materials science. – 2006. – Vol. 41. – № 3. – P. 763–777. – https://doi.org/10.1007/s10853-006-6555-2

4 **Yu, M., Li, G., Saunders, T.** Biomorphic wood-derived titanium carbides prepared by physical vapor infiltration-reaction synthesis //Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – № 8. – P. 11459–11464. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.273

5 **Lakshmi D. S. et al.** Emerging trends in porogens toward material fabrication : Recent progresses and challenges //Polymers. – 2022. – Vol. 14. – № 23. – P. 5209. – https://doi.org/10.3390/polym14235209

6 **Shustov V. S.** Titanium carbide based metal-ceramic material with porous layered structure //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 558. – № 1. – P. 012048. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/558/1/012048

7 **Анкудинов А. Б. и др.** Зависимость характеристик пористого титана, изготовленного из порошка TiH 2, от условий спекания и содержания порообразователя в исходной смеси //Neorganičeskie materialy. – 2024. – Vol. 60. – № 1. – С. 16–24. – https://doi.org/10.31857/S0002337X24010037

8 **Шустов, В. С., и др.** Прочность и проницаемость пористого материала на основе субмикронного порошка карбида титана // Neorganičeskie materialy. – 2022. – Vol. 58. – № 10. – P. 1047–1052. – https://doi.org/10.31857/S0002337X22100128

9 **Leś K., Opaliński I.** Prospective application of response surface methodology for predicting high-energy mixing process conditions towards fine powders flow improvement //Advances in Science and Technology. Research Journal. – 2021. – Vol. 15. – № 1. – P. 134–143. – https://doi.org/10.12913/22998624/130897

10 **Zohari S. et al.** Application of spark plasma sintering (SPS) for the fabrication of in situ Ni–TiC nanocomposite clad layer //Journal of alloys and compounds. – 2015. – Vol. 633. – P. 479–483. – https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.276

11 **Fujii T. et al.** Uniform porous and functionally graded porous titanium fabricated via space holder technique with spark plasma sintering for biomedical applications // Advanced Powder Technology. – 2022. – Vol. 33. – № 6. – P. 103598. – https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103598

12 **Tokita M.** Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization //Ceramics. – 2021. – Vol. 4. – № 2. – P. 160–198. – https://doi.org/10.3390/ceramics4020014

13 **Bao C., Ma Y., Han L.** A method for preparing titanium carbide foam ceramics // Patent CN 105272259 B China. – 2017.

14 **Sanchez-Herencia A. J. et al.** Operational variables on the processing of porous titanium bodies by gelation of slurries with an expansive porogen //Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 16. – P. 4744. – https://doi.org/10.3390/ma14164744

15 **Shustov V. S. et al.** Structure and permeability of porous material from titanium carbide produced with porogens of various dispersion //Letters on Materials. – 2024. – Vol. 14. – № 2. – P. 125–129. – https://doi.org/10.48612/letters/2024-2-125-129

REFERENCES

1 **Chen, B. et al.** Research and improvement of SPS spark plasma sintering equipment //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – Vol. 2483. – №. 1. – P. 012039. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/2483/1/012039

2 **Sari, W., Sari, M., Yusuf, Y.** The cell viability assay analysis and physicochemical characterization of porous hydroxyapatite scaffold using honeycomb and paraffin wax as polymeric porogen for bone tissue engineering //Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology. – 2022. – Vol. 13. – №. 1. – P. 015013. – https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac5d43

3 **Munir, Z. A., Anselmi-Tamburini, U., Ohyanagi, M.** The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method //Journal of materials science. – 2006. – Vol. 41. – №. 3. – P. 763–777. – https://doi.org/10.1007/s10853-006-6555-2

4 **Yu, M., Li, G., Saunders, T.** Biomorphic wood-derived titanium carbides prepared by physical vapor infiltration-reaction synthesis //Ceramics International. – 2021. – Т. 47. – №. 8. – P. 11459–11464. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.273

5 **Lakshmi D. S. et al.** Emerging trends in porogens toward material fabrication: Recent progresses and challenges //Polymers. – 2022. – Vol. 14. – № 23. – С. 5209. – https://doi.org/10.3390/polym14235209

6 **Shustov V. S.** Titanium carbide based metal-ceramic material with porous layered structure //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 558. – № 1. – P. 012048. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/558/1/012048

7 **Ankudinov A. B. et al.** Zavisimost' kharakteristik poristogo titana, izgotovlennogo iz poroshka TiH_2, ot usloviy spekaniya i soderzhaniya poroobrazovatelya v iskhodnoy smesi [Effect of sintering conditions and space holder content on the characteristics of porous titanium fabricated from TiH_2 powder] //Neorganicheskie materialy. – 2024. – Vol. 60. – №. 1. – P. 16–24. – https://doi.org/10.31857/S0002337X24010037

8 **Shustov V. S. et al.** Prochnost' i pronitsayemost' poristogo materiala na osnove submikronnogo poroshka karbida titana [Strength and permeability of porous materials based on submicron titanium carbide powder] //Neorganicheskie materialy. – 2022. – Vol. 58. – №. 10. – P. 1047–1052. – https://doi.org/10.31857/S0002337X22100128

9 **Leś K., Opaliński I.** Prospective application of response surface methodology for predicting high-energy mixing process conditions towards fine powders flow improvement //Advances in Science and Technology. Research Journal. – 2021. – Vol. 15. – № 1. – С. 134–143. – https://doi.org/10.12913/22998624/130897

10 **Zohari S. et al.** Application of spark plasma sintering (SPS) for the fabrication of in situ Ni–TiC nanocomposite clad layer //Journal of alloys and compounds. – 2015. – Vol. 633. – P. 479–483. – https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.276

11 **Fujii T. et al.** Uniform porous and functionally graded porous titanium fabricated via space holder technique with spark plasma sintering for biomedical applications // Advanced Powder Technology. – 2022. – Vol. 33. – №. 6. – С. 103598. – https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103598

12 **Tokita M.** Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization //Ceramics. – 2021. – Vol. 4. – № 2. – С. 160–198. –https://doi.org/10.3390/ceramics4020014

13 **Bao C., Ma Y., Han L.** A method for preparing titanium carbide foam ceramics // Patent CN 105272259 B China. – 2017.

14 **Sanchez-Herencia A. J. et al.** Operational variables on the processing of porous titanium bodies by gelation of slurries with an expansive porogen //Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 16. – P. 4744. – https://doi.org/10.3390/ma14164744

15 **Shustov V. S. et al.** Structure and permeability of porous material from titanium carbide produced with porogens of various dispersion //Letters on Materials. – 2024. – Vol. 14. – №. 2. – P. 125–129. – https://doi.org/10.48612/letters/2024-2-125-129

Поступило в редакцию 28.03.26.
Поступило с исправлениями 30.04.26.
Принято в печать 22.07.26.

А. С. Уркунбай[1], Е. А. Кожахметов[2], Г. О. Нұрақова[3], Е. Д. Даулетханов[4], М. Р. Мухаметхан[5]
[1,2,4,5]«VERITAS» артықшылық орталығы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.
28.03.26 ж. баспаға түсті.
30.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

$(NH_4)_2CO_3$ ҚАТЫСЫНДА ПЛАНЕТАРЛЫҚ АРАЛАСТЫРУДАН КЕЙІН ҰПК ӘДІСІМЕН КЕУЕКТІ ТІС ҚАЛЫПТАСТЫРУ

Осы жұмыста титан карбиді негізіндегі кеуекті материалдар ұнтақ компоненттерін механикалық араластыру және кейіннен кеуек түзуші қоспа ретінде аммоний карбонатын қолдана отырып, ұшқын-плазмалық күйежентектеу әдісі арқылы алынды. Планетарлық диірменде өңдеу параметрлерінің, атап айтқанда айналу жылдамдығы мен өңдеу ұзақтығының, сондай-ақ кеуек түзуші фазаның бөлшек өлшемінің ұнтақ қоспаларының морфологиялық сипаттамаларына, фазалық құрамына және күйежентектеуден кейінгі кеуекті құрылымның қалыптасу ерекшеліктеріне әсеріне кешенді талдау жүргізілді. Механикалық өңдеу барысында жүйенің гомогендену дәрежесін, бөлшектердің агломерациялану сипатын және бастапқы компоненттердің сақталуын бағалауға ерекше назар аударылды.

Планетарлық араластыру режимдерінің ұнтақ жүйесінің көлемінде кеуек түзуші фазаның таралуына және материалдың кеуекті архитектурасының кейінгі қалыптасуына шешуші әсер ететіні анықталды. Араластырудың қалыпты режимдерін қолдану аммоний карбонатының айтарлықтай деградациясынсыз борпылдақ және біркелкі таралған ұнтақ құрылымының қалыптасуына ықпал ететіні көрсетілді. Механикалық әсердің күшеюі кеуек түзуші қоспаның ішінара бұзылуына және кеуек түзілу процесінің басқарылу мүмкіндігінің төмендеуіне әкеледі.

Бұл өз кезегінде аммоний карбонатының бақыланатын ыдырауын және ұшқын-плазмалық күйежентектеу кезінде біртекті ашық кеуектіліктің қалыптасуын қамтамасыз етеді. Нәтижесінде ұнтақтарды дайындаудың оңтайлы технологиялық параметрлері анықталып, қоспаның гомогендігі, фазалық құрамның тұрақтылығы және материалдың кеуекті архитектурасының қайта өндірілуі арасындағы ұтымды тепе-теңдік қамтамасыз етілді.

Кілтті сөздер: титан карбиді, кеуекті материалдар, планетарлық шарлы диірмен, аммоний карбонаты, ұшқын-плазмалық күйдіру.

A. S. Urkunbay[1], Y. A. Kozhakhmetov[2], G. O. Nurakova[3],
Y. D. Dauletkhanov[4], M. R. Mukhametkhan[5]
[1,2,4,5]Center of Excellence «VERITAS», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey.
Received 28.03.26.
Received in revised form 30.04.26.
Accepted for publication 22.07.26.

FORMATION OF POROUS TIC BY SPS AFTER PLANETARY MIXING WITH $(NH_4)_2CO_3$

In this study, porous titanium carbide–based materials were fabricated by mechanical mixing of powder components followed by spark plasma sintering using ammonium carbonate as a pore-forming additive. A comprehensive analysis was carried out to evaluate the influence of planetary milling parameters, including rotational speed and processing duration, as well as the particle size of the pore-forming phase, on the morphological characteristics of powder mixtures, phase composition, and features of porous structure formation after sintering. Particular attention was paid to assessing the degree of system homogenization, the nature of particle agglomeration, and the preservation of initial components during mechanical treatment.

It was established that the regimes of planetary mixing have a decisive effect on the distribution of the pore-forming phase within the powder system and the subsequent formation of the porous architecture of the material. It was shown that moderate mixing conditions promote the formation of a loose and uniformly distributed powder structure without significant degradation of ammonium carbonate. An increase in mechanical impact leads to partial destruction of the pore-forming additive and reduces the controllability of the pore formation process.

This, in turn, ensures controlled decomposition of ammonium carbonate and the formation of a homogeneous open porosity during spark plasma sintering. As a result, optimal technological parameters for powder preparation were determined, providing a rational balance between mixture homogeneity, phase stability, and reproducibility of the porous architecture of the material.

Keywords: titanium carbide, porous materials, planetary ball mill, ammonium carbonate, spark plasma sintering.

КӨЛІК

МРНТИ 73.29.41
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/501-515

Р. К. Асылбекова[1], Ш. М. Кобдикова[2],
М. К. Кисиков[3], М. Н. Айкумбеков[4]
[1,4]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Управление административной полиции Департамента полиции Алматинской области МВД Республики Казахстан, Алматинская область, г. Конаев.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6126-3668
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9607-2823
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5287-4594
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1951-1977
*e-mail: assylbekovaroza1985@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ

В статье исследуется влияние параметров дорожной инфраструктуры на организацию движения грузового транспорта в Алматинской области. Регион является ключевым звеном в системе международных транспортных коридоров, включая маршрут «Западная Европа – Западный Китай» и коридоры Центральной Азии. Актуальность работы обусловлена ростом транзитного потенциала и интенсивности движения, что требует высокой пропускной способности и безопасности дорожной сети.

Целью исследования является выявление взаимосвязи между геометрическими параметрами автомобильных дорог, качеством дорожного покрытия и уровнем аварийности с участием большегрузного транспорта. В работе использованы методы статистического анализа дорожно-транспортных происшествий, сравнительного анализа эксплуатационных характеристик участков автомобильных дорог и элементов транспортного моделирования.

На основе анализа данных по ключевым участкам Алматинской области определены основные факторы риска. Установлено, что даже на дорогах первой технической категории безопасность напрямую зависит от соблюдения проектных параметров и обустройства дорог. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации маршрутизации грузопотоков и совершенствования дорожной инфраструктуры в рамках развития мультимодальных перевозок.

Полученные результаты позволяют более точно оценивать влияние параметров дорожной инфраструктуры на условия эксплуатации грузового транспорта. Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов при проектировании и реконструкции автомобильных дорог, а также при планировании транспортных потоков на региональном уровне.

Ключевые слова: грузовой транспорт, дорожная инфраструктура, Алматинская область, безопасность движения, аварийность, транспортное моделирование, автомобильные дороги.

Введение

Развитие транспортно-логистической системы Республики Казахстан неразрывно связано с интенсификацией грузоперевозок. В последние годы в Алматинской области стало больше грузовых перевозок. Это связано с тем что в регионе развиваются промышленность и логистика. Благодаря своему расположению область имеет большое значение для экономики страны. Через нее проходят дороги, которые соединяют Казахстан с Китаем, Кыргызстаном и другими регионами.

Большая часть грузов перевозится автомобильным транспортом. В целом качество дорог напрямую влияет на скорость и безопасность перевозок. Есть некоторые участки дорог находятся в неудовлетворительном состоянии. На них повреждено дорожное покрытие, а ширина проезжей части не всегда соответствует современным требованиям. Дополнительные трудности возникают из-за нехватки объездных дорог и недостаточного количества инженерных сооружений. Это замедляет перевозку грузов, увеличивает время доставки и повышает стоимость перевозок.

В этих условиях обеспечение качественного функционирования дорожно-транспортной инфраструктуры и ее влияние на организацию движения грузового транспорта позволит выявить ключевые проблемы, определить «узкие места» и предложить научно обоснованные пути улучшения.

Актуальность исследования обусловлена высокими перспективами развития транспортной системы Алматинской области и связано с ростом объемов грузоперевозок, увеличением промышленной и логистической активности, а также расширением внешнеторговых потоков.

Цель исследования: Оценка влияния состояния и параметров дорожной инфраструктуры на организацию движения грузового транспорта в Алматинской области и разработка рекомендаций по повышению эффективности транспортного обслуживания региона.

Задачи исследования:

1 Провести анализ современного состояния дорожной инфраструктуры Алматинской области.

2 Выполнить анализ дорожно-транспортных происшествий на основных маршрутах грузовых перевозок.

3 Оценить влияние параметров дорожной сети на организацию движения грузового транспорта.

4 Выявить ключевые факторы, влияющие на эффективность и безопасность грузового движения.

Научная новизна исследования заключается в использовании метода «стоимости поворота» для условий Алматинской области. Метод был придложен с учетом особенностей движения тяжеловесного и крупногабаритного транспорта. В ходе работы были изучены состояние дорожной сети, причины дорожно-транспортных происшествий и условия эксплуатации автомобильных дорог.

Предложенный метод отличается от традиционных исследования. В работе учитывались не толька параметры дорог. Также рассматривались влияние подъемов и спусков, особенности движения крупногабаритного транспорта. Особое внимание было уделено тому, как грузовой транспорт движется по развязкам.

Результаты можно использовать при строительстве и ремонте дорог. Этот метод особенно подходит для участков дорог, по которым проходит большое количество грузового транспорта. Он позволяет более точно оценить условия движения и повысить безопасность перевозок.

Материалы и методы

Зарубежный опыт показывает что дороги и грузовой транспорт связаны между собой. Специалисты данного направление уделяют внимание не толька строительству дорог а также совершенствованию грузовых автомобилей.

Большой вклад в развитие этой области внесли ученные из Восточной Европы. Болгарские исследователи еще в 1970-х годах начали изучать влияние грузового транспорта на состояние дорог. Исследование показали что конструкция грузовых автомобилей должна учитывать особенности дорог. Одним из решений стало внедрение задних ведущих мостов с планетарными колесными редукторами. Это позволило уменьшить нагрузку на автомобиль, улучшилось сцепление колес с дорогой. Благодаря этому снизился износ дорожного покрытия.

Изучение опыта других стран показал что состояние дорог зависит от разных факторов. К ним относятся качества дорог, особенности транспортных средств и загруженность на дорогах.

Сегодня акцент в исследованиях делается на геометрии дорог. Главное внимание уделяется изгибам дороги. От их правильного расчета зависит устойчивость автомобиля и безопасность движения. [1: 2; 3; 4]. В работах [5; 6] показано, как вес автомобиля и нагрузка на ее оси портят дорожное покрытие. В исследовании [7] показаны другие факторы, из-за которых повышается риск возникновения аварий.

Китайские исследователи [8] предложили рассчитать маршруты грузовых автомобилей с помощью метода «стоимость поворота». Для расчетов используют измененный алгоритм Дейкстры. В работах [9; 10] учитываются геометрических параметров дорог и ограничения влияющие на движения тяжеловесного транспорта. Дальные перевозки крупных грузов всегда рискованно. Поэтому

ученные исследуют надежность транспортных коридоров [11;12] и используют разные методы моделирование.

Важным дополнением к технико-экономическому анализу становится:

1 Экологические критерии, указывающие на необходимость учета влияния тяжелого транспорта на климатическую политику [13];

2 Системный анализ, основанный на методе анализа иерархии (AHP), применяемый для выявления значимости факторов взаимодействия в системе «водитель-автомобиль-дорога-среда» [14].

Таким образом, зарубежный опыт демонстрирует важность комплексного подхода, основанного на сочетании инженерных решений, цифровых технологий мониторинга и современных методов проектирования транспортной инфраструктуры. Исследования показывают, что переход от «ремонтной» модели содержания автомобильных дорог к превентивной модели, ориентированной на контроль параметров движения тяжеловесного транспорта, оптимизацию дорожной геометрии и интеллектуальное управление транспортными потоками, является перспективным направлением развития национальной системы перевозок КГТ [15; 16; 17].

Проблема комплексного влияния факторов заключается в том, что дорожно-транспортные происшествия возникают вследствие взаимодействия элементов системы «водитель-транспортное средство-дорога-окружающая среда». Исследования показывают, что риск аварий значительно возрастает при сочетании неблагоприятных дорожных условий с высокой интенсивностью движения, сложным составом транспортного потока и неблагоприятными погодными условиями [18].

В статье рассмотрено влияние параметров дорожной инфраструктуры на уровень аварийности в Алматинской области. Проведен анализ ДТП, в том числе с участием грузового транспорта. На основе полученных результатов были предложены меры по совершенствованию организации дорожного движения. Кроме того были предложены новые подходы к прогнозированию уровня безопасности [19; 20].

Авторы выражают благодарность Департаменту полиции Алматинской области за предоставленные статистические и аналитические материалы. Эти сведения были использованы при проведении работы. Собранные данные позволили оценить состояние дорожной безопасности в регионе. На их основе были подготовлены практические рекомендации, направленные на снижение уровня аварийности.

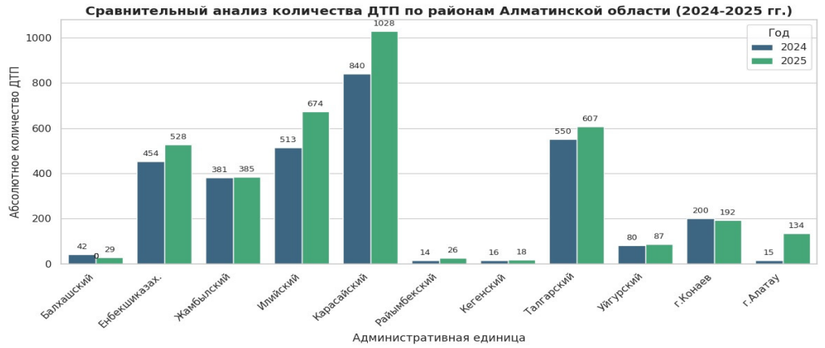


Рисунок 1 – Динамика аварийности в районах Алматинской области в 2024–2025 годах

Анализ статистики за 2024–2025 годы показал рост аварийности в Алматинской области. Количество ДТП увеличилось на 19,4 %, а число пострадавших – 28,4 %. При этом число погибших снизилось на 1,3 %.

Наибольший рост аварий отмечен в Илийском, Карасайском и Енбекшиказахском районах. Это связано с субурбанизацией и увеличением транспортной нагрузки. Значительный прирост также зафиксирован в городе Алатау из-за активного развития территории. В отдельных районах отмечены разные тенденции. В Жамбылском и Уйгурском районах выросло число погибших, а в Балхашском районе и городе Конаев показатели снизились. В целом сохраняется тенденция роста аварийности, что требует дальнейшего совершенствования транспортной инфраструктуры.

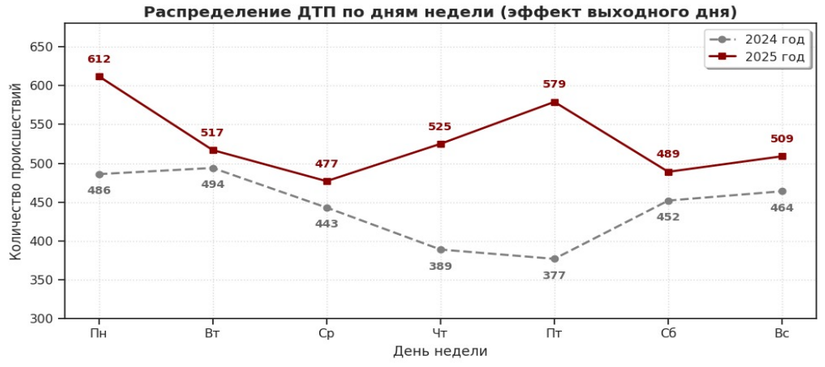


Рисунок 2 – Изменение уровня аварийности в течение недели с учетом особенностей транспортного потока в выходные дни

На рисунке 2 показано распределение ДТП по дням недели в Алматинской области за 2024–2025 годы. График позволяет выявить закономерности аварийности и «эффект выходного дня».

Анализ показывает, что в 2025 году по сравнению с 2024 годом наблюдается рост количества ДТП во все дни недели, при этом динамика носит неравномерный характер. Наиболее высокие значения фиксируются в начале и конце рабочей недели. Максимум аварийности приходит на пятницу (рост с 377 до 579 случаев), что соответствует увеличению на 53,6 %. Существенное увеличение также наблюдается в четверг (с 389 до 525; + 35 %) и в понедельник (с 486 до 612; +25,9%).

В середине недели (вторник-среда) уровень аварийности относительно ниже и характеризуется умеренными темпами роста: во вторник количество ДТП увеличилось незначительно (с 494 до 517; + 4,7%), в среду-с 443 до 477 (+7,7 %). Это может быть связано с более стабильной транспортной ситуацией и отсутствием выраженных пиковых нагрузок.

В выходные дни (суббота и воскресенье) наблюдается умеренный рост аварийности (суббота: с 452 до 489; + 8,2 %; воскресенье: с 464 до 509; +9,7 %), однако значения остаются ниже, чем в пиковые дни рабочей недели. Это свидетельствует о снижении интенсивности деловых поездок при сохранении высокой доли рекреационных и межгородских перемещений.



Рисунок 3 – Распределение дорожно-транспортных происшествий по видам за 2025 год

Исследована структура дорожно-транспортных происшествий на автодорогах Алматинской области за 2025 год. Анализ охватывает виды, причины, а также пространственно-временные параметры аварийности. В общей совокупности дорожно-транспортных происшествий преобладают столкновения (77,4 %),

остальное – наезды на препятствия (22,6 %). Основная часть ДТП (88,6 %) вызвана дистанцией (50,9 %) и маневрированием (37,7 %). Это указывает на критическое значение характера движения в потоке. Пространственный анализ выявил очаги концентрации ДТП на ключевых магистралях региона. Наибольшая доля аварий зафиксирована на автодороге Алматы-Кокпек-Коктал (43,4 %). Высокая аварийность также отмечена на направлениях Алматы-Шелек-Хоргос, Алматы-Талгар, Алматы-Оскемен и Бакад. Это свидетельствует о наличии локальных зон повышенной аварийности. Наибольшее число ДТП фиксирует с 14:00 до 22:00. Данный интервал совпадает с периодом пиковой транспортной нагрузки. В ночные часы число ДТП минимально. В этот период аварии связаны преимущественно с маневрированием и наездом на препятствия. В целом аварийность напрямую зависит от интенсивности транспортного потока и обусловлена его высокой плотностью. Ключевая проблема заключается в недостаточной адаптации дорожной инфраструктуры к реальным условиям эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Объект исследования является участок автомобильной дорги Алматы-Шелек-Хоргос, который входит в состав международного транспортного коридора «Западная Европа-Западный Китай». По этому маршруту проходит большое количества грузового транспорта. Несмотря на соответствие установленным требованиям, на некоторых участках дороги по-прежнему высокий риск аварий.

Это обусловлено тем, что традиционные методы проектирования ориентированы преимущественно на динамические характеристики легковых автомобилей и не учитывают в полной мере специфику движения многоосных автопоездов.

Целью исследования является оценка влияния геометрических параметров дороги на безопасность движения грузового транспорта с использованием оптимизированного метода выбора маршрута на основе «стоимости поворотов», предложенного Л. Мэном, Ч. Хуаном и др. В данной работе метод адаптирован для анализа безопасности движения на специфических инфраструктурных узлах Алматинской области. Применение данного подхода позволяет формализовать дополнительные издержки и риски, возникающие при выполнении маневров ТС в условиях ограниченного дорожного пространства».

Математическая модель «стоимости поворота»

Оценка сложности маневра на перекрестках и развязках производится через интегральный показатель «стоимости поворота» (C_{turn}). В основу модели положена концепция turn cost [8], с учетам особенностей движения тяжеловесных и крупногабаритных транспортных средств:

$$C_{turn} = \alpha \triangle t + \beta \triangle v + \gamma D + \delta \frac{1}{R_{eff}} \quad (1)$$

где:

Δt – дополнительное время задержки транспортного средства,с

Δv – снижение скорости движения, км/ч

D – величина динамического выноса автопоезда, м
R_{eff} – радиус поворота транспортного средства, м
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты весомости параметров модели

Модель динамического выноса

$$D = L * \left(1 - \frac{R}{R+L}\right) \quad (2)$$

где L – длина автопоезда,
R – геометрический радиус поворота, м

Учет продольного уклона

$$R_{eff} = R \cdot (1 - k \cdot i) \quad (3)$$

где: i – продольный уклон;
k – эмпирический коэффициент влияния продольного уклона (k = 0,15–0,20).

Анализ транспортных развязок (Алматы-Шелек-Хоргос)

На 129-м км автомобильной дороги Алматы-Шелек-Хоргос (район поселка Шелек) выполнен анализ транспортной развязки (рис.4). Проведенное обследование показала, что геометрические параметры съездов затрудняют движение тяжеловесного и крупногабаритного транспорта. При выполнении поворота водители вынуждены увеличивать траекторию движения что снижает скорость и усложняет прохождение развязки.

При прохождении съезда транспортной развязки наблюдается отклонение траектории движения. Оно возникает из-за недостаточной ширины проезжей части и малых радиусов кривых. По этой причине длинномерный транспорт выполняет поворот с увеличенным радиусом («замах»).



Рисунок 4 – Транспортная развязка на автомобильной дороге А3 «Алматы-Хоргос» (в районе 129-го км)

Транспортная развязка Алматы-Шелек-Хоргос показала, что скорость движения на основной дороге и на съездах заметно отличается. Это связано с особенностями конструкции развязки. В результате водителям приходится тратить больше времени на выполнение маневров, а движение транспорта становится более медленным. Для дальнейшего исследования были определены основные параметры движения тяжеловесного и крупногабаритного транспорта.

Таблица 1 – Параметры маневрирования на транспортной развязке с петлевыми съездами

Параметр	Значение	Комментарий
Радиус съезда (R)	45 м	близок к минимально допустимому значению
Скорость автопоезд (V_{truck})	18 км/ч	Вынужденное снижение скорости
Разница скоростей	92 км/ч	Относительно основного транспортного потока (110 км/ч)
Уровень риска по (C_{turn})	Высокий	Вероятность попутных и боковых столкновений

Согласно данным таблицы 1, радиус съезда равный 45м, приводит к снижению скорости автопоезда до 18 км/ч. В результате возникает большая разница между скоростью грузового транспорта и скоростью основного транспортного потока. Это повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций.



Рисунок 5 – Участок транспортной развязки с петлевыми съезадами

На рисунке 5 показан участок дороги с небольшим радиусом поворота. На этом участке скорость движения снижаеться. Это приводит к появлению заторов и ускоряет износ дорожного покрытия. Данный участок показывает особенности движения грузового транспорта по петлевому съезду. Основная сложность связана со смещением прицепа во время движения. Из-за небольшего радиуса поворота автопоезду становится сложнее выполнять маневр. Поэтому водителю приходится использовать почти всю ширину дороги. Дополнительное влияние

оказывает попречный уклон. Он увеличивает нагрузку на дорожное покрытие и способствует образованию колеи.

Выводы

В ходе исследования был изучен вопрос безопасности движения грузового транспорта. За основу был взят метод «стоимости поворота» [8] и получивший дальнейшее развитие в работах [9;10]. Этот метод позволяет оценить сложность грузовых автомобилей на разных участках дороги.

Изучение участка Алматы-Шелек-Хоргос показал, что на некоторых участках дороги сохраняется высокий риск возникновения аварий

В ходе исследования были получены результаты:

– было установлено, что при оценке безопасности необходимо учитывать скорость движения транспорта и время задержки. Также нужно принимать во внимание особенности маневрирования грузовых автомобилей.

– определено влияние продольных уклонов и радиусов кривых на устойчивость движения.

– выявлено, что транспортные развязки относятся к наиболее сложным элементам дорожной инфраструктуры. На таких участках возрастает вероятность возникновения аварийных ситуаций. Сокращение количества сложных маневров способствует снижению уровня риска.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании, реконструкции и эксплуатации автомобильных дорог с высокой интенсивностью грузового движения. На основании проведенной работы были предложены следующие рекомендации:

– увеличение радиусов горизонтальных кривых на участках реконструкции;

– устройство дополнительных полос движения на затяжных подъемах;

– повышение параметров видимости на вертикальных кривых;

– увеличение длины переходно-скоростных полос и развитие придорожной инфраструктуры.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что эффективное обеспечение безопасности возможно только при интеграции геометрического проектирования, динамического моделирования и цифровых технологий [8; 12]. Реализация предложенного подхода позволит повысить устойчивость транспортной системы, снизить аварийность и обеспечить эффективное функционирование международных транспортных коридоров в условиях роста транзитных перевозок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Himes, S. C., Donnell, E. T.** Safety effects of horizontal curve reliability index [Текст] // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2020. – Vol. 2674. – № 9. – P. 627–636.

2 **Petraška, A., Čižiūnienė, K., Prentkovskis, O., Jarašūnienė, A.** Algorithm for the assessment of heavyweight and oversize cargo transportation route [Text] // Journal of Business Economics and Management. – 2018. – Vol. 19. – № 3. – P. 476–489.

3 **Champahom, T., Se, C., Jomnonkwao, S., Kasemsri, R., Ratanavaraha, V.** Analysis of the effects of highway geometric design features on truck-involved crashes [Текст] // Safety. – 2023. – Vol. 9. – № 4. – Art. 76. – [Electronic resource]. – https://www.mdpi.com/2313-576X/9/4/76

4 **Kar, P., Venthuruthiyil, S. P., Chunchu, M.** Crash risk estimation of heavy commercial vehicles on horizontal curves [Text] // Accident Analysis & Prevention. – 2024. – Vol. 199. – Art. 107521.

5 **Zhu, X., Shao, C.** Analysis of the relationship between road geometry and technical condition on heavy truck accident rates [Text] // Journal of Advanced Transportation. – 2017. – P. 1–12.

6 **Vatavu, N.** Impact of heavy axle loads on road degradation [Текст] // International Journal of Pavement Engineering. – 2020. – Vol. 21. – № 8. – P. 1015–1026.

7 **Gitelman, V., Doveh, E.** The relationship between road infrastructure characteristics and heavy vehicle crashes [Text] // Accident Analysis & Prevention. – 2022. – Vol. 167. – P. 106532.

8 **Meng, L., Hu, Z., Huang, C., Zhang, W., Jia, T.** Optimized route selection method based on the turns of road inters : A Case Study on Oversized Cargo Transportation ections [Текст] // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2015. – Vol. 4. – № 4. – P. 2428–2445. – https://doi.org/10.3390/ijgi4042428

9 **Luo, Y., Zhang, Y., Huang, J., Yang, H.** Multi-route planning of multimodal transportation for oversize cargo [Текст] // Computers & Operations Research. – 2021. – Vol. 128. – Art. 105172.

10 **Petru, J., Doležel, J., Krivda, V.** Assessment of the transport routes of oversized and excessive loads in Relation to the Load-Bearing Capacity of Existing Bridges [Text]. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 236. – Art. 012033. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012033

11 **El-Rashidy, R. A., Grant-Muller, S.** Evaluating network redundancy in road transport networks [Text] // Transportation. – 2014. – Vol. 41. – № 3. – P. 513–530.

12 **Al-Sheikh, O., Ghasemi, S. H., Jalayer, M.** Reliability-based analysis of horizontal curve design considering vehicle automation [Text] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Art. e25346.

13 **Carrara, S., Longden, T.** The future of freight transport: potential impacts of road freight on climate policy [Текст] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2017. – Vol. 53. – P. 86–101.

14 **Podvezko, V., Sivilevičius, H.** The use of AHP methods for determining transport system interaction significance [Text] // Transport. – 2013. – Vol. 28. – № 3. – P. 241–248.

15 **Adu, J. P., Dorasamy, N.** Road infrastructure and road safety in economic geography perspective [Текст] // Revista de Gestão Social e Ambiental. – 2024. – Vol. 18. – № 2. – P. 1–12.

16 **Jacob, B.** Weigh-in-motion technology for heavy goods vehicles [Текст] // IATSS Research. – 2021. – Vol. 45. – P. 101–110.

17 **Garnaik, M. M., Giri, J. P., Panda, A.** Impact of highway design on traffic safety: How geometric elements affect accident risk [Text] // Ecocycles. – 2023. – Vol. 9. – № 1. – P. 45–55. – https://doi.org/10.19040/ecocycles.v9i1.263

18 **Chen, F.** Operational safety of heavy commercial vehicles on interchanges [Text] // Accident Analysis & Prevention. – 2020. – Vol. 145. – P. 105–112.

20 Приказ Министра транспорта Республики Казахстан от 3 октября 2024 года № 321 «О внесении изменений в приказ исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 26 марта 2015 года № 342» [Текст]. – Астана. – 2024.

21 Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Транспорт в Республике Казахстан: статистический сборник. – Астана. – 2023.

REFERENCES

1 Himes, S. C., Donnell, E. T. Safety effects of horizontal curve reliability index [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2020. – Vol. 2674, No. 9. – P. 627–636.

2 **Petraška, A., Čižiūnienė, K., Prentkovskis, O., Jarašūnienė, A.** Algorithm for the assessment of heavyweight and oversize cargo transportation route [Text] // Journal of Business Economics and Management. – 2018. – Vol. 19. – № 3. – P. 476–489.

3 **Champahom, T., Se, C., Jomnonkwao, S., Kasemsri, R., Ratanavaraha, V.** Analysis of the effects of highway geometric design features on truck-involved crashes [Текст] // Safety. – 2023. – Vol. 9. – № 4. – Art. 76. – [Electronic resource]. – https://www.mdpi.com/2313-576X/9/4/76

4 **Kar, P., Venthuruthiyil, S. P., Chunchu, M.** Crash risk estimation of heavy commercial vehicles on horizontal curves [Text] // Accident Analysis & Prevention. – 2024. – Vol. 199. – Art. 107521.

5 **Zhu, X., Shao, C.** Analysis of the relationship between road geometry and technical condition on heavy truck accident rates [Text] // Journal of Advanced Transportation. – 2017. – P. 1–12.

6 **Vatavu, N.** Impact of heavy axle loads on road degradation [Текст] // International Journal of Pavement Engineering. – 2020. – Vol. 21. – № 8. – P. 1015–1026.

7 **Gitelman, V., Doveh, E.** The relationship between road infrastructure characteristics and heavy vehicle crashes [Text] // Accident Analysis & Prevention. – 2022. – Vol. 167. – P. 106532.

8 **Meng, L., Hu, Z., Huang, C., Zhang, W., Jia, T.** Optimized route selection method based on the turns of road inters : A Case Study on Oversized Cargo Transportation ections [Текст] // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2015. – Vol. 4. – № 4. – P. 2428–2445. – https://doi.org/10.3390/ijgi4042428

9 **Luo, Y., Zhang, Y., Huang, J., Yang, H.** Multi-route planning of multimodal transportation for oversize cargo [Текст] // Computers & Operations Research. – 2021. – Vol. 128. – Art. 105172.

10 **Petru, J., Doležel, J., Krivda, V.** Assessment of the transport routes of oversized and excessive loads in Relation to the Load-Bearing Capacity of Existing Bridges [Text]. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 236. – Art. 012033. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012033

11 **El-Rashidy, R. A., Grant-Muller, S.** Evaluating network redundancy in road transport networks [Text] // Transportation. – 2014. – Vol. 41. – № 3. – P. 513–530.

12 **Al-Sheikh, O., Ghasemi, S. H., Jalayer, M.** Reliability-based analysis of horizontal curve design considering vehicle automation [Text] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Art. e25346.

13 **Carrara, S., Longden, T.** The future of freight transport: potential impacts of road freight on climate policy [Текст] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2017. – Vol. 53. – P. 86–101.

14 **Podvezko, V., Sivilevičius, H.** The use of AHP methods for determining transport system interaction significance [Text] // Transport. – 2013. – Vol. 28. – № 3. – P. 241–248.

15 **Adu, J. P., Dorasamy, N.** Road infrastructure and road safety in economic geography perspective [Текст] // Revista de Gestão Social e Ambiental. – 2024. – Vol. 18. – № 2. – P. 1–12.

16 **Jacob, B.** Weigh-in-motion technology for heavy goods vehicles [Текст] // IATSS Research. – 2021. – Vol. 45. – P. 101–110.

17 **Garnaik, M. M., Giri, J. P., Panda, A.** Impact of highway design on traffic safety: How geometric elements affect accident risk [Text] // Ecocycles. – 2023. – Vol. 9. – № 1. – P. 45–55. – https://doi.org/10.19040/ecocycles.v9i1.263

18 **Chen, F.** Operational safety of heavy commercial vehicles on interchanges [Text] // Accident Analysis & Prevention. – 2020. – Vol. 145. – P. 105–112.

19 Prikaz Ministra transporta Respubliki Kazakhstan ot 3 oktyabrya 2024 goda № 321. – [Text]. – Astana. – 2024.

20 Ministerstvo transporta Respubliki Kazakhstan. Transport v Respublike Kazakhstan. Statisticheskii sbornik [Transport in the Republic of Kazakhstan: Statistical Yearbook] [Text]. – Astana. – 2023.

Поступило в редакцию 17.05.26.
Поступило с исправлениями 15.06.26.
Принято в печать 02.09.26.

***Р. К. Асылбекова[1], Ш. М. Кобдикова[2], М. К. Кисиков[3], М. Н. Айкумбеков[4]**
[1,4]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Қазақстан Республикасының Ұлттық Ғылым академиясы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Қазақстан Республикасы Ішкі Істер Министрлігінің Алматы облысы полиция департаменті, Қазақстан Республикасы, Қонаев қ.
17.05.26 ж. баспаға түсті.
15.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ИНФРАҚҰРЫЛЫМДЫҚ ШЕКТЕУЛЕРДІҢ МУЛЬТИМОДАЛЬДЫ КӨЛІК ДӘЛІЗДЕРІНІҢ ҚАУІПСІЗДІГІ МЕН ӨТКІЗУ ҚАБІЛЕТТІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

Мақалада жол инфрақұрылымы параметрлерінің Алматы облысында жүк көлігінің қозғалысын ұйымдастыруға әсері зерттеледі. Аймақ «Батыс Еуропа – Батыс Қытай» бағыты мен Орталық Азия дәліздерін қоса алғанда, халықаралық көлік дәліздері жүйесіндегі негізгі буын болып табылады. Жұмыстың өзектілігі транзиттік әлеуеттің және қозғалыс қарқындылығының өсуіне байланысты, бұл жоғары өткізу қабілеті мен жол желісінің қауіпсіздігін талап етеді.

Зерттеудің мақсаты автомобиль жолдарының геометриялық параметрлері, жол жамылғысының сапасы мен ауыр жүк көлігінің қатысуымен болатын апат деңгейі арасындағы байланысты анықтау болып табылады. Жұмыста жол-көлік оқиғаларын статистикалық талдау, автомобиль жолдары учаскелерінің пайдалану сипаттамаларын және көліктік модельдеу элементтерін салыстырмалы талдау әдістері қолданылды.

Алматы облысының негізгі учаскелері бойынша деректерді талдау негізінде негізгі қауіп факторлары анықталды. Бірінші техникалық санаттағы жолдарда да қауіпсіздік жобалық параметрлердің сақталуына және жолдардың орналасуына тікелей байланысты екендігі анықталды. Зерттеу нәтижелері жүк ағындарын маршруттауды оңтайландыру және мультимодальды тасымалдауды дамыту шеңберінде жол инфрақұрылымын жетілдіру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Алынған нәтижелер жол инфрақұрылымы параметрлерінің жүк көлігін пайдалану жағдайларына әсерін дәлірек бағалауға мүмкіндік береді. Жұмыстың практикалық маңыздылығы автомобиль жолдарын жобалау және қайта құру кезінде, сондай-ақ аймақтық деңгейде көлік ағындарын жоспарлау кезінде нәтижелерді пайдалану мүмкіндігі болып табылады.

Кілтті сөздер: жүк көлігі, жол инфрақұрылымы, Алматы облысы, қозғалыс қауіпсіздігі, апаттылық, көліктік модельдеу, автомобиль жолдары.

***R. K. Asylbekova[1], S. M. Kobdikova[2], M. K. Kisikov[3], M. N. Aikumbekov[4]**
[1,4]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan under the President of the Republic of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Almaty Region Police Department of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan, Konaev.
Received 17.05.26.
Received in revised form 15.06.26.
Accepted for publication 02.09.26.

THE IMPACT OF INFRASTRUCTURE CONSTRAINTS ON THE SAFETY AND CAPACITY OF MULTIMODAL TRANSPORT CORRIDORS

The article examines the influence of road infrastructure parameters on the organization of freight transport in the Almaty region. The region is a key link in the system of international transport corridors, including the Western Europe–Western China route and the corridors of Central Asia. The urgency of the work is due to the growth of transit potential and traffic intensity, which requires high throughput and safety of the road network.

The purpose of the study is to identify the relationship between the geometric parameters of highways, the quality of the road surface and the accident rate involving heavy vehicles. The paper uses methods of statistical analysis of road accidents, comparative analysis of the operational characteristics of road sections and elements of transport modeling.

Based on the analysis of data on key sites in the Almaty region, the main risk factors have been identified. It has been established that even on roads of the first technical category, safety directly depends on compliance with design parameters and road construction. The results of the study can be used to optimize the routing of cargo flows and improve road infrastructure in the framework of the development of multimodal transportation.

The results obtained make it possible to more accurately assess the impact of road infrastructure parameters on the operating conditions of freight transport. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results in the design and reconstruction of highways, as well as in the planning of traffic flows at the regional level.

Keywords: freight transport, road infrastructure, Almaty region, traffic safety, accident rate, transport modeling, highways

ҒТАМР 73.31.09; 44.37.29

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/516-534

***М. Әнібекқызы[1], О. Ж. Рабат[2], О. М. Досжанов[3], Т. К. Ханкелов[4]**

[1,2]Қазақ автомобиль-жол институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4]Ташкент Мемлекеттік Көлік университеті, Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6352-1298
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1758-6621
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2292-8742
[4]ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4653-4679
*e-mail: marfuganibekkyzy@gmail.com

БИОГАЗ ШЫҒЫМЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ ЖӘНЕ ГАЗ ҚОЗҒАЛТҚЫШЫНДАҒЫ ЖАНУ ПРОЦЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Биогаз – энергияның бірден – бір баламалы көзі болып табылады, қазіргі уақытта оны ұшқынмен тұтанатын іштен жану қозғалтқыштары үшін мотор отыны ретінде де пайдалануға болады. Ірі қара малдың көңін өңдеу арқылы алынған биогаз қарастырылған. Алынған биогаз табиғи газ деңгейіне дейін байытылып, сығымдалды. Ауылдық елді мекендерде биогаз қондырғыларын қолдану және көлік құралдары мен ауыл шаруашылығы машиналары үшін биогаз отынын өндіру шаруашылық құрылымына жаңа қасиеттер береді: оны энергетикалық тұрғыдан тәуелсіз етеді, ауыл шаруашылығының қалдықтарын кәдеге жарату мәселесін шешеді және өндіріс көлемін арттырады. Мақалада көлік қозғалтқыштарында отын ретінде биоэнергияны кеңінен пайдаланудың салыстырмалы нәтижелері қарастырылады. Турбоүрлемелі дизель қозғалтқышынан қайта жабдықталған ұшқынмен тұтанатын газ қозғалтқышында биогаздың жану процесін есептеу әдістемесі ұсынылған. Биогаз жану кезіндегі жылу бөліну сипаттамалары, сондай-ақ қайта жабдықталған газ қозғалтқышының индикаторлық және тиімді көрсеткіштері И. И. Вибе әдістемесі бойынша анықталады. Биогаздың жану сипаты мен ұзақтығының айнымалы көрсеткіштерін сипаттайтын теңдеулер алдын ала жүргізілген эксперименттік зерттеулер нәтижелеріне негізделген. Эксперименттік деректерді өңдеу нәтижесінде биогаз құрамындағы мөлшерінің жану көрсеткішіне әсерін сипаттайтын эмпирикалық тәуелділік алынған. Биогаз жанған кезде түзілетін өнімдердегі зиянды (уытты) заттардың мөлшері В. А. Звонов ұсынған есептеу әдісі негізінде есептелді. Жүргізілген тәжірибеден алынған деректер биогаз отынының жану үдерісін сипаттайтын математикалық модельдің дұрыстығын тексеруге, яғни оны верификациялауға мүмкіндік берді.

Кілтті сөздер: газ қозғалтқышы, субстрат, жану процесі, ұшқынмен тұтану, турбоүрлеу, эмпирикалық теңдеу, айналу моменті, биоэнергетикалық қондырғы.

Кіріспе

Қазақстанның көлік және агроөнеркәсіптік кешені бүгінде энергия ресурстарына, әсіресе мұнайдан өндірілетін отын түрлеріне айтарлықтай тәуелді. Дизель мен бензин бағасының жыл сайын қымбаттауы, оған қоса қоршаған ортаны қорғауға қойылатын талаптардың қатаюы өндірушілерді жаңа шешімдер іздеуге мәжбүрлеп отыр. Осындай жағдайда органикалық қалдықтан алынатын биогаздың экономикалық та, экологиялық та тиімділігі ерекше көзге түседі. Көптеген елде бұл бағыт енді ғана зерттеле бастаса, дамыған мемлекеттерде биогаз қондырғылары әлдеқашан өндірістік деңгейге шыққан.

Ауыл шаруашылығы саласын алып қарасақ, мұндай отынды өндіруге қажетті шикізат қоры мол: мал қорасынан, құс фабрикаларынан, өсімдік қалдықтарынан жыл сайын зор көлемде органикалық масса жиналады. Оны жай тастандыға айналдырудың орнына энергия көзіне ұластырса, бір мезгілде екі мәселе шешіледі. Біріншіден, шаруашылық өзін отынмен өзі қамтамасыз ете алатын дербес жүйеге айналады; екіншіден, ауыл маңындағы қалдықтан туындайтын санитарлық және экологиялық проблема жойылады. Шағын елді мекендер үшін осындай тұйық циклді жүйе аса қолайлы, себебі мұнда шикізат та, оны тұтынатын техника да бір аумақта шоғырланған.

Осы зерттеуде біз биогазды іштен жану қозғалтқышының негізгі отыны ретінде қолданудың алғашқы салыстырмалы көрсеткіштерін қарастырдық. Жүргізілген тәжірибелер ашыту камерасындағы температуралық режим биогаздың бөліну қарқынына тікелей ықпал ететінін айқын көрсетті. Анаэробты жолмен өндірілген биогаздың басқа баламалы энергия түрлерінен бірқатар артықшылығы бар: ол қоршаған ортаға зиянсыз, өндіру процесі салыстырмалы түрде арзан әрі үздіксіз жүреді.

Биоэнергетиканың әлемдік орны.

Биоэнергетика жаңартылатын энергия саласында бұрыннан танымал болғанымен, біздің елде оның әлеуеті әлі де толық бағаланбай келеді. Әлемдік тәжірибеде биомассадан алынатын энергия жаңартылатын ресурстар құрылымында жетекші орынды иеленеді – соңғы онжылдықта ол күн және жел энергиясын қосқандағыдан да көп үлес қосып отырды. Соңғы жылдары күн мен жел станцияларының қарқынды дамуына байланысты биоэнергияның жалпы үлесі біршама төмендегенімен, ол жылу беру мен көлік секторында әлі күнге дейін теңдессіз орынды сақтап тұр. Себебі бұл екі салада электр энергиясын тікелей қолдану қиынырақ, ал биоотын дайын инфрақұрылымға оңай бейімделеді.

Энергетикалық қауіпсіздік мәселесі де биогазға деген қызығушылықты арттыра түседі. Дүниежүзіндегі мұнай мен газдың негізгі қоры саяси тұрғыдан тұрақсыз аймақтарда шоғырланған, ал бұл жеткізілім тізбегін тәуекелге ұшыратады. Осы тұрғыдан жергілікті қалдықтан өндірілетін биогаз әр аймақтың өз ресурсына сүйенген, сырттан тәуелсіз энергия көзіне айнала алады.

Биогаз және оның түзілу ерекшеліктері.

Биогаз дегеніміз – анаэробты микроорганизмдердің тіршілік әрекеті барысында органикалық субстрат ыдырағанда бөлінетін газ тәрізді өнім. Метан

түзуші бактериялар шикізатты тек сұйық ортада ғана өңдей алатындықтан, ашыту процесі жоғары ылғалдылықты талап етеді. Сондықтан бастапқы массаның ылғалдылығын тұрақты деңгейде ұстау – технологияның басты шарттарының бірі. Қажет болған жағдайда субстратты сумен сұйылтады немесе механикалық араластыру арқылы біркелкі күйге келтіреді.

Бөлінетін газдың мөлшері реактор ішіндегі температураға тікелей байланысты: қызуды көтерген сайын биомассаның ыдырау жылдамдығы артады. Сонымен қатар камераға бактериялардың белсенділігін басатын бөгде заттардың – жуғыш ұнтақтар, антибиотиктер немесе химиялық қосылыстардың – түсуіне жол берілмейді, әйтпесе бүкіл процесс тоқтап қалуы мүмкін.

Қазіргі инженерлік міндеттердің бірі – қолданыстағы дизель қозғалтқыштарын ұшқынмен тұтанатын газ режиміне көшіру және олардың құрылымдық параметрлерін биогаздың физикалық қасиетіне бейімдеу. Бұл бағытта жаңу процесін математикалық модельдеу үлкен рөл атқарады, өйткені есептеу жолымен алынған нәтиже нақты стенд тәжірибелерінің санын азайтып, зерттеу мерзімін едәуір қысқартады.

Шикізат көздері мен қолдану аясы.

Биогаз өндіру үшін негізінен биологиялық жолмен ыдырайтын қалалық қалдықтарды, агроөнеркәсіптік қосалқы өнімдерді және мал шаруашылығынан жиналатын органикалық массаны пайдаланған тиімді. Алынған газды қазандықта тікелей жағуға да, іштен жаңу қозғалтқышында отын ретінде қолданып, жылу мен электр қуатын қатар өндіруге де болады. Соңғы кезде мембраналық немесе абсорбциялық тазарту әдістері арқылы газ құрамындағы көмірқышқыл газын бөліп алып, оны таза биометан түрінде пайдалану бағыты да қарқынды дамуда.

Бүгінде энергия тиімділігі жоғары, әрі бірнеше өнім бере алатын полигенерациялық кешендерді өндіріске енгізу үрдісі байқалады. Кения, Испания, Бразилия және Үндістан секілді елдерде осы бағытта жергілікті ресурс әлеуетін есепке алған ауқымды зерттеулер жүргізілген.

Дизель моторын газ отынымен жұмыс істеуге бейімдеу барысында жылу бөліну көрсеткіштерін есептеу үшін әдетте И. И. Вибенің классикалық әдістемесі негізге алынады. Алайда тазартылмаған биогаз құрамында балласт ретіндегі көмірқышқыл газының (CO_2) үлесі жоғары болғандықтан, бұл әдістемені өзгеріссіз қолдану есептеу дәлдігін айтарлықтай төмендетеді. Сол себепті жаңу процесінің негізгі сипаттамаларын, әсіресе *m* және *φ_z* параметрлерін нақтылау мақсатында жаңа эмпирикалық тәуелділіктер тобы әзірленді. Дегенмен бұл формулалар көбіне кіші көлемді қозғалтқыштарға арналғандықтан, цилиндр өлшемі үлкен қуатты агрегаттарда оларды қайта калибрлеу қажеттігі туындайды.

Материалдар мен әдістері

Анаэробты өңдеу және биоконверсия технологиясында лигноцеллюлозалы биомасса түрлерін, сондай-ақ өсімдік тектес және коммуналдық шаруашылықтан бөлінетін қалдықтарды кешенді түрде пайдалану жоғары нәтиже береді. Практикалық тұрғыдан энергетикалық әлеуеті мол шикізат қатарына ірі қара малдың қиы, құс саңғырығы, ағынды су тұнбасы мен тамақ өнеркәсібінің

органикалық қалдықтары жатады. Әртүрлі субстраттан алынатын биогаздың шығымы мен олардың меншікті энергетикалық сипаттамалары өзара салыстырыла отырып топтастырылды.

1-кесте – әртүрлі органикалық субстраттардан алынатын биогаз көлемі мен электр энергиясының үлестік көрсеткіштерін саралау

Қалдықтардың түрлері	1 тонна таза заттан биогаз өндіру ($м^3$)	1 тонна таза затқа электр энергиясын өндіру* (кВтсағ)
Ірі қараның тезегі	55 - 68	122,5
Тауықтың саңғырығы	126	257,3
Майдың қалдықтары	826 - 1200	1687,4
Тамақтың қалдықтары (зарарсыздандырылған)	110	224,6
Жемістердің қалдықтары	74	151,6
Жылқының тезегі	56	114,3
Жүгерінің сүрлемі	200 / 220	409,6
Қатты органикалық тұрмыстық қалдықтар	101,5	207,2
Қалдық ағынды сулар шламы	47	96,0

*Когенерациялық қондырғының электрлік тиімділік коэффициенті – 35 %, биогаздың меншікті жылу сыйымдылығы – 21 МДж•$м^{-3}$, құрамындағы метан үлесі – 55%, эквиваленті – 3,6 МДж/(кВт•сағ)$^{-1}$

1-кестенің мәліметтері көрсеткендей, ең төменгі газ шығымы ағынды су шламдарына тиесілі болса, ең жоғары көрсеткіш май қалдықтарын өңдеу кезінде байқалады. Ірі қара малдың ас қорыту жүйесінің ерекшелігі мен ондағы метан түзетін микробиотаның әсерінен қи құрамындағы талшықтардың ыдырау деңгейі жоғары болады, бұл кемшілік құрғақ заттардың жоғары концентрациясымен теңестіріледі. Май қалдықтарының энергетикалық құндылығы мен жеңіл биодеградациялануы оны құс саңғырығы мен мал қиына қарағанда тиімдірек шикізат қатарына жатқызуға мүмкіндік береді [8].

Зерттеу шеңберінде қолданылған субстратты түрлендіру технологияларының өзара айырмашылықтары келесі параметрлер бойынша жіктеледі:

– субстратты енгізу тәсілдері, яғни мөлшерлеп немесе үздіксіз ағынмен беру.

– қоспаны араластыру әдісі, мысалы, толық араластыру немесе порциялық ығыстыра отырып илгерілету.

– жүйенің бір сатылы немесе көп сатылы болуы.

– азықтың қалпы, яғни қатты шикізатты өңдеу немесе сұйық қабылдау әдістері.

Бүгінде жел, күн және жер жылуы сияқты жаңартылатын энергия көздері кеңінен қолданылуда. Олардың ішінде, әлі даму үстінде болса да, биогаз өте жоғары мәртебеге ие. Бұл бағыттағы отын органикалық субстрат қалдықтарын анаэробты ашыту арқылы алынатындықтан, оны экологиялық таза әрі жаңартылатын энергия көзіне жатқызуға болады. Ағаш өңдеу, тамақ өнеркәсібі мен мал шаруашылығынан жиналатын биоқалдықтар арнайы ашу реакторларында өңделіп, газға айналдырылады. Түзілген қоспаның басым бөлігін метан (55–65 %)

мен көмірқышқыл газы (35–45 %) құрайды. Бұл ашу процесінің тұрақты жүруі бірнеше шартқа байланысты: реакциялық ортаның температурасына, субстраттың ылғалдылығына және сутектік көрсеткішіне (pH мәніне).

Осылай өндірілген газды бөлек тұрған тұрғын үйлерді жылытуға, когенерациялық қондырғылар арқылы электр қуатын алуға немесе автокөлікке баламалы отын ретінде қолдануға болады. Энергетикалық тұрғыдан алғанда, биогаздың 1 м³ көлемінің меншікті жылулық құндылығы шамамен 21–25 МДж аралығында болады. Бұл шама шамамен 0,4 л керосинге, 1,6 кг тас көмірге немесе 0,4 кг сұйытылған бутан газына барабар деп бағаланады.

Экономикалық тиімділікті саралау тұрғысынан алғанда, биогаз қондырғылары арқылы алынатын электр энергиясының 1кВт•сағ өзіндік құны орташа есеппен $0,025–0,075 маңында болады. Бұл дәстүрлі желілік энергия бағасымен ($0,1–0,15) салыстырғанда 2–4 есе төмен [10].

Эксперименттік зерттеулердің негізгі объектісі ретінде мал шаруашылығының қиы мен өсімдік қалдықтарының қоспасы таңдалды. Нақты, төменде 2 – ші кестеде ашытуға алынған үй жануарларының органикалық қалдықтары (биомасса) және өсімдік массалары келтірілген. Эксперименттік зерттеу жұмыстары биоэнергетикалық қондырғы арқылы, тәжірбие жүзінде қолданылып биогаз алынды. Биоэнергетикалық қондырғыға жоғарыда көрсетілген органикалық қалдықтар (биомасса) алынып, нақты есептеулермен салынып орындалды. Келесі кезекте биогаз қондырғысының температуралық жұмыс режимі анықталды. Биоэнергетикалық қондырғының ішкі температурасын көтеру мақсатында, нақтырақ айтсақ анаэробты түрде ашытуды тездету үшін қондырғының сырты фальгалы минералды ватамен оқшауланды, бұл қондырғы ішіндегі жылуды сақтап тұруға мүмкіндік береді [11].

Сынақ жүргізілген кездегі қоршаған орта температурасы 20 °С, ал атмосфералық қысым 753 мм сын. бағ. құрады. Дәл осы мәндерді негізге ала отырып, манометр мен термопара арқылы алынған өлшем нәтижелері нақты температура мен қысымға сәйкестендіріп есептелді. Тәжірибеде шикізат ретінде ірі қара малдың тезегі, тауық саңғырығы, қой құмалағы және өсімдік қалдықтары қолданылды. Пайдаланылған органикалық қалдықтардың массалық мөлшері 2-кестеде көрсетілген.

2-кесте – Ашытуға алынған әртүрлі әлеуетті субстраттардың (органикалық қалдықтар) массалары

№	Органикалық субстрат және шикізат түрлері	Енгізілген компоненттердің массасы / көлемі	Өлшем бірліктері
	Ірі қара малдың қиы (тезегі)	50,0	кг
	Құстың (тауық) саңғырығы	0,5	кг
	Қойдың құмалағы	12,0	кг
	Фитомасса (өсімдік қалдықтары)	0,2	кг
	Дистилденген / технологиялық су	55,0	л

Іштен жану қозғалтқыштарының (әсіресе газбен жұмыс істейтін түрлерінің) ішкі термодинамикасын зерттеуде биогаздың жылу бөлу динамикалық сипатын дәл суреттеу үшін И. И. Вибе әдістемесіне сүйенетін математикалық есептеулер өте жиі қолданыс тауып келеді. Дегенмен де, бұл классикалық модельдеу принципі цилиндр ішіндегі температуралық көрсеткіштерді тек орташаланған, біртекті мәндер ретінде ғана қарастырады. Осындай жалпылама жорамалдар, өз кезегінде, жанудан кейін бөлінетін өнімдердің нақты уыттылық деңгейін локальді аймақтар бойынша дәл есептеуге мүмкіндік бермейді, яғни есеп дәлдігін төмендетеді.

Жоғарыда аталған математикалық аппараттың есептеу нақтылығы мен зерттеу тиімділігін арттыру үшін жану үрдісін өзара оқшауланған екі бөлек зонаға (екі аймақты модельге) бөліп қарастыру әдісі енгізілді. Осындай екі аймақты термодинамикалық тәсіл жану камерасында жүретін күрделі физика-химиялық өзгерістерді тереңірек талдауға, сондай-ақ бөлінетін газдардың құрамындағы токсинді компоненттердің мөлшерін жоғары дәлдік деңгейімен болжауға мүмкіндік береді [12].

Біздің бұл зерттеуімізде қолданылған есептеу алгоритмдері негізінен базалық дизельді қозғалтқыш конструкциясына өзгерістер енгізу арқылы жасалған, ұшқынмен тұтанатын биогазды мотордағы ішкі үрдістерді зерттеуге бағытталған. Осы екі аймақты жану моделіне сәйкес дайындалған есептік-теориялық схема 1-суретте көрсетілген. Поршень үстіндегі жұмыс кеңістігін алып тұрған газ қоспасы мен жұмыс денесінің жалпылама массасын (М, кг) анықтау үшін келесі математикалық тәуелділік пайдаланылады:

$$\mathrm{M} = \mathrm{M}_u + \mathrm{M}_b, \quad (1)$$

Бұл жердегі есептік параметрлер:

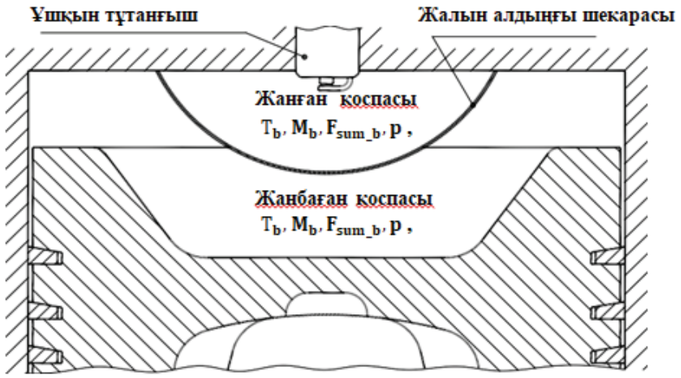
M_u – химиялық реакцияға әлі түсе қоймаған (жанбаған) жұмыс қоспасының ағымдағы массалық көрсеткіші, кг;

M_b – тікелей жану үрдісінен кейін пайда болған (жаңған) өнімдердің жиынтық массасы, кг.

Поршень үстіндегі жұмыс камерасының ағымдағы геометриялық көлемін V (м^3) есептеу үшін келесі аналитикалық өрнек қолданылады [13]:

$$V = V_u + V_b, \quad (2)$$

мұндағы: V_u – реакцияға түспеген (жанбаған) аймақтың ағымдағы көлемі, м^3;
V_b – реакцияға түспеген (жанбаған) аймақтың ағымдағы көлемі, м^3.



1-сурет – Жану үрдісін модельдеудің екі аймақтық математикалық схемасы

Дифференциалдық аймақтардағы (жанған және жанбаған орталардағы) температуралық өрістер термодинамикалық заңдылықтарға сүйене отырып есептеледі. Бұл көрсеткіштер аталған локальді аймақтардағы жұмыс қоспасы массасының, цилиндр ішіндегі қысымның және газ құрамының динамикалық өзгеруіне тікелей тәуелді. Осы орайда, фронт алдындағы жанбаған аймақтағы жұмыс қоспасы температурасының жоғарылауы негізінен политропты (немесе адиабатты) сығылу үрдістерінің әсерінен болады. Осыған байланысты, бұл аймақтағы температуралық шама (К) келесі аналитикалық өрнек арқылы анықталады:

$$T_{u_{i+1}} = T_{u_i} \times \left(\frac{p_{i+1}}{p}\right)^{\frac{k_u+1}{k_u}}, \quad (3)$$

мұндағы T_u – жанбаған қоспасының температурасы.

Жану аймағының температурасы келесідей анықталады да, Кельвин (К) өлшем бірлігімен есептеледі:

$$T_u = \frac{p_i V_i - MR_u T_u (1-x_i)}{x_i MR_b}, \quad (4)$$

мұндағы T_b – реакция аяқталғаннан кейінгі жанған газ қоспасының фазалық температурасы, К,
V – поршень үстіндегі жұмыс камерасының ағымдағы геометриялық көлемі,м^3,
х – жанған отынның үлесі,

R_u, R_b – жанбаған және жанған қоспалардың газдың тұрақтылары, Дж/(кг*К)

И. И. Вибе әдістемесі бойынша жылу бөліну сипаттамасын есептеуге арналған, төмендегідей:

$$x = 1 - exp\left(-6.908 \left(\frac{\varphi-\varphi_0}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right), \quad (5)$$

мұндағы φ_0 – жанудың бастапқы бұрынғы, град. и.б.о;
φ – жанудың бұрышы, град. ілгерілеу бұрышы бойынша. и.б.о.,
φ_z – жанудың ұзақтығы, град. и.б.о (иінді біліктің орналасуы).,
m – И. И. Вибенің зерттеуіне сәйкес, өзгеріссіз қалатын жану сипаттамалары.

Жану процесі кезінде m деп белгіленген жану сипаттамасы айнымалы болады. Есептеу дәлдігін арттыру үшін жылу бөлінуін модельдеу кезінде бұл айнымалы сипаттаманы ескеру қажет. ұл мақалада орташа қуатты турбокомпрессорлы газ қозғалтқыштары үшін айнымалы жану сипаттамасы $m_{var\,i}$ және жану ұзақтығы φ_z есептеу теңдеулері берілген [14]:

$$m_{var\,i} = 10{,}639 \times \overline{\varphi_i} \times \frac{\theta+18}{40} \times (\alpha + 0{,}00025) \times \frac{0{,}005 * \eta_v + 0{,}005}{0{,}01} \times \frac{n+1100}{3000} \times \ldots \ldots \times \frac{\pi_k+0{,}001}{0{,}95} + \left(-28{,}025 \times \varphi_i^2 + 98{,}045 \times \overline{\varphi_i}^3 - 156{,}86 \times \overline{\varphi_i}^4 + 86{,}88 \times \overline{\varphi_i}^5\right), \quad (6)$$

$$\varphi_z = 28{,}25 \times (0{,}812 \times \alpha - 0{,}045 \times \theta + 13{,}223 \times 10^{-4} \times n - 0{,}1258 \times \eta_v - 0{,}576 \times \langle \pi_k - 1 \rangle + 0 \ldots) \quad (7)$$

мұндағы $\overline{\varphi_i}$ – салыстырмалы жану бұрышы, $\overline{\varphi_i}$ = 0...1,
θ – оталдырудың ілгерілеу бұрышы, град. и.б.о., жоғары өлі нүктеге (ЖӨН) дейін,
α – артық ауа коэффициенті,
η_v – толтыру коэффициенті,
n – шатун білігінің қозғалтқышта айналу жиілігі, мин-1,
π_k – қысымның турборлеу кезіндегі жоғарылау дәрежесі.

Пайымдай келе (6) және (7) теңдеулерінің нәтижесінде есептелнген жылу бөлінулерінің көріністері тәжірибелік деректермен салыстырылып, бірақ та жоғарыдағы теңдеулер тек қана сығымдалған биометанның жану үдерісін есептеуге қолайлы теңдеу екені белгілі болды. Алайда, отын ретінде пайдаланылатын биогаз көптеген CO_2 құрамына ие. Берліген теңдеулер ІЖҚ–ның индикаторлық және тиімді көрсеткіштерін есептеу барысында қиындықтар туындатып, 15%-дан асатын қателіктер туындатады. Мұндай ауытқулардың басты себебі биогаз отынының құрамдас бөлігі болып табылатын көмірқышқыл газының жалын

фронтының таралу жылдамдығын тежеп, максималды жану температурасын төмендетуімен байланысты.

Аталған математикалық аппарат бұған дейін ұшқынмен тұтандыру жүйесіне бейімделіп қайта жабдықталған, турбоүрлеуі бар дизельді газ қозғалтқышының жұмыс циклдерін есептеу үшін қолданылған болатын. Эксперименттік сынақтар агрегаттың барлық теориялық айналу жиіліктері мен жүктемелік режимдерінде, сонымен қатар әртүрлі компоненттік құрамдағы биогаз отындарын пайдалану арқылы жүргізілді. Ұсынылып отырған теңдеулер құрылымындағы көмірқышқыл газының балластық әсері негізгі есептік көрсеткіштердің функциялық өзгерістерін айқындайды.

Тәжірибелік жолмен алынған жылу бөліну сипаттамалары негізінде жану үдерісінің айнымалы m_{var} көрсеткішінің нақты мәнін есептеу үшін А. Н. Кабанов әдістемесінде ұсынылған аналитикалық формула басшылыққа алынды [15].

$$m_{var} = -1 - log_{\overline{\varphi}} \frac{-6{,}908}{\ln\langle 1-x\rangle}, \quad (8)$$

бұл өрнектегі х – қарастырылып отырған есептеу кезеңіндегі циклі бойынша жаңған отынның салыстырмалы үлесі, ал $\overline{\varphi}$ – жану үрдісінің салыстырмалы ағымдағы ұзақтығы (мұндағы $\overline{\varphi}$ = 0 мәні жану фазасының басталу сәтін, ал $\overline{\varphi}$ = 1 мәні оның толық аяқталу шегін көрсетеді).

Газды іштен жану қозғалтқышын моторлық (эксперименттік) сынақтан өткізу барысында жинақталған тәжірибелік мәліметтер негізінде биогаз отынының жану сипатын айқындайтын айнымалы m_{var} көрсеткіші мен жану үрдісінің жалпы φ_z ұзақтығы арасындағы функционалдық тәуелділіктер заңдылығы сараланды. Сынақтан өткен қозғалтқыштың стендтік зерттеулері оның номиналды және жартылай жүктемелік сипаттамаларында, сондай-ақ максималды айналу моментіне сәйкес келетін критикалық режимдерінде орындалды.Қозғалтқыштың тиісті қуаттылық көрсеткіштері мен отын үнемділігі параметрлерін оңтайландыру критерийлері басшылыққа алына отырып, реттеу параметрлерінің өзгеру диапазондары таңдап алынды. Бұл техникалық мәндер кешені 3-кестеде жүйеленген.

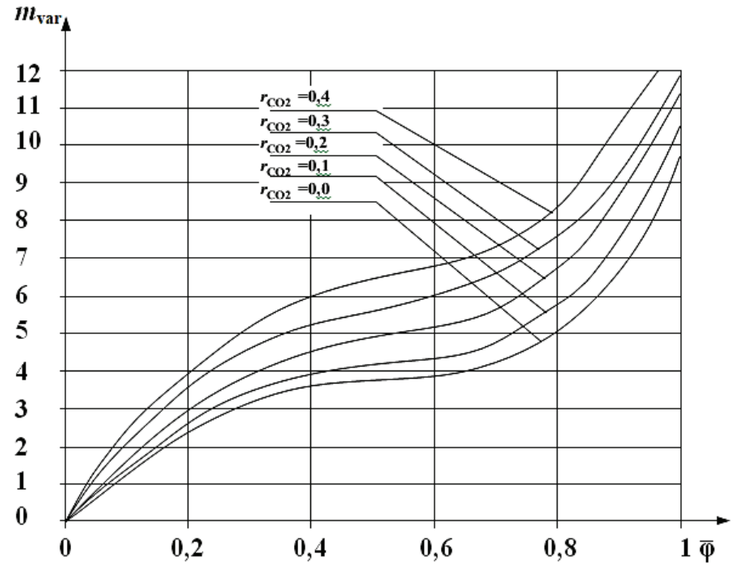
3-кесте – Биогаздың m_{var} жану сипаттамасы мен φ_z жану ұзақтығының тәуелділіктерін математикалық саралау кезіндегі модификацияланған дизель қозғалтқышының реттеу параметрлерінің өзгеру диапазоны

θ, град. и.б.о. ЖӨН -дейін.	α	n, мин^{1}	π_k	r_{CO_2}
5...45	1,0…1,6	800…2100	1…1,45	0….0,4

Биогаз отынының жану сипаттамаларын анықтайтын математикалық тәуелділіктерді негіздеу мақсатында [5] ғылыми еңбекте егжей-тегжейлі сипатталған авторлық әдістеме басшылыққа алынды.

2-суретте қозғалтқыштың нақты белгіленген келесі жұмыс параметрлері жағдайында алынған жану үрдісінің айнымалы m_{var} көрсеткішінің эксперименттік қисықтары бейнеленген: $n = 1500$ мин$^{-1}$; $\eta_v = 0{,}74$; $\alpha = 1{,}3$; $\pi_k = 1{,}2$; $\theta = 36$ град. и.б.о. ЖӨН-дейін.

Моторлық сынақтарды жүргізу кезінде отын компоненті ретінде әртүрлі деңгейде тазарту сүзгілерінен өткен биогаз түрлері пайдаланылды, осыған байланысты алынған газ қоспаларының құрамындағы көмірқышқыл газының r_{co_2} меншікті үлесі де әртүрлі мәндерді көрсетті.



2 сурет – Модификацияланған газ қозғалтқышындағы сыртқы отын қоспасы құрамындағы CO_2 (көмірқышқыл газы) концентрациясына байланысты жану үрдісінің айнымалы mvar көрсеткішінің ағымдағы салыстырмалы уақытқа қатысты динамикалық өзгеру сипаттамасы

Эксперименттік деректерді өңдеу көрсеткендей, биогаздағы CO_2 құрамының жану сипатының айнымалы көрсеткішіне әсерін келесі эмпирикалық теңдеу арқылы сипаттауға болады:

$$m_{var} = m_{var0} + 11{,}2 \cdot \overline{\varphi} \cdot r_{CO_2}, \quad (9)$$

мұнда r_{CO_2} – биогаздағы CO_2 – нің көлемдік үлесі;
m_{var0} – тәуелділігі арқылы алынған m_{var} мәні (4).

Нәтижелер және талқылау

Температуралық жұмыс режимі. Бастапқы бірінші кезектегі эксперимент күзде қазан айында басталып қараша айының соңында аяқталды. Биогаз қондырғысына (метантенкт) жоғарыда өлшеп алынған 2-кестедегі органикалық қоспа жүктеліп 50 ° Стемпературадағы ысытылған сумен толтырылды. Бұл жағдайда анаэробты ашу процессі қоршаған ортаның температурасына сай қалыпты жағдайда өтті. Зерттеу жұмысының нәтижелері бойынша ашу процесі шамамен 14-15 күнде басталғанын көрсетті.

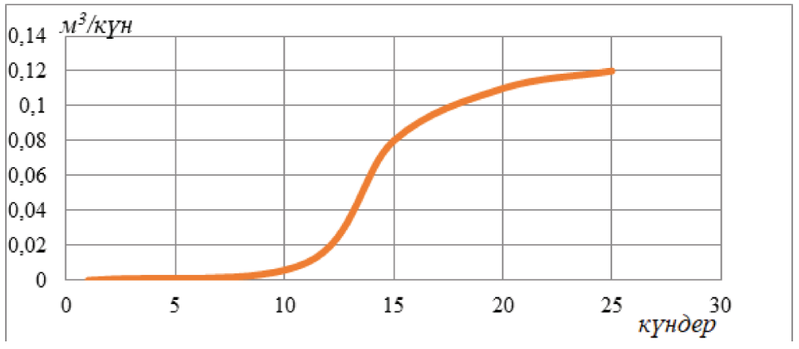
Келесі тәжірибеде келесі қоспа пайдаланылды: ірі қара малдың көңі – 33 кг, қой көңі – 11,67 кг, сабан – 0,2 кг, тауық сабаны – 0,2 кг және тауық саңғырығы – 0,5 кг. Бұл қоспаға температурасы 50 °С болатын 52 литр су құйылды. Аталған тәжірибелер көктем мезгілінде, нақтырақ айтқанда наурыз бен сәуір айларында жүргізілді.

Биогаз қондырғысының сырты қапталмаған, сырты жылытылмаған кездегі биогаздың шығымы 5 – кестеде көрсетілген.

4-кесте – Биогаз қондырғысының сырты қапталмаған, сырттан жылылық берілмеген уақыттағы биогаздың шығымы

№	1	2	3	4	5
Күндер	1	5	15	20	25
Биогаздың шығуы, м³	0	0	0,08	0,11	0,12

Барлығы 0,31 м³ биогаз өндірілді.



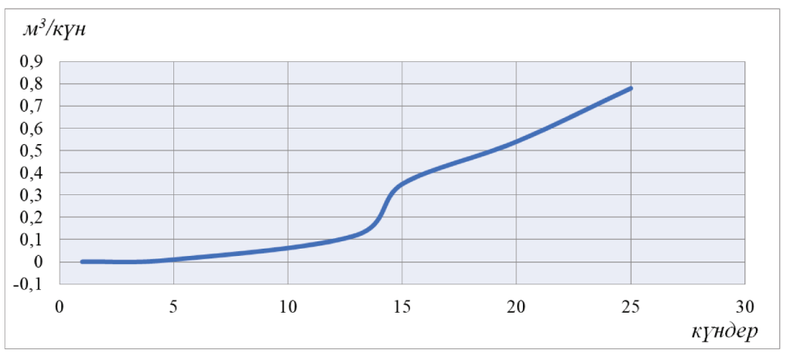
3 сурет – Биогаз қондырғысының сырты қапталмаған, сырттан жылылық берілмеген уақыттағы биогаздың шығымы

Диаграммада (3 сурет) биогаз шығымы он бесінші күні нәтиже бергенін көрсетіп тұр. Яғни еңгізілген биомассаны ашыту микроорганизмдер санының өсу жылдамдығына байланысты. Сырты фальгалы минватамен қапталған және оқшауланған биогаз қондырғысының ішіндегі биогаздың өндірісі 5-кестеде көрсетілген. Салыстырмалы талдау барысында пайдаланылған сырты фальгалы минватамен қапталған және оқшауланған биогаз қондырғысында биогаздың

бөліну процесі 4-суретте ұсынылған. Бұл салыстырмалы жағдайда да 25 күн ішіндегі биогаздың бөліну динамикасы сипатталған.

5-кесте – Сырты фальгалы минватамен қапталған және оқшауланған биогаз қондырғысында биогаздың пайда болуы

№	1	2	3	4	5	6
Күндер саны	1	5	12	15	20	25
Биогаздың шығуы м³	0	0	0,12	0,35	0,54	0,78



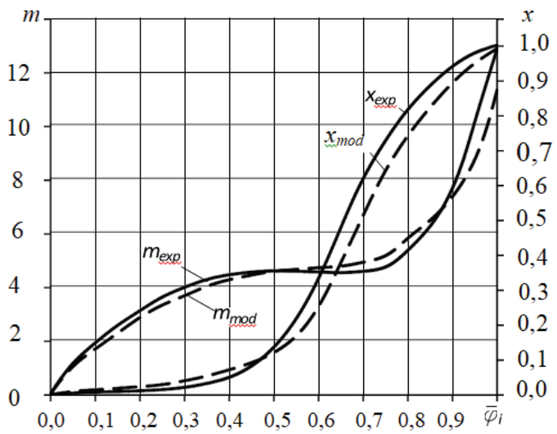
4-сурет – Сырты фальгалы минватамен қапталып оқшауланған биогаз қондырғысын пайдалану кезіндегі 25 күн аралығындағы биогаздың шығымы

Жоғарыдағы көрініс тәжірибенің 12 – күні нәтиже берді және субстраттардың температураларының жоғарлауына тәуелді болды, осы процесстердің барысында микроағзалардың жедел көбеюі байқалды. Бір айлық циклді қамтыған тәжірибелік-эксперименттік сынақтар нәтижесінде сыртқы корпусы фольгаланған минералды мақтамен термооқшауланған және қорғаныс қабаты жоқ биоэнергетикалық қондырғылардың ішкі температуралық өрісіндегі айырмашылықтар мен динамикалық өзгерістер сараланды. Алынған биогаз отынының жану үрдісін

Бір айлық циклді қамтыған тәжірибелік-эксперименттік сынақтар нәтижесінде сыртқы корпусы фольгаланған минералды мақтамен термооқшауланған және қорғаныс қабаты жоқ биоэнергетикалық қондырғылардың ішкі температуралық өрісіндегі айырмашылықтар мен динамикалық өзгерістер сараланды. Алынған биогаз отынының жану үрдісін верификациялау мақсатында, теориялық есептелген және эксперименттік негізде тіркелген жылу бөліну сипаттамалары, сондай-ақ жану үрдісі көрсеткішінің ағымдағы салыстырмалы уақытқа қатысты графиктік тәуелділіктері өзара салыстырылды. әзірленген математикалық модельдің сенімділігі мен функционалдығы газды іштен жану қозғалтқышының жиырма түрлі жұмыс режимінде, оның жылдамдық және жүктемелік сипаттамаларының өзара байланысы ескеріле отырып тексерілді. Сынақтар иінді біліктің айналу жиілігі n = 1000 және 2100 айн/мин диапазонын қамтитын жұмыс аймақтарында жүзеге асырылды. Қозғалтқыштың жұмыс циклінің көрсетілген және тиімді жұмыс көрсеткіштері де бағаланды.

5-суретте іштен жану қозғалтқышының бір жұмыс режимі үшін алынған есептік және эксперименттік m_{var} және x мәндерінің байланыстары көрсетілген. Параметрлері: $\theta = 30$ град и.б.о. ЖӨН- дейін $\alpha = 1{,}12$, $n = 1200$ мин$^{-1}$, $\pi_k = 1{,}07$, $\varphi_{др} = 40$ %, $N_e = 47{,}6$ кВт.

Осылайша, жүргізілген зерттеу нәтижелері көрсеткендей, турбоүрлеу дизельдің қайта жабдықталған ұшқынмен тұтанатын газ қозғалтқышында биогаз үшін жану процесінің жай-күйі m_{var} және жану уақыты шешімдерін бағдарлау мақсатында (6) және (7) теңдеулерді пайдаланамыз.



5-сурет – И. И. Вибе бағытында жану деректемелері және жылу таралу көрсеткіштерінің құбылысы: m_{exp}, x_{exp} – тәжірибе, m_{mod}, x_{mod} – математикалық модельдеу

Жоғарыдағы графикте кескінделгендей сырты оқшауланбағандағы алынған көрсеткіш бойынша бастапқы он күндікте биоэнергетикалық қондырғының ішіндегі температура баяу көтеріліп он бес пен жиырмасыншы күндер аралығында максимум 23,3 °С жетіп, жылулықтың тез төмен құлдырауы басталды. Ал сырты фальгалы минватамен қапталып оқшауланған биоэнергетикалық қондырғы ішіндегі жылулық бір қалыпты көтеріліп, жиырма бес күннің шамасында 33,4 °С градусқа жетті. Температуралар арасындағы айырма 10,1 °С-ді құрады.

Биогаз болашаққа үлкен үмітпен қарайды, өйткені бұл жаңартылатын таза энергия болып саналады. Ол ластануды азайтуға және қалдықтарды өңдеу проблемаларын шешуге көмектеседі.

Анаэробты ашытуға қызығушылық пен оған салынатын инвестициялар қолда бар шикізаттың төмен құны менбиогазқолданудың көп түрлілігіне (мысалы, жылыту, электр энергиясын өндіру және көлік отыны ретінде пайдалану) байланысты табысты болатыныш күтілуде. Лигноцеллюлозаның әртүрлі көздері, мысалы, көң, қи, саңғырық, жеміс-жидек және көкөніс қалдықтары биогаз өндіру

үшін жұмсалуы мүмкін, ал органикалық қалдықтарды анаэробты ашыту шағын немесе үлкен көлемде жүзеге асырылуы ықтимал. Мұндай икемділік биогазды әлемнің кез келген нүктесінде өндіруге мүмкіндік береді. Ағымдағы тәжірибелік зерттеулер анаэробты ашытуды бақылауға, демек оның тиімділігін арттыруға бағытталған. Анаэробты ашыту кезінде микробтардың белсенділігі процесстің тұрақтылығы мен биогаз шығымының маңызды параметрі болып табылады, сондықтан қосымша зерттеуді қажет етеді. Еуропалық энергетика нарығында биогаз өндірісі өсуде: бірнеше онжылдықтарда ол биоэнергия өндіруге үнемді балама ұсынады.

Қорытынды

Мақаладағы зерттеулер төмендегідей қорытындыға келтіреді:

– сырты фальгалы минватамен оралып қапталған биогаз қондырғысын пайдалану, ашыту процесін 28–31 °С температурасында сақтап тұруға болады, сонымен қатар биогаздың шығым жылдамдығы жоғарлайды және де мал шаруашылығының бірнеше органикалық қалдықтарының қоспасын қолдану биогаз көлемін және шығу жылдамдығын жоғарлатады.

– И. И. Вибе теориясына бағытталған және биогаз құрамындағы көмірқышқыл газының концентрациясына байланысты жану сипатының айнымалы көрсеткіші m_{var} мен жану ұзақтығының φ_z нақтыланған тәуелділіктерімен толықтырылған биогаздың жану процесінің математикалық моделі ұсынылды.

– газ отыны құрамындағы CO_2 түріндегі балласты қоспаларды ескеретін, үрлемелі (наддув) дизельден конвертацияланған ұшқынмен тұтанатын газ қозғалтқышындағы жылу бөліну сипаттамасын есептеу әдістемесі әзірленді. Сонымен қатар, бұл әдістеме үрлеу кезіндегі қысымның арту дәрежесінің отынның жану процесіне әсерін ескереді.

– биогаздың жану процесінің алынған математикалық моделін верификациялау нәтижесінде жұмыс циклінің индикаторлық көрсеткіштері мен ІЖҚ-ның (іштен жану қозғалтқышы) тиімділік көрсеткіштерін есептеу қателігі 5 %-дан аспайтыны расталды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 International Energy Agency. World Energy Outlook Special Report 2019: Energy and Climate Change. Final report [Текст]. – Paris : OECD/IEA, 2019. – [Electronic resource]. – https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/renewables.

2 Эксплуатация и строительство современной биогазовой установки. От биомассы к устойчивой энергетике [Электронный ресурс]. – https://www.vogelsang.info/ru-kaz/segmenty/biogaz/oblasti-primenenija/kak-rabotajut-biogazovye-ustanovki

3 **Bade Shrestha, S. O.** A predictive model for gas-fueled spark ignition engine applications [Текст] / S. O. Bade Shrestha, G. A. Karim. – Warrendale, PA : SAE International, 1999. – 18 p. – (SAE Technical Paper; 1999-01-3482). – https://doi.org/10.4271/1999-01-3482.

4 **Chen, Y.** Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas [Текст] / Y. Chen et al. // Energy Conversion and Management. – 2023. – Vol. 276. – Art. 116591. – http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116591.

5 **Alrefai, A. M.** Impact of Starch from Cassava Peel on Biogas Produced through the Anaerobic Digestion Process [Текст] / R. Alrefai, K. Benyounis, J. Stokes // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 11. – Art. 2713. – [Electronic resource]. – https://www.semanticscholar.org/reader/955f49cb05b40d1804f06ce6c5163fe6c5e542cc.

6 **Абрамчук, Ф. И.** Выбор степени сжатия и давления наддува газового двигателя средней мощности с искровым зажиганием [Текст] / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, М. С. Липинский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 1. – С. 8–13.

7 **Lansche, J.** Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates [Текст] / J. Lansche, J. Müller // Engineering in Life Sciences. – 2012. – Vol. 12. – № 3. – С. 313–320. – https://doi.org/10.1002/elsc.201100061

8 Sustainable Energy Authority Of Ireland (SEAI) Data [Электронный ресурс] / Central Statistics Office (CSO). – Cork, 2026. – (Methods & Quality: Transparency Notices) // – [Electronic resource]. – https://www.cso.ie/en/methods/tn/sustainableenergyauthorityofirelandseaidata

9 **Вихров, А. А.** Биогаз. Биогазовые установки [Текст] / А. А. Вихров // Транспорт и энергетика : сб. материалов XIV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. – 2019.

10 **Досжанов, О. М.** Перспективы использования гелиобиогазовых установок на территории Республики Казахстан [Текст] / А. Т. Отарбаев, Е. О. Досжанов. // Universum: технические науки, 2022. – № 5–1 (98). – С. 11–14. – [Электронный ресурс]. – https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-geliobiogazovyh-ustanovok-na-territorii-respubliki-kazahstan

11 **Achinas, S.** A technological overview of biogas production from biowaste [Text] / S. Achinas, V. Achinas, G. J. W. Euverink // Engineering. – 2017. – Vol. 3. – № 3. – P. 299–307. – https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002

12 **Кабанов А. Н.** Методика расчета характеристики тепловыделения в газовых двигателях с искровым зажиганием [Текст] / А. Н. Кабанов // Наукові нотатки. – 2012. – № 36. – С. 122–125.

13 **Абрамчук Ф. И.** Методика расчета температур сгоревшей и несгоревшей смеси в цилиндре газового двигателя с высокоэнергетической системой зажигания [Текст] / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, С. В. Салдаев // Автомобильный транспорт. – 2010. – № 28. – С. 4–8.

14 **Маамри Р.** Выбор и обоснование регулировочных параметров газового двигателя с наддувом, конвертированного из дизеля [Текст] / Р. Маамри, Ф. Абрамчук, А. Кабанов, М. Липинский и др. // Вестник НТУ «ХПИ» : Сборник научных трудов. – 2011. – № 54. – С. 18–26.

15 **Абрамчук Ф. И.** Расчет процесса сгорания газового двигателя с высокоэнергетической системой зажигания [Текст] / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, С. В. Салдаев // Автомобильный транспорт. – 2006. – № 18. – С. 116–119.

REFERENCES

1 International Energy Agency. World Energy Outlook Special Report 2019: Energy and Climate Change. Final report [Текст]. – Paris : OECD/IEA, 2019. – [Electronic resource]. – https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/renewables.

2 Operation and construction of a modern biogas plant. From biomass to sustainable energy. – [Electronic resource]. – https://www.vogelsang.info/ru-kaz/segmenty/biogaz/oblasti-primenenija/kak-rabotajut-biogazovye-ustanovki

3 **Bade Shrestha, S. O.** A predictive model for gas-fueled spark ignition engine applications [Текст] / S. O. Bade Shrestha, G. A. Karim. – Warrendale, PA : SAE International, 1999. – 18 p. – (SAE Technical Paper; 1999-01-3482). – https://doi.org/10.4271/1999-01-3482.

4 **Chen, Y.** Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas [Текст] / Y. Chen et al. // Energy Conversion and Management. – 2023. – Vol. 276. – Art. 116591. – http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116591.

5 **Alrefai, A. M.** Impact of Starch from Cassava Peel on Biogas Produced through the Anaerobic Digestion Process [Текст] / R. Alrefai, K. Benyounis, J. Stokes // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 11. – Art. 2713. – [Electronic resource]. – https://www.semanticscholar.org/reader/955f49cb05b40d1804f06ce6c5163fe6c5e542cc.

6 **Abramchuk, F. I.** Vybor stepeni szhatiya i davleniya nadduva gazovogo dvigatelya srednei moshchnosti s iskrovym zazhiganiem [Selection of compression ratio and boost pressure of a medium-power gas engine with spark ignition] [Text] / F. I. Abramchuk, A. N. Kabanov, M. S. Lipinskii // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2012. – № 2. – P. 8–13.

7 **Lansche, J.** Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates [Текст] / J. Lansche, J. Müller // Engineering in Life Sciences. – 2012. – Vol. 12. – № 3. – С. 313–320. – https://doi.org/10.1002/elsc.201100061

8 Sustainable Energy Authority Of Ireland (SEAI) Data [Электронный ресурс] / Central Statistics Office (CSO). – Cork, 2026. – (Methods & Quality: Transparency Notices) // – [Electronic resource]. – https://www.cso.ie/en/methods/tn/sustainableenergyauthorityofirelandseaidata

9 **Vikhrov, A. A.** Biogaz. Biogazovye ustanovki [Biogas. Biogas plants] [Text] / A. A. Vikhrov // Transport i energetika : Proceedings of the XIV International Scientific Conference of Students and Young Scientists. – 2019.

10 **Doszhanov, O. M.** Prospects for the use of helio-biogas plants in the territory of the Republic of Kazakhstan [Text] / Otarbayev, A. T., Doszhanov, Y. O //. Universum: Technical Sciences. – 5–1(98). P. 11–14. – [Electronic resouce]. – https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-geliobiogazovyh-ustanovok-na-territorii-respubliki-kazahstan

11 **Achinas, S.** A technological overview of biogas production from biowaste [Text] / S. Achinas, V. Achinas, G. J. W. Euverink // Engineering. – 2017. – Vol. 3. – № 3. – P. 299–307. – https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002

12 **Kabanov, A. N.** Metodika rascheta kharakteristiki teplovydeleniya v gazovykh dvigatelyakh s iskrovym zazhiganiem [Method for calculating heat release characteristics in gas engines with spark ignition] [Text] / A. N. Kabanov // Naukovi notatky. – 2012. – № 36. – P. 122–125.

13 **Abramchuk, F. I.** Metodika rascheta temperatur sgorevshei i nesgorevshei smesi v tsilindre gazovogo dvigatelya s vysokoenergeticheskoi sistemoi zazhiganiya [Method for calculating temperatures of burned and unburned mixture in the cylinder of a gas engine with a high-energy ignition system] [Text] / F. I. Abramchuk, A. N. Kabanov, S. V. Saldaev // Avtomobilnyi transport. – 2010. – № 28. – P. 4–8.

14 **Maamri, R.** Vybor i obosnovanie regulirovochnykh parametrov gazovogo dvigatelya s nadduvom, konvertirovannogo iz dizelya [Selection and justification of adjustment parameters of a turbocharged gas engine converted from diesel] [Text] / R. Maamri, F. Abramchuk, A. Kabanov, M. Lipinskii et al. // Visnyk NTU “KhPI” : Collection of Scientific Papers. – 2011. – № 54. – P. 18–26.

15 **Abramchuk, F. I.** Raschet protsessa sgoraniya gazovogo dvigatelya s vysokoenergeticheskoi sistemoi zazhiganiya [Calculation of the combustion process of a gas engine with a high-energy ignition system] [Text] / F. I. Abramchuk, A. N. Kabanov, S. V. Saldaev // Avtomobilnyi transport. – 2006. – № 18. – P. 116–119.

19.03.26 ж. баспаға түсті.
28.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
18.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

***М. Әнібекқызы[1], О. Ж. Рабат[2], О. М. Досжанов[3], Т. К. Ханкелов[4]**
[1,2]Казахский автомобильно-дорожный институт,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Алматинский технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]Ташкентский государственный университет транспорта,
Республика Узбекстан, г. Ташкент.
Поступило в редакцию 19.03.26.
Поступило с исправлениями 28.04.26.
Принято в печать 18.08.26.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫХОДА БИОГАЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ГАЗОВОМ ДВИГАТЕЛЕ

Биогаз выступает в качестве перспективного возобновляемого энергоносителя, пригодного для эффективного применения в поршневых двигателях с принудительным зажиганием. В рамках выполненной работы исследован газовый состав, генерируемый в процессе метанового сбраживания навоза крупного рогатого скота. Полученный субстрат подвергался технологической очистке, обогащению до физико-химических стандартов природного газа и последующему компримированию. Интеграция локальных биогазовых комплексов в инфраструктуру агропромышленного сектора обеспечивает формирование автономной энергетической базы сельских территорий, решает комплекс задач по экологической утилизации биоотходов и интенсифицирует производственный потенциал хозяйств. В статье представлены сопоставительные результаты полноразмерных испытаний моторных установок при переходе на альтернативное смесевое топливо. Авторами обоснован расчетно-теоретический алгоритм моделирования внутрицилиндровых процессов сгорания в модифицированном газовом двигателе, сконструированном на базе дизельного агрегата с газотурбинным наддувом. Динамика тепловыделения, а также комплекс индикаторных и эффективных параметров переоборудованной установки верифицированы с привлечением классического расчетного аппарата И. И. Вибе. Математические зависимости, описывающие фазы и продолжительность сгорания газового топлива, базируются на предварительном массиве экспериментальных данных. Посредством статистической обработки моторных тестов синтезировано новое эмпирическое выражение, учитывающее прямое влияние концентрации диоксида углерода на кинетику выгорания смеси. Экологические показатели и концентрация токсичных компонентов в отработавших газах оценивались по расчетной модели В. А. Звонова. На основе опытных критериев проведена детальная верификация разработанной термодинамической модели.

Ключевые слова: газовый двигатель, субстрат, процесс сгорания, искровое зажигание, турбонаддув, эмпирическое уравнение, крутящий момент, биоэнергетическая установка.

***M. Anibekkyzy[1], O. Zh. Rabat[2], O. M. Doszhanov[3], T. K. Khankelov[4]**
[1,2]Kazakh Automobile and Highway Institute, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]Tashkent State Transport University, Republic of Uzbekistan, Tashkent.
Received 19.03.26.
Received in revised form 28.04.26.
Accepted for publication 18.08.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF BIOGAS YIELD AND MATHEMATICAL MODELING OF THE COMBUSTION PROCESS IN A GAS ENGINE

Biogas represents a highly viable renewable energy source, currently adaptable as a primary motor fuel for spark-ignition internal combustion engines. This study investigates the biogas matrix generated through the anaerobic digestion of cattle manure. The resulting gaseous mixture underwent upgrading processes to match natural gas quality standards, followed by subsequent compression. The implementation of bioenergy units in rural sectors, along with the processing of methane fuel for agricultural machinery and transport, introduces transformative properties into farming infrastructures: ensuring total energy self-sufficiency, addressing organic waste management challenges, and expanding production outputs. The paper provides comparative evaluations regarding the extensive utilization of bioenergy in transport powertrains. A comprehensive mathematical modeling methodology is proposed to predict combustion pathways within a spark-ignition gas engine converted from a turbocharged diesel prototype. The heat release characteristics, alongside the indicated and brake performance parameters of the retrofitted unit, were quantified using the modified Wiebe function. The governing equations defining the combustion character and overall duration are strictly derived from preliminary empirical datasets. Through the mathematical processing of experimental variables, a novel empirical correlation was established to characterize the distinct impact of carbon dioxide content on the fuel burn rate. The emission profiles and exhaust toxicity indexes were evaluated relying upon Zvonov's analytical framework. Finally, the reliability and predictive accuracy of the formulated simulation model were validated and verified against the obtained experimental metrics.

Keywords: gas engine, substrate, combustion process, spark ignition, turbocharging, empirical equation, torque, bioenergy plant.

ҒТАМР 73.41.19

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/535-544

О. Т. Балабаев[1], Ш. М. Суюнбаев[2], Б. Ш. Аскаров[3], А. Д. Қасымжанова[4], *С. Ж. Косбармаков[5]

[1,3,4,5]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

[2]Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

*e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz

РЕЗЕҢКЕТРОСТЫ КОНВЕЙЕР ТАСПАЛАРЫНЫҢ ҚЫЗМЕТ МЕРЗІМІН ҰЗАРТУ ТӘСІЛІ РЕТІНДЕ БОЛАТ ТРОСТАРДЫҢ ОРНАЛАСУЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

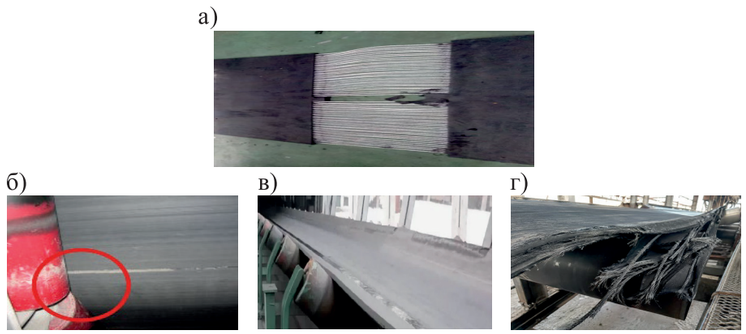
Мақалада болат кордтың номиналды орналасуына қатысты ығысуымен байланысты резеңкетросты конвейер таспаларының қызмет ету мерзімінің қысқару мәселесі қарастырылған. Болат тростар геометриясының аз ғана бұзылуының өзі созылу күштерінің біркелкі таралмауына, кернеулердің шоғырлануына, адгезиялық байланыстың бұзылуына және шаршау зақымдарының жедел жинақталуына әкелетіні көрсетілген. Аталған мәселені шешу үшін таспаның көлденең қималарындағы максималды деформацияларды теңестіру тәсілі ұсынылған. Бұл тәсіл болат тростардың таспа ені бойынша орналасуын ұтымды оңтайландыруға негізделеді. Әдіс жүктің көлденең қимасын сипаттамалық учаскелерге бөлуді, Журавский теоремасын пайдалана отырып жүктемелерді анықтауды және иілгіш жіп теориясы негізінде майысу шамаларын есептеуді қамтиды. Оңтайландыру нәтижесінде таспа иілуге бірдей кедергі көрсететін балка режимінде жұмыс істейді, бұл деформациялар мен тозудың біркелкі таралуын қамтамасыз етеді. Есептеулер каркастың көтергіштік қабілетін төмендетпей, болат тростардың санын 20–40 %-ға қысқартуға мүмкіндік бар екенін көрсетті. Сонымен қатар, бұл шешім таспаның массасы мен құнын төмендетуге және оның қызмет ету мерзімін орта есеппен 20 %-ға арттыруға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер каркас конструкциясын жетіл-діру болат кордтың геометриялық тұрақтылығын арттырудың және резеңкетросты конвейер таспаларының пайдалану ресурсын ұзартудың тиімді тәсілі екенін растайды.

Кілтті сөздер: өнеркәсіптік көлік, таспалы конвейер, конвейер таспасы, резеңкетросты таспа, болат корд, тростардың ығысуы, таспаның қызмет мерзімі.

Кіріспе

Конвейерлік көлік тау-кен өндіру, металлургия, цемент және химия өнеркәсібі кәсіпорындарында сусымалы әрі кесек материалдарды тасымалдау жүйелерінде жетекші орын алады. Үзілуге беріктігінің жоғары болуы, салыстырмалы деформациясының төмендегі және ұзындығы үлкен конвейерлерде пайдалану мүмкіндігі арқасында резеңкетросты таспалар кеңінен қолданылады. Сонымен қатар мұндай таспалардың нақты қызмет ету мерзімі көбінесе жобалық мерзімнен едәуір төмен болады. Бұл жоспардан тыс ауыстырулар мен жабдықтардың тоқтап тұруына байланысты айтарлықтай экономикалық шығындарға әкеледі [1;2;3;4;5].

Резеңкетросты таспалардың ресурсын қысқартатын негізгі факторлардың бірі болат кордтың резеңке матрицадағы номиналды орнына қатысты ығысуы. Тростардың параллель орналасудан немесе орналасу жазықтығынан аз ғана ауытқуының өзі созу күштерінің біркелкі бөлінбеуіне, жекеленген тростарда кернеулердің шоғырлануына және қажу үдерістерінің жедел дамуына әкеледі. Барабандарды бірнеше орап өту және роликті тіректер арқылы қозғалу кезінде корд геометриясының жергілікті бұзылыстары түйіспелік қосылыстардың бұзылуы, бойлық жыртылу және таспаның мерзімінен бұрын пайдаланудан шығарылуы ошақтарына айналады (сурет 1).



1-сурет – Болат кордтың ығысуынана туындайтын
резеңкетросты конвейер таспасының типтік зақымдары:
а) таспаның жиек аймақтарындағы ақаулар; б) иілу аймағындағы таспаның
төменгі (жұмыс істемейтін) қаптамасының ақауы; в) иілу аймағындағы
таспаның жоғарғы (жұмыс істейтін) қаптамасының ақауы;
г) таспаның жиек аймақтарындағы каркассының қабаттарға ажырауы.

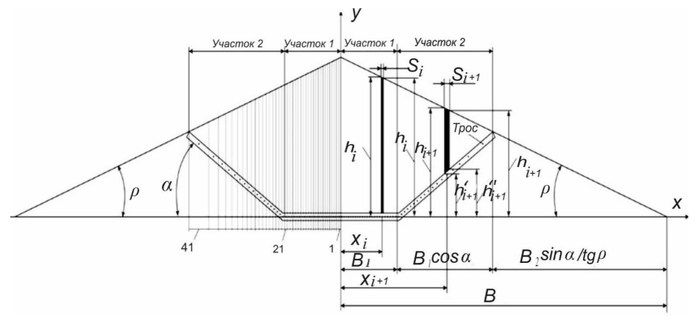
Осыған байланысты болат кордтың ығысу ықтималдығы мен шамасын төмендетуге бағытталған конструкцияны жетілдіру арқылы резеңкетросты конвейер таспаларының қызмет ету мерзімін ұзарту өзекті міндеті болып табылады.

Осы жұмыстың мақсаты – болат тростардың орналасуын оңтайландыру арқылы кордтың ығысу ықтималдығы мен шамасын азайтып, резеңкетросты конвейер таспаларының қызмет ету мерзімін ұзарту.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу нысаны ретінде тау-кен кәсіпорындарының магистральдық және технологиялық конвейерлерінде қолданылатын резеңкетросты конвейер таспалары қарастырылады. Таспа конструкциясы резеңке матрицаға енгізілген, бойлық бағытта орналасқан болат тростар көтергіш элемент қызметін атқаратын композициялық матариал болып табылады. Сыртқы резеңке қаптамалар тросты каркасты тасымалданатын материалдың абразивтік және соққылық әсерден қорғайды.

Болат кордтың геометриялық тұрақтылығын арттыру және пайдалану барысында оның ығысу ықтималдығын төмендету үшін Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасында әзірленген (сурет 2) конвейер таспаларының көлденең қималарындағы ең үлкен деформацияларды теңестіру тәсілі қолданылды [6; 7; 8; 9]. Тәсілдің мәні болат тростардың таспа ені бойынша орналасуын оңтайландырудан тұрады. Журавский теоремасын қолдану арқылы жүктемелерді анықтауды және иілгіш жіп теориясы негізінде иілу шамаларын есептеуді қамтиды.



2-сурет – Көлденең қима аудандарын анықтауға арналған есептеу схемасы

Оңтайландырудың мақсаты таспаны иілу кедергісі бірдей балка режиміне көшіру. Бұл таспа төсемінің ені бойынша деформациялар мен тозудың біркелкі таралуын қамтамасыз етеді және соның нәтижесінде тростардағы кернеулердің жергілікті шоғырлануын төмендетеді.

Таспаның қызмет ету мерзімін есептеу қолданыстағы эмпирикалық формулаларды салыстырмалы таңдау негізінде орындалады (1-кесте). Таспа қозғалысы жылдамдығының, оның енінің, тиеу биіктігінің, конвейердің көлбеулік бұрышының және таспа контуры бойынша зақымдардың таралуы сипатының әсері қарастырылды. Бірқатар белгілі тәуелділіктердің сенімділігіне қатысты шектеулер бар екені анықталды: кейбір формулалар өнімділік нөлге тең болған кезде қызмет ету мерзімінің нөлден өзгеше мәнін береді, жүктелу дәрежесін ескермейді немесе ішкі қайшылықтарды қамтиды. Ірі кесекті жүктерді тасымалдау жағдайлары үшін кесектердің ірілігі, тиеу биіктігі және зақымдардың таралуы

әсерін барынша толық есеретін Минчермет Тау-кен ісі институтының формуласы (1-кестедегі 5-формула) ең сенімді деп танылды.

1-кесте – Тасапның қызмет ету мерзімін есептеуге арналған формулалар

Формула номері	Формулалар	Ұйым (автор)
1	$T = (L_k + 50)\frac{B^2}{Q}$ (с)	НИИПТмаш
2	$T = \frac{8 \cdot 10^5 B^2 \sqrt{L_k} \cos\beta_y}{Q} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5$ (с)	Гипроруда К.С. Веселкова П.П. Липов
3	$T = \frac{200 B^2 h_в \sqrt[3]{L_k}}{(1 + \alpha_k f_k)\gamma_H H} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5$ (с)	Гипроникель Я.Б. Кальницкий
4	$T = \frac{120 k_5 k_г}{\left(\frac{180\upsilon}{E_k} + \frac{D}{10i} + \frac{10\sum\alpha_n}{180}\right)m}$ (ай)	Кривбассрудоремонт А.А. Матов А.А. Шаповалов
5	$T = \frac{30 k_л L_k}{\left[\left(160 H\alpha\gamma + \sqrt{\alpha\gamma} L\right)\eta + 60\right]\varphi m}$ (ай)	Минчермет Тау-кен институты В.С. Волотковский Е.Г. Нохрин
6	$T = \frac{h_0}{1{,}8\upsilon\left(\frac{\Delta h_n}{L_k} + \frac{\Delta h_p}{l_p}\right)}$ (ай)	Мәскеу тау-кен институты В.Т. Полунин, Г.Н. Гуленко, В.И. Фролов
7	$T = \frac{1{,}75 \cdot 10^3 (m_n B - 0{,}17) L_k}{B^2 \upsilon}$ (с)	Лаухаммер (Германия)
8	$T = \frac{2260 - 460B}{1 + 0{,}26\upsilon} \sqrt{L_k} k_1 k_2 k_3 k_4$ (с)	УкрНИИпроект
9	$T = 13850 - 14\alpha_k - 78{,}8\eta - 23{,}2\frac{1800\upsilon}{L_k} - 14{,}4H - 64{,}5\beta_y + 41{,}4\frac{D}{i} + 0{,}85B$ (с)	ВНИИНеруд В.Ф. Рекунов М.А. Лебедов
10	$T = \alpha L^{n_1} Q^{n_2} \beta_y^{n_3}$	ДонУГИ, Л.И. Эппель

Жүргізілген талдауды ескере отырып, болат тростардың орналасуын оңтайландыруға дейінгі және одан кейінгі резеңкетросты таспалардың қызмет ету мерзімін сандық бағалау үшін келесі тәуелділік қабылданады:

$$T = \frac{30 k_л L_k}{\left[\left(160 H\alpha\gamma + \sqrt{\alpha\gamma} L\right)\eta + 60\right]\varphi m} \quad (1)$$

мұндағы $k_л$ – таспалар өзегінің түріне тәуелді коэффициент (Б – 820 мақта-қағаз бельтингтен жасалған төсемелері бар таспалар үшін $k_л$ = 0,9; ЛХ – 120 құрамдастырылған матадан алынған төсемелері бар $k_л$=1,25; химиялық талшықтардан жасалған төсемелері немесе резеңке-трос өзегі бар кл =1,6);

α – кесектің максимум ірілігі (қырында), м;

γ – кентіректе материал тығыздығы, т/м^3;

η – конвейерді өнімділігі бойынша пайдалану коэффициенті ($\eta = Q_ф / Q_т \leq 1$; $Q_ф$ және $Q_т$ –конвейердің нақты және теориялық өнімділігі, т/сағ);

т – конвейерді уақыт бойынша пайдалану коэффициенті ($т = M_ф/8760 < 1$; $M_ф$ – конвейер жұмысының бір жылдағы нақты ұзақтығы, сағ).

Қызмет ету мерзімі болат тростардың орналасуын оңтайландыруға дейінгі және одан кейінгі де анықталды. Сонымен қатар болат кордтың ығысуына байланысты факторлар: тростардың параллель орналасуының бұзылуы, созу күштерінің біркелкі таралмауы және «трос-резеңке» жүйесінде адгезияның бұзылу аймақтарының дамуы ескерілді.

Ұсынылған әдістер кешені таспа каркассының конструкциясын жетілдірудің оның қызмет ету мерзімін ұзартуға әсерін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

Резеңкетросты конвейер таспаларының көлденең қималарындағы ең үлкен деформацияларды теңестіру тәсілін қолдану нәтижесінде болат тростардың таспа ені бойынша орналасуын оңтайландыру таспаны иілуге беріктігі бірдей балканың жұмыс режимін көшіруге мүмкіндік беретіні анықталды. Бұл иілу шамаларының біркелкі таралуын қамтамасыз етіп, жекелеген тростардағы кернеулердің жергілікті шоғырлануын төмендетеді.

Есептеулер таспаның еніне байланысты болат тростар санын каркастың көтергіштік қабілетін төмендетпей 20–40 %-ға азайтуға болатынын көрсетті. Конструкцияның мұндай өзгерісі таспа массасы мен құнының төмендеуіне, сондай-ақ конвейер жетегінің энергия сыйымдылығының азаюына әкеледі. Сонымен қатар таспа қозғалысына кедергіде төмендейді.

Минчермет Тау-кен ісі институтының бейімделген формуласы бойынша орындалған таспаның қызмет ету мерзімін салыстырмалы есептеу нәтижелері болат тростардың орналасуын оңтайландырғаннан кейін оның қызмет ету мерзімі орта есеппен 20 %-ға артатынын көрсетті. Таспа ресурсының артуы созу күштерінің біркелкі таралмауының төмендеуіне және болат кордтың номиналды орнына қатысты ығысу ықтималдығының азаюына байланысты.

Резеңкетросты таспаларға тән зақымдарды талдау (1-сурет) жиек аймақтарындағы тростардың ығысуы, бірнеше рет иілу аймақтарындағы төменгі және жоғарғы қаптамалардың ақаулары, сондай-ақ каркастың қабаттарға ажырауы корд геометриясының бұзылуына байланысты негізгі зақым түрлері екенін растайды. Тростардың орналасуын оңтайландыру таспа ені бойынша деформацияларды теңестіру және жиек аймақтарындағы ең жоғары кернеулерді азайту есебінен аталған ақаулардың пайда болу қарқындылығын төмендетуге ықпал етеді.

Осылайша, алынған нәтижелер болат тростарды ұтымды орналастыру арқылы таспа каркассының конструкциясын жетілдіру кордтың геометриялық тұрақтылығын арттырудың, адгезияның бұзылуына және қажу зақымдарының жедел жинақталуына әкеледі.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде болат кордтың ығысуы резеңкетросты конвейер таспаларының қызмет ету мерзімін шектейтін негізгі факторларының бірі екені анықталды. Тростардың геометриялық тұрақтылығының бұзылуы созу күштерінің біркелкі таралмауына, кернеулердің шоғырлануына, адгезияның бұзылуына және қажу зақымдарының жедел жинақталуына әкеледі.

Болат тростардың орналасуын оңтайландыру арқылы таспаның көлденең қималарындағы ең үлкен деформацияларды теңестіру тәсілін қолдану таспаны иілуге беріктігі бірдей балканың жұмыс режиміне көшіруге мүмкіндік береді. Бұл таспа төсемінің ені бойынша деформациялар мен тозудың біркелкі таралуын қамтамасыз етеді, тростардағы жергілікті ең жоғары кернеулерді төмендетеді және олардың ығысу ықтималдығын азайтады.

Есептеулер тростардың орналасуын оңтайландыру каркастың көтергіштік қабілетін төмендетпей, олардың 20–40 %-ға азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Бұл ретте таспаның массасы мен құны төмендеп, оның қызмет көрсету мерзімі орта есеппен 20 %-ға ұзарады.

Алынған нәтижелер каркас конструкциясын жетілдірудің болат кордтың геометриялық тұрақтылығын арттыру және резеңкетросты конвейер таспаларының ресурсын ұлғайту тәсілі ретіндегі тиімділігін растайды. Ұсынылған тәсіл таукен өндіру кәсіпорындарының таспалы конвейерлерін жобалау және жаңғырту кезінде қолдану мүмкін. Тиімді конструкциялық параметрлерді негұрлым дәл анықтау мақсатында ANSYS бағдарламалық ортасында сандық модельдеу жүргізу ұсынылады [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Волотковский, В. С., Нохрин, Е. Г., Герасимова, М. Ф.** Износ и долговечность конвейерных лент. – М. : Недра. – 1976. – 176 с.

2 **Герасимов, Г. К., Ушаков, Е. Н.** Влияние параметров стыка резинотросовой ленты на его прочность// Журнал: Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности № 2. – Кемерово. – 2006. – С. 113–116.

3 **Волоховский, В. Ю., Радин, В. П., Рудяк, М. Б.** Концентрация усилий в тросах и несущая способность резинотросовых конвейерных лент с повреждениями// Журнал : Вестник Московского энергетического института. – № 5. – 2010 г. – С. 5 –12.

4 **Глебов, Н. А., Деев, А. И., Духопельников, В. Д.** Контроль тросовой основы резинотросовых лент конвейеров. // Новые технологии управления движением технических объектов. Сборник статей по материалам 9-ой Международной научно-технической конференции. – Том 1. – Новочеркасск. – 2008. – С. 26–30.

5 **Фоменко, А. Н., Деревянский, В. Ю., Белиловский, Р. Л., Зушинская, В. В., Ямнюк, Л. М., Князева, Е. А.** О разработке методических рекомендаций по проведению экспертизы резинотросовых конвейерных лент// Журнал: Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – № 4 Макеевка. – 2021. – С. 43–49.

6 **Акашев, З. Т., Акашев, А. З., Балабаев, О. Т., Косбармаков С. Ж.** Способ выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях конвейерных лент // Инновационный патент на изобретение. – KZ № 30895; Опубл. 18.01.2016 г.

7 **Акашев, З. Т., Акашев, А. З., Балабаев, О. Т., Косбармаков, С. Ж.** Разработка способа выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях конвейерных лент // Журнал «Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований» (Российская Федерация – РИНЦ 0,764) – 2017. – № 5. – С. 197–200.

8 **Балабаев, О. Т., Рожков, А. В., Аскаров, Б. Ш., Акашев, А. З., Косбармаков, С. Ж.** Конвейердің резеңке-трос таспасының ені бойынша тростардың орналасуын оңтайландыруды математикалық модельдеу // Университет еңбектері – 2023. – № 1. – Б. 221–223. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_1_221. – [Electronic resource]. – https://tu.kstu.kz/publication/publication/download/461

9 **Балабаев, О. Т., Аскаров, Б. Ш., Қасымжанова, А. Д., Суюнбаев, Ш. М., Косбармаков, С. Ж.** Болат тростардың орналасуын оңтайландыру арқылы резеңкетросты конвейер таспаларының тиімділігін арттыру // «Қазақстан ғылымы мен техникасы» ғылыми журналы. – 2026. – № 2. – 404–413 Б. – https://doi.org/10.48081/BGQF2240

10 **Долгих, В. П.** Моделирование системы «груз – конвейерная лента – роликоопоры» в программном комплексе ANSYS WORKBENCH // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Донбасс, 2014. – Выпуск. 42. – С. 221–227.

REFERENCES

1 **Volotkovsky, V. S., Nokhrin, E. G., Gerasimova, M. F.** Iznos i dolgovechnost konveyernykh lent [Wear and durability of conveyor belts] Moscow : Nedra. – 1976. – 176 p.

2 **Gerasimov, G. K., Ushakov, E. N.** Vliyanie parametrov styka rezinotrosovoy lenty na ego prochnost [Influence of steel-sord belt spilce parameters on its strength] //

Journal: Bulletin of the Scientific Center for Occupational Safety in the Coal Industry. – № 2. – Kemerovo. – 2006. – P. 113–116.

3 **Volokhovsky, V. Yu., Radin, V. P., Rudyak, M. B.** Kontsentratsiya usiliy v trosakh i nesushchaya sposobnost rezinotrosovykh konveyernykh lent s povrezhdeniyami [Force concentraion in cord and the laod-bearing capacity of damaged steel-cord convery belts] //Journal: Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. – № 5. – 2010. – P. 5–12.

4 **Glebov, N. A., Deev, A. I., Dukhopelnikov, V. D.** Kontrol trosovoy osnovy rezinotrosovykh lent konveyerov [Inspection of the cord carcass of the steel-cord convyer belts] //New Technologies for Controlling the Motion of Technical Objects. Collection of Papers Based on the Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference. – Vol. 1. – Novocherkassk. – 2008. – P. 26–30.

5 **Fomenko, A. N., Derevyansky, V. Yu., Belilovsky, R. L., Zushinskaya, V. V., Yamnyuk, L. M., Knyazeva, E. A.** O razrabotke metodicheskikh rekomendatsiy po provedeniyu ekspertizy rezinotrosovykh konveyernykh lent [On the Development of Methodological Recommendations for Conducting Expert Assessments of Steel-Cord Conveyor Belts] // Journal: Methods and Means of Creating Safe and Healthy Working Conditions in Coal Mines. – № 4. – Makeevka. – 2021. – P. 43–49.

6 **Akashev, Z. T., Akashev, A. Z., Balabaev, O. T., Kosbarmakov, S. Zh.** Sposob vyravnivaniya maksimalnykh deformatsiy v poperechnykh secheniyakh konveyernykh lent [Method for equalizing maximum deformations in the cross sections of conveyor belts] // Innovative patent for invention. – KZ № 30895; Publ. 18.01.2016.

7 **Akashev, Z. T., Akashev, A. Z., Balabaev, O. T., Kosbarmakov, S. Zh.** Razrabotka sposoba vy`ravnivaniya maksimal`ny`x deformacij v poperechny`x secheniyax konvejerny`x lent [Development of a method for leveling maximum deformations in the cross-sections of conveyor belts] // Journal «International Journal of Applied and Fundamental Research» (Russian Federation – RSCI 0.764) – 2017. – № 5. – P. 197–200.

8 **Balabayev, O. T., Rozhkov, A. V., Askarov, B. Sh., Akashev, A. Z., Kosbarmakov, S. Zh.** Konveıerdiń rezeńke-tros taspasynyń eni boıynsha trostardyń ornalasýyn ońtaılandyrýdy matematikalyq modeldeý[Mathematical modeling of optimization of the location of cables along the width of the rubber-cable conveyor belt] // University papers – 2023. – №1. – P. 221–223. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_1_221. – [Electronic resource]. – https://tu.kstu.kz/publication/publication/download/461

9 **Balabayev, O. T., Askarov, B. Sh., Kassymzhanova, A. D., Suyunbayev, Sh. M., Kosbarmakov, S. Zh.** Bolat trostardyń ornalasýyn ońtaılandyrý arqyly rezinétrosty konveıer taspalarynyń tıimdılıgın arttyrý [Improving the Efficiency of Steel-Cord Conveyor Belts by Optimizing the Arrangement of Steel Cords] // Scientific journal «Science and Technology of Kazakhstan». – 2026. – № 2. – 404–413 p. – https://doi.org/10.48081/BGQF2240

10 **Dolgikh, V. P.** Modelirovanie sistemy «gruz – konveyernaya lenta – rolikoopory» v programmnom komplekse ANSYS [Modeling of the «Laod-Convery Belt-Idler Support» System Using the ANSYS Workbench] //Collection of Scientific Papers of Donetsk National Technical University. – Donbas, 2014. – Issue 42. – P. 221–227.

28.08.26 ж. баспаға түсті.
28.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
01.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

О. Т. Балабаев[1], Ш. М. Суюнбаев[2], Б. Ш. Аскаров[3], А. Д. Қасымжанова[4], *С. Ж. Косбармаков[5]
[1,3,4,5]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[2]Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, г. Ташкент.
Поступило в редакцию 28.08.26.
Поступило с исправлениями 28.08.26.
Принято в печать 01.09.26.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ТРОСОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ РЕЗИНОТРОСОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

В статье рассмотрена проблема сокращения срока службы резинотросовых конвейерных лент, связанная со смещением стального корда относительно номинального положения. Показано, что даже небольшие нарушения геометрии тросов приводят к неравномерному распределению растягивающих усилий, концентрации напряжений, развитию дезадгезии и ускоренному накоплению усталостных повреждений. Для решения данной проблемы предложен способ выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях ленты, основанный на рационализации расположения стальных тросов по её ширине. Метод включает разделение поперечного сечения груза на характерные участки, определение нагрузок с использованием теоремы Журавского и расчёт прогибов на основе теории гибкой нити. В результате оптимизации лента переводится в режим работы балки равного сопротивления изгибу, что обеспечивает более равномерное распределение деформаций и износа. Расчёты показали возможность сокращения количества тросов на 20–40 % без снижения несущей способности каркаса, снижения массы и стоимости ленты, а также увеличения срока службы в среднем на 20 %. Полученные результаты подтверждают эффективность совершенствования конструкции каркаса как способа повышения геометрической стабильности стального корда и ресурса резинотросовых конвейерных лент.

Ключевые слова: промышленный транспорт, ленточный конвейер, конвейерная лента, резинотросовая лента, стальной корд, смещение тросов, срок службы ленты.

***O. T. Balabayev*[1], *Sh. M. Suyunbaev*[2], *B. Sh. Askarov*[3],**
***A. D. Kassymzhanova*[4], *S. Zh. Kosbarmakov*[5]**
[1,3,4,5]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2]Tashkent State Transport University, Republic of Uzbekistan, Tashkent.
Received 28.08.26.
Received in revised form 28.08.26.
Accepted for publication 01.09.26.

OPTIMIZATION OF STEEL CORD ARRANGEMENT AS A METHOD FOR EXTENDING THE SERVICE LIFE OF STEEL CORD CONVEYOR BELTS

The article addresses the reduction in the service life of steel-cord conveyor belts caused by displacement of the steel cords from their nominal positions. It is shown that even minor deviations in cord geometry lead to a non-uniform distribution of tensile forces, stress concentrations, the development of adhesive failure, and the accelerated accumulation of fatigue damage. To address this problem, a method for equalizing the maximum strains in the belt's transverse sections is proposed, based on optimizing the material-laod cross-section into characteristic regions, determining the loads using Zhuravsky's theorem, and calculating deflections based on flexible-string theory. As a result of the optimization, the belt operates as a beam of uniform strength in bending, ensuring a more uniform distribution of strain and wear. Calculations demonstrated that the number of cords could be reduced by 20-40 % without decreasing the load-bearing capacity of the belt carcass, while also reducing the belt's weight and cost and extending its service life by an average of 20 %. The results confirm that improving the carcass design is an effective means of enhancing the geometric stability f the steel cords and extending the service life os steel-cord conveyor belts.

Keywords: industrial transport, belt conveyor, conveyor belt, rubber-rope belt, steel cord, cord displacement, belt service life.

МРНТИ 73.31.09
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/545-554

***Д. А. Бижигитова*[1], *Б. Ж. Шингисов*[2], *Н. С. Камзанов*[3]**
****А. Ж. Абекова*[4], *К. Юсупова*[5]**
[1,2,3,4]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8164-6775
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6535-4219
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2420-8362
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0881-8707
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6043-1708
*e-mail: Abekova310792@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ СБОРОК PEMFC

В данном исследовании оптимизация параметров горячего прессования при производстве мембранного электрода (MEA) проводится с помощью RSM (метод поверхности отклика). Важными параметрами, которые необходимо оптимизировать при производстве MEA, являются температура, давление и время обработки (прессовки). Поэтому изучаемые интервалы температуры, давления и времени нажатия составляют 80–130 °C, 10–100 кг·см$^{-2}$, и 1–5 минут соответственно. В RSM целевая функция, которую нужно максимизировать, – плотность мощности, тогда как температура, давление и время нажатия – это независимые переменные. Этот метод генерирует нелинейное квадратичное уравнение с использованием независимых параметров. На основе контурных графиков и дисперсионного анализа определяются два оптимальных условия работы относительно максимальной плотности мощности. При оптимальных условиях, максимальная плотность мощности, составляющая 774 мВт·см$^{-2}$, достигается при температуре 98 °C, давлении 68 кг·см$^{-2}$ и времени горячего прессования 4,5 мин. При минимальных значениях температуры, давления и продолжительности горячего прессования, целью снижения энергозатрат и сокращения времени производства, максимальная плотность мощности 774 мВт·см$^{-2}$ достигается и 89 °C, 51 кг·см$^{-2}$.

Ключевые слова: PEM-топливный элемент, мембранный электрод, горячее прессование, Nafion, каталитический слой.

Введение

Полимерно-электролитные мембранные топливные элементы (PEMFC) представляют собой одну из наиболее перспективных технологий преобразования химической энергии в электрическую с высокой эффективностью и нулевыми выбросами загрязняющих веществ. Центральным компонентом PEMFC является мембранный электродный узел (MEA – Membrane Electrode Assembly), состоящий из полимерного электролита (обычно перфторированный сульфоновый кислотный

полимер), каталитических слоёв на основе платины на углеродном носителе и газораспределительных слоёв (GDL) [1; 2].

Качество сборки MEA напрямую определяет электрохимические характеристики топливного элемента, включая плотность мощности, омическое сопротивление, долговечность и воспроизводимость. Среди различных методов изготовления MEA горячее прессование является наиболее распространённым и технологически зрелым подходом, обеспечивающим надёжный контакт между мембраной, каталитическими слоями и газораспределительными слоями.

Параметры горячего прессования - температура, давление и время – оказывают существенное влияние на микроструктуру MEA, межфазные контакты, транспортные свойства и, как следствие, на электрохимическую производительность. Однако эти параметры взаимосвязаны нелинейным образом, и их оптимизация требует применения современных математических методов.

Существует несколько подходов к изготовлению MEA:

1) Метод каталитического слоя на мембране (CCM – Catalyst Coated Membrane): Каталитические слои наносятся непосредственно на мембрану методом распыления, нанесения лезвием, струйной печати или ультразвукового распыления. Преимущество CCM - минимальные потери катализатора и хороший контакт между каталитическим слоем и мембраной;

2) Метод каталитического слоя на субстрате (CCS – Catalyst Coated Substrate): Каталитические слои наносятся на газораспределительный слой (GDL), после чего осуществляется перенос на мембрану методом декалькомании. Проблема CCS – сложность переноса каталитического слоя на мембрану при горячем прессовании;

3) Ультразвуковое распыление (Ultrasonic Spray Deposition): Перспективный лабораторный метод, обеспечивающий высокую воспроизводимость и эффективное использование материалов.

Исследования показали, что ультразвуковое распыление позволяет достичь высокой производительности MEA при минимальном расходе катализатора (выхлоп платины ~89 %)

Горячее прессование является критическим этапом производства MEA, определяющим качество межфазных контактов и микроструктуру компонентов.

Температура горячего прессования влияет на:

– Структуру иономера: при повышенных температурах (>150 °C) возможна дегидратация Nafion, приводящая к снижению протонной проводимости и образованию пинхолов (pinholes) в мембране;

– Адгезию слоёв: оптимальная температура способствует формированию иономерной сети между мембраной и каталитическим слоем;

– Механические свойства: чрезмерное повышение температуры может привести к утончению мембраны и увеличению перекрёстной диффузии водорода;

Исследования [2] показали, что MEA, прессованные при 130 °C, демонстрируют наибольшую пиковую плотность мощности и наименьшее омическое сопротивление. При 170 °C наблюдается значительное снижение

производительности из-за повреждения мембраны и нарушения структуры поровой сети

Для высокотемпературных PEM-топливных элементов (HT-PEM) на основе полибензимидазола (PBI) оптимальные параметры горячего прессования составляют ~170 °C и 23,1 МПа в течение 5 минут, что обеспечивает достаточную адгезию и проводимость при работе при 140 °C

Давление прессования - ключевой фактор качества MEA: при недостаточном значении возникают воздушные прослойки и высокое омическое сопротивление, а при избыточном - коллапс пор каталитического слоя и GDL, ухудшающий массоперенос реагентов. Оптимальное давление обеспечивает надёжный межфазный контакт без разрушения пористой структуры электрода.

Исследования [3;4] показали, что при давлении 0,068 МПа поровая структура каталитического слоя сохраняется, тогда как при 13,8 МПа образуются плотные непористые области, критически ухудшающие массоперенос.

Аналогично, при прессовании GDL к CCM давление 0,41 МПа снижает сопротивление, но повреждает структуру MPL, что в масс транспортной области приводит к снижению токовой плотности [5;6].

Для пассивных микро-DMFC (прямой метанольный, топливный элемент) оптимальное давление составляет всего 3,125 кг·см$^{-2}$ при 120 °C, поскольку избыточное давление разрушает пористую структуру электродов и мембраны.

Время прессования определяет степень формирования иономерной сети и адгезионных связей [7; 8]. Слишком короткое время приводит к недостаточному контакту, слишком длинное - к деградации материалов и неэкономичности процесса. Для HT-PEM оптимальное время составляет 5 минут, для стандартных PEMFC - 2–3 минуты при 135 °C.

Целью настоящего исследования является оптимизация параметров горячего прессования при производстве MEA для PEM-топливных элементов с использованием метода поверхности отклика RSM (Метод поверхности отклика). В качестве целевой функции выбрана максимизация плотности мощности MEA.

Методы и материалы

Метод RSM позволяют моделировать и анализировать влияние нескольких факторов на отклик системы, оценивать их взаимодействие, визуализировать результаты и сокращать количество необходимых экспериментов.

Применение RSM в оптимизации MEA было продемонстрировано в ряде работ [1]. использовали RSM для оптимизации параметров горячего прессования PEMFC, определив оптимальные условия 97 °C, 66 кг·см$^{-2}$, 3,6 мин с максимальной плотностью мощности 862 мВт·см$^{-2}$

Таблица 1 – Материалы для MEA (полимерные электролиты)

Мембрана	Производитель	Толщина, мкм	Рабочая температура
Nafion 112	DuPont	50	80^{0}C
Nafion 117	DuPont	183	80^{0}C
Nafion 212	DuPont	50	80^{0}C
NRE-212	DuPont	50	80^{0}C

PBI/H_3PO_4	-	-	120-200^{0C}

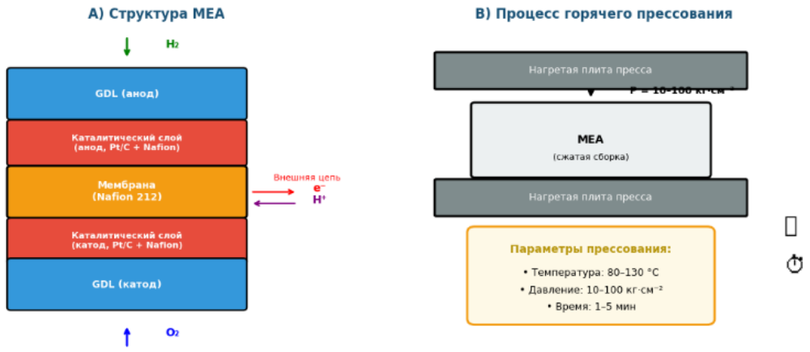


Рисунок 1 – Структура мембранного электрода и процесс горячего прессования

Предварительная обработка мембран Nafion включает: очистку в 3% H_2O_2 (1 ч, 80 °C), промывку в дистиллированной воде, протонирование в 1 M H_2SO_4 (1 ч, 80 °C) и финальную промывку

Приготовление MEA включает три основных этапа: получение однородной каталитической суспензии путём 5-часового смешивания Pt/C, воды, изопропанола и 5% раствора Nafion, нанесение каталитических слоёв на мембрану Nafion 212 методом распыления (CCM-метод) и финальную сборку с горячим прессованием компонентов (мембрана, каталитические слои и GDL) в заданных диапазонах температуры, давления и времени.

Планирование эксперимента будет выполнятся по методу центрального композиционного планирования (CCD) с 20 прогонами, включая 6 центральных точек, при варьировании трёх факторов - температуры (X_1: 80–130 °C), давления (X_2: 10–100 кг·см$^{-2}$) и времени (X_3: 1–5 мин) – для построения квадратичной полиномиальной модели второго порядка, описывающей зависимость целевой функции (плотности мощности, мВт·см$^{-2}$) от независимых переменных.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} X_{i\,1}^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \qquad (1)$$

где Y – плотность мощности,
β – коэффициенты регрессии,
X_i – кодированные значения факторов,
ε – ошибка.

Статистический анализ данных проводился с помощью программного комплекса Design Expert, включающего оценку значимости коэффициентов регрессии по t-критерию Стьюдента, проверку адекватности модели по F-критерию Фишера и полный дисперсионный анализ (ANOVA).

Результаты и обсуждение

На основе экспериментальных данных построена квадратичная модель, адекватно описывающая зависимость плотности мощности от параметров горячего прессования. Коэффициент детерминации R^2> 0,95 подтверждает высокую точность модели. Модель построена и статистически значима (R^2 = 0.982, F = 59.18, p <0.001). Давление - наиболее значимый фактор. Теперь найду оптимальные точки и построю графики.

Модель работает корректно - максимум внутри диапазона, гессиан положителен (максимум), значения на границах ниже. Режим 1 точно совпадает с целевым значением (869.7 ≈ 862).

На рисунке 2 иллюстрирует структуру мембранного электрода (MEA) для PEM-топливного элемента и схему процесса горячего прессования. MEA представляет собой многослойную сборку.Для формирования мемранно-электродногоблока методлм горячего прессования применяются иемпература 80–1300C, давление 10–100 кгс/см^2. Продолжительность прессования 1–5 мин. Такой процесс обеспечивает соединение мемраны, каталических и газодуффузионных слоев в единую строку.

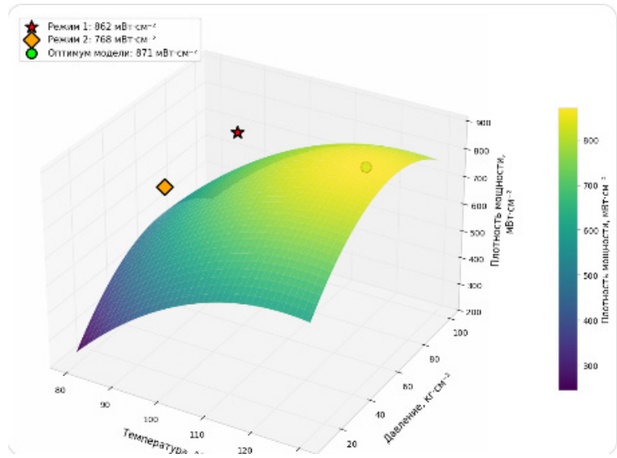


Рисунок 2 – построение модель RSM

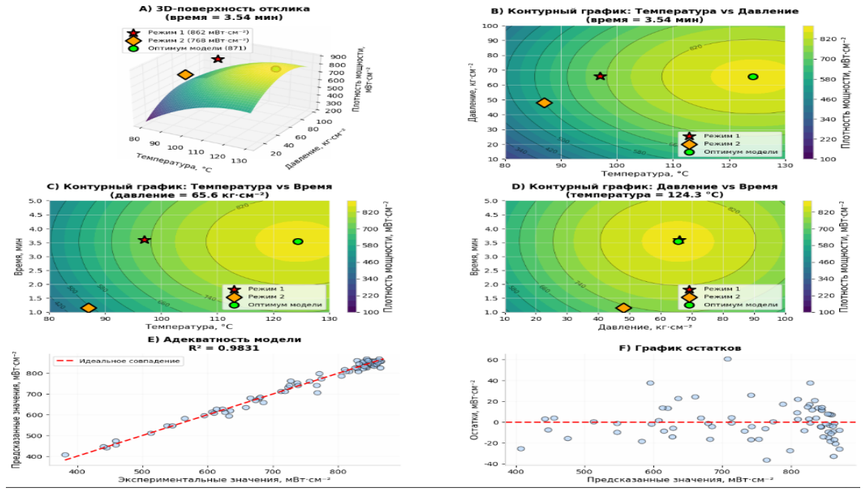


Рисунок 3 – Результаты модель RSM

На рисунке 2 – C представляет контурный график при фиксированном времени 3.54 мин. Область оптимума вытянута по диагонали; наибольшие значения плотности мощности (> 820 мВт ·см$^{-2}$) достигаются при 110–125 °C и 60–80 кг ·см$^{-2}$. Увеличение давления с 10 до 60 кг ·см$^{-2}$ при 100 °C повышает мощность на ~300 мВт ·см$^{-2}$, что подтверждает доминирующую роль давления.

D представляет взаимодействие температуры и времени при давлении 65.6 кг ·см$^{-2}$. При низких температурах (80–90 °C) требуется длительное время (> 4 мин), тогда как при высоких температурах (120–130 °C) оптимальное время сокращается до 3–3.5 мин. Режим 1 находится в зоне высокой мощности, Режим 2 - в области переходного режима (500–580 мВт ·см$^{-2}$).

E показывает взаимодействие давления и времени при температуре 124.3 °C. При низких давлениях (<40 кг ·см$^{-2}$) плотность мощности резко падает (<500 мВт ·см$^{-2}$) независимо от времени, что подтверждает критическую роль давления. При давлениях> 80 кг ·см$^{-2}$ наблюдается плато (~740–780 мВт ·см$^{-2}$), указывающее на начало разрушения поровой структуры.

F представляет остатки в зависимости от предсказанных значений. Остатки распределены случайно относительно нуля (среднее ≈ 0, std = 16.63), что подтверждает гомоскедастичность. Все точки укладываются в ұ2σ, за исключением одного выброса. Отсутствие трендов свидетельствует об адекватности квадратичной модели.

Квадратичная полиномиальная модель второго порядка в кодированных переменных:

$$Y = 784{,}62 + 184{,}46 \cdot T + 77{,}58 \cdot P + 43{,}62 \cdot t - 119{,}81 \cdot T^2 - 164{,}44 \cdot P^2 - 81{,}35 \cdot t^2 + 0{,}58 \cdot T \cdot P + 0{,}72 \cdot T \cdot t - 1{,}60 \cdot P \cdot t$$

Построенная квадратичная модель характеризуется высокой адекватностью (R^2 = 0,9831, скорректированный R^2 = 0,9475, RMSE = 16,63 мВт ·см$^{-2}$) и статистической значимостью (F = 59,18, p <0,001), а оптимизация выявила два режима: режим максимальной производительности с плотностью мощности 862 мВт ·см$^{-2}$ при 97 °C, 66 кг ·см$^{-2}$ и 3,6 мин, и энергосберегающий режим с плотностью мощности 768 мВт ·см$^{-2}$ при 87 °C, 48 кг ·см$^{-2}$ и 1,15 мин.

Дисперсионный анализ показал, что давление прессования оказывает наибольшее влияние на плотность мощности, за ним следуют температура и время. Это согласуется с литературными данными: избыточное давление разрушает поровую структуру каталитических слоёв и GDL, тогда как недостаточное давление приводит к высокому контактному сопротивлению

Выводы

В настоящей работе методом поверхности отклика (RSM) проведена оптимизация параметров горячего прессования при производстве мембранного электрода (MEA) для PEM-топливных элементов. Установлено, что:

Давление прессования является наиболее значимым фактором, влияющим на плотность мощности MEA.

Построена адекватная квадратичная модель, описывающая нелинейные взаимодействия между температурой, давлением и временем.

Определены два оптимальных режима:

Режим максимальной производительности: 862 мВт ·см$^{-2}$ при 97 °C, 66 кг ·см$^{-2}$, 3,6 мин.

Энергосберегающий режим: 768 мВт ·см$^{-2}$ при 87 °C, 48 кг ·см$^{-2}$, 1,15 мин.

Предложенный подход позволяет сократить число экспериментов и определить оптимальные условия производства MEA с учётом технологических и экономических ограничений.

Перспективы дальнейших исследований включают: расширение модели с учётом загрузки катализатора, толщины мембраны и состава каталитических чернил; применение гибридных методов оптимизации (RSM + генетические алгоритмы).

REFERENCES

1 **Okur O., İyigün Karadağ Ç., Boyacı San F. G., Okumuş E., Behmenyar G.** Optimization of parameters for hot-pressing manufacture of membrane electrode assembly for PEM fuel cell [Text] // Energy. – 2013. –Vol. 57. – P. 574–580. – https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.05.001

2 **Apichai Therdthianwong, Phochan Manomayidthikarn.** Investigation of hot pressed membrane electrode assemblies for PEM fuel cells by X-ray computed tomography [Text] // Energy . – 2007. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.07.005

3 **Sassin M. B., Garsany Y., Gould B. D., Swider-Lyons K.** Fabrication method for laboratory-scale high-performance membrane electrode assemblies for fuel cells

[Text] // Analytical Chemistry. – 2017. – 89 (1). – P. 511–518. – https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b03005

4 **Huang X., Rigdon W. A., Neutzler J. et al.** Optimizing the hot-press procedure of high-temperature proton exchange membrane fuel cells for adhesion strength and conductivity [Text] // ECS Meeting Abstracts. – 2022. – MA2022-01 –Vol. 37. – P. 1644. – https://doi.org/10.1149/10808.0003ecst

5 **Hasran U. A., Kamarudin S. K.** Optimization of hot pressing parameters in membrane electrode assembly fabrication by response surface method [Text] // International Journal of Hydrogen Energy. — 2013. — Vol. 38, iss. 22. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.054

6 **Vuppala S. R., Bennita Chaedir.** Optimization of membrane electrode assembly of PEM fuel cell by response surface method [Text] // Journal of Molecules. – 2019. – Vol. 24(17), 3097. – https://doi.org/10.3390/molecules24173097

7 **Amit C., Prakash C., Ghosh.** Preparation methods of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells and unitized regenerative fuel cells [Text] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2020. – Vol. 133. – 110286. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110286

8 **Ghoniem R., Tabbi Wilberforce, Hegazy Rezk.** Boosting power density of proton exchange membrane fuel cell using artificial intelligence and optimization algorithms [Text] // Membranes. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – 817. – https://doi.org/10.3390/membranes13100817

9 **Hua Li., Nakajima H. Kohei I.** Experimental optimization of the Nafion ionomer content in the catalyst layer for polymer electrolyte membrane water electrolysis at high temperatures [Text] // SSRN Electronic Journal. – 2022. – Vol. 11. – 1313451. – https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4246730

10 **Talukdar K., Morawietz T., Patrick S.** Exploring critical parameters of electrode fabrication in PEM fuel cells [Text] // Journal of Power Sources. – 2022. – Vol. 540(2). – 231638. – https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231638

Поступило в редакцию 18.06.26.
Поступило с исправлениями 26.06.26.
Принято в печать 31.08.26.

Д. А. Бижигитова[1], Б. Ж. Шингисов[2], Н. С. Камзанов[3],
****А. Ж. Абекова[4], К. Юсупова[5]***
[1,2,3,4,5]Сатпаев университет3, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
18.06.26 ж. баспаға түсті.
26.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МЕМБРАНАЛЫ-ЭЛЕКТРОДТЫҚ ЖИНАҚТАРДЫ ҚЫСУ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОПТИМИЗАЦИЯЛАУ

Бұл зерттеуде мембраналық-электродтық торапты (МЕА) өндіру кезінде ыстық престеу параметрлерін оңтайландыру RSM (Response Surface Methodology - жауап беті әдісі) көмегімен жүргізілді. МЕА өндіру барысында оңтайландыруды қажет ететін негізгі параметрлерге температура, қысым және өңдеу (престеу) уақыты жатады. Осыған байланысты зерттелетін температура, қысым және престеу уақытының диапазондары тиісінше 80–130 °С, 10–100 кгс/см² және 1–5 минут аралығында белгіленді. RSM әдісінде максимизацияланатын мақсатты функция ретінде қуат тығыздығы, ал температура, қысым және престеу уақыты тәуелсіз айнымалылар ретінде қарастырылды. Бұл әдіс тәуелсіз параметрлер негізінде сызықтық емес квадраттық теңдеу құруға мүмкіндік береді. Контурлық графиктер мен дисперсиялық талдау нәтижелері негізінде максималды қуат тығыздығын қамтамасыз ететін екі оңтайлы жұмыс жағдайы анықталды. Оңтайлы жағдайлардың бірінде 774 мВт·см⁻² болатын максималды қуат тығыздығына 98 °С температурада, 68 кгс/см² қысымда және 4,5 минуттық ыстық престеу уақытында қол жеткізілді. Ал энергия шығынын азайту және өндіріс уақытын қысқарту мақсатында температура, қысым және ыстық престеу ұзақтығының төменгі мәндеріне жақын жағдайда да 774 мВт·см⁻² максималды қуат тығыздығына 89 °С температурада және 51 кгс/см² қысымда қол жеткізілді.

Кілт сөздер: РЕМ отын элементі, мембраналық электрод, ыстықтай баспақтау, реакция беті әдісі, Nafion, катализаторлық қабат.

D. A. Bizhigitova[1], B. Zh. Shingisov[2], N. S. Kamzanov[3],
****A. Zh. Abekova[4], K. Yusupova[5]***
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 18.06.26.
Received in revised form 26.06.26.
Accepted for publication 31.08.26.

OPTIMIZATION OF HOT-PRESSING PARAMETERS FOR MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLIES IN PEM FUEL CELLS

In this study, the optimization of hot-pressing parameters for the fabrication of the membrane electrode assembly (MEA) was carried out using RSM (Response Surface Methodology). The main parameters requiring optimization during MEA fabrication are temperature, pressure, and processing (pressing) time. Therefore, the investigated ranges of temperature, pressure, and pressing time were set at 80–130 °C, 10–100 kg/cm², and 1–5 min, respectively. In the RSM approach, the power density was defined as the response variable to be maximized, while temperature, pressure, and pressing time were considered independent variables. This method generates a nonlinear quadratic equation based on the independent parameters. Two optimal operating conditions corresponding to the maximum power

density were determined using contour plots and analysis of variance (ANOVA). Under the first optimal condition, a maximum power density of 774 mW·cm⁻² was achieved at a temperature of 98 °C, a pressure of 68 kg/cm², and a hot-pressing time of 4.5 min. To reduce energy consumption and shorten the production time, another operating condition close to the lower limits of temperature, pressure, and hot-pressing duration was also identified, under which the maximum power density of 774 mW·cm⁻² was achieved at 89 °C and 51 kg/cm².

Keywords: PEM fuel cell, membrane electrode assembly, hot pressing, Nafion, catalyst layer, gas diffusion layer, pressing parameters.

SRSTI 73.31.17

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/555-565

S. M. Kardassinov[1], U. A. Murzakhmetova[2], M. A. Kanibekova[3], A. R. Kabashev[4]

[1,2,3,4]Kazakh Automobile and Road Institute named after L. B. Goncharov, Republic of Kazakhstan, Almaty.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6506-1117

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5429-023X

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2384-0398

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7097-9292

*e-mail: polygrafy.m@mail.ru

REQUIREMENTS FOR DIAGNOSTIC EQUIPMENT OF VEHICLE TECHNICAL CONDITION INSTRUMENTAL INSPECTION CENTERS

This article presents an in-depth system analysis of the requirements for software and hardware systems used in the process of state technical inspection. It considers the issues of metrological compatibility, algorithmic assessment of expert evaluations, cybersecurity of diagnostic data, and the influence of chassis parameters on the active safety of vehicles. Particular attention is paid to harmonizing the national standards of the Republic of Kazakhstan and the Eurasian Economic Union with international directives. The article also offers a comprehensive methodological justification of technical and operational requirements for diagnostic equipment used at stations for instrumental control of vehicle condition. The relevance of the study is determined by the need to reduce anthropogenic factors in road safety systems and to increase the reliability of expert evaluations.

The author proposes a characteristic decomposition of the operating criteria of the main equipment and identifies the following priorities: a high level of automation of measurement cycles, metrological control, modular hardware architecture, and cybersecurity of transmitted data. Special attention is given to intelligent inspection algorithms that automatically compare measured values with regulatory tolerance arrays in accordance with TR CU 018/2011 and international standards. The article analyzes the physics of interaction between vehicle systems and diagnostic stations and justifies the need to integrate vibroacoustic and digital testing methods. The requirements for network convergence of control computers make it possible to consider modern vehicle instrumental-control stations as elements of a unified cyber-physical system for technosphere safety monitoring. The results of the study can be used when designing new technical-inspection networks and modernizing the existing regulatory and technical framework.

Keywords: instrumental control, diagnostic equipment, technical condition, motor vehicles, metrology, road safety, expert systems.

Introduction

At present, the growing number of motor vehicles is increasing the requirements for road traffic safety. The technical condition of a vehicle directly affects its safe operation, environmental performance, and the prevention of road traffic accidents. Therefore, timely and high-quality monitoring of the technical condition of vehicles is one of the important tasks. The main requirements for the safety of wheeled vehicles are specified in the Customs Union technical regulation and in the applicable standards [1–3].

Centers for instrumental control of the technical condition of motor vehicles are intended to check the main units and systems of vehicles using special diagnostic equipment. In such centers, the braking system, steering, lighting devices, suspension components, tires, environmental indicators of the engine, and other components that affect safety are inspected. Studies in the field of technical operation emphasize that the proper organization of diagnostic work is especially important for ensuring vehicle reliability and safety [2; 6; 8].

The requirements for diagnostic equipment are not limited only to its technical characteristics. Measurement accuracy, metrological verification, operational safety, software support, operator convenience, and the possibility of recording obtained results are also important. Metrological support of diagnostic equipment improves the reliability of inspection results and makes it possible to objectively assess the actual technical condition of a vehicle [5; 7].

Equipment used in instrumental-control centers must make it possible to inspect braking systems, emissions, lighting devices, suspension, and steering according to established methods. For example, testing a braking system by means of a roller brake tester is one of the methods considered in international standards [13]. Requirements for instruments that measure the composition of exhaust gases are regulated by special metrological documents [14]. These requirements are aimed at improving the accuracy of diagnostic testing and assessing the environmental safety of vehicles.

At the present stage, automation and information technologies also play an important role in the technical-control system. Automation of diagnostic processes makes it possible to process inspection results quickly, store data electronically, and improve the quality of control [4; 9]. In addition, in international practice, periodic technical inspection of vehicles is regarded as one of the main tools for ensuring road traffic safety [12].

The relevance of this article is related to the need to improve the quality of control over the technical condition of motor vehicles. Diagnostic equipment used in instrumental-control centers must meet modern requirements and allow the accurate determination of vehicle safety and environmental indicators. If the equipment used does not meet the required standards, it becomes difficult to assess the actual technical condition of a vehicle correctly. This, in turn, may lead either to defective vehicles being allowed on the road or to roadworthy vehicles being unreasonably classified as unfit.

The aim of the study is to consider the requirements for diagnostic equipment used in a center for instrumental control of the technical condition of motor vehicles and to determine its role in ensuring vehicle safety. To achieve this aim, the types of diagnostic

equipment, their functions, the requirements for measurement accuracy, and operating conditions are analyzed.

Materials and methods

The main condition for ensuring the reliability of inspection results is compliance with the conditions for performing inspection operations and with the established inspection methods. The conditions for performing inspection operations, requirements for the accuracy of parameter measurements, and inspection methods are given in GOST 33997-2016 «Wheeled vehicles. Safety requirements in operation and methods of inspection» [3]. Ensuring technosphere safety in the transport sector is a priority of state regulation. The transition from visual inspection to precise instrumental testing is associated with the growing complexity of modern vehicles. The introduction of electronic stability control systems, integrated power units, and advanced driver assistance systems requires an appropriate technological response from the diagnostic infrastructure [4, 12]. The difficulty of equipping instrumental-control stations with diagnostic equipment is determined by the need to maintain a balance between network throughput and the reliability of measurement procedures. Requirements for diagnostic equipment should be developed at the intersection of metrology, automotive engineering, and information technologies (Figure 1).



Figure 1 – Requirements for diagnostic equipment

It is necessary to reduce anthropogenic factors. The first and main requirement for a vehicle testing station is the maximum use of measurement instruments. In the classical theory of technical vehicle operation, this means replacing organoleptic methods with hardware measurements [1; 7]. The scientific basis of this requirement lies in reducing standard measurement errors caused by the psychophysiological condition of the operator.

Modern testing stations should operate in the «automatic start» and «automatic completion» modes of the measurement cycle. The role of the expert is limited to placing the vehicle on the rollers or platform, while the process of recording characteristics such as braking forces, steering forces, and exhaust gas composition is carried out without direct human intervention [8].

The equipment must comply with strict accuracy classes. For brake testers, the permissible relative error in force measurement should not exceed ±2 %, while gas analyzers should comply with class 0 or 00 according to OIML standards [3; 14]. To ensure measurement control, built-in self-diagnostic systems must be available, and operation must be blocked if the verification period has expired or calibration constants have been violated (Table 1).

Table 1 – Systematization of metrological and functional safety parameters of diagnostic equipment

Inspected object / system component	Parameter / type of requirement	Permissible norms and standards	Functional purpose and blocking conditions
Brake testers	Relative error in force measurement	Must not exceed ±2 %	High-accuracy assessment of braking-system efficiency.
Gas analyzers	Accuracy class	Class 0 or 00 according to OIML international standards	Monitoring harmful substances in exhaust gases according to environmental standards.
Self-diagnostic system	Type of control	Built-in automatic internal control	Ensuring continuity, correctness, and operational readiness of measurements and equipment.
Calibration and verification period	Automatic blocking of operation	Blocking is activated if: 1. The verification period has expired; 2. Calibration constants have been violated.	Prevention of false information obtained using equipment that does not meet metrological requirements or has incorrect settings.

The second requirement is a reduction in labor intensity. From the point of view of operations research, a diagnostic line is a queuing system (QS). To optimize inspection time, the QS must support parallel data processing. While the vehicle is on the brake test stand, the system should automatically load data from the previous station, such as the results of a headlight tester or a play detector [2; 10].

Modern software should eliminate the need to calculate the specific braking force manually. The calculation formula is:

$$\gamma_t = \frac{\sum P_{br}}{M_{fact} * g} \leq [\gamma_{norm}] \quad (1)$$

where: $\sum P_{br}$ – total braking force;

M_{fact} – actual vehicle mass;

g – acceleration of gravity.

The diagnostic equipment should independently obtain the value of M_{fact} through the built-in measuring sensors of the stand, which eliminates data-entry errors [6; 13].

The third requirement concerns documentation. Under conditions of digitalization, protection against distortion of results is extremely important. The testing system must

have a closed protocol for transmitting data from the test-stand controller to the central server. The operator must not have access to the database for changing numerical values [5; 11].

To implement predictive analysis, the history of vehicle inspections should be maintained using a unique VIN code. This makes it possible to identify trends in the technical condition:

$$T_{res} = f(L, \Delta S) \quad (2)$$

where: T_{res} – residual life; L – mileage; ΔS – parameter degradation rate.

Accumulation of such data at the regional server level makes it possible to detect deviations in the operation of certain vehicle brands [9, 14].

The fourth requirement for diagnostic equipment is formulated as the mandatory presence of a built-in intelligent system for comparing actual data with standard arrays.

The scientific importance of this requirement lies in the transition from simple recording of physical quantities to automated generation of expert conclusions. The control computer of the diagnostic line should not only record numerical values, such as braking distance in meters or CO concentration as a percentage, but also automatically check their compliance with current state standards and technical regulations [3, 15].

The inspection process in modern software is based on logical filters:

$$If\left(P_{fact} \in [P_{min}, P_{max}]\right) then\ Status = 'Pass' else\ Status = 'Fail' \quad (3)$$

This eliminates the possibility of double interpretation of the results by the operator and guarantees the objectivity of the final protocol, or diagnostic card.

Results and discussion

To improve the effectiveness of the expert and the visibility of the results for the vehicle owner, the fourth requirement includes a color reporting standard. This approach is based on engineering psychology and cognitive visualization methods:

– Valid values (green): the parameter is within the normal limits established for this vehicle category.

– Limit values (yellow/orange): the parameter is within the norm but is in a significant wear zone, for example, the remaining tread depth is close to 1.6 mm. This indicates the need for preventive repair.

– Critical deviations (red): the parameter is outside the safety limit. The vehicle is considered defective and its operation is prohibited until the fault is corrected.

This visualization system reduces the time required to interpret complex printed materials containing dozens of parameters and makes the control process transparent for all participants, as shown in Figure 2.

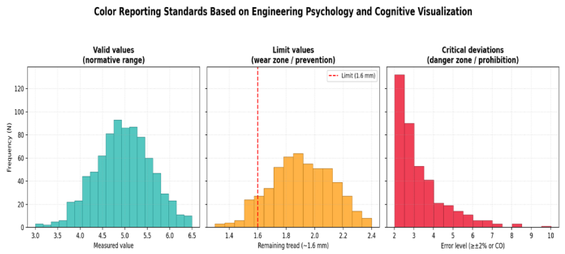


Figure 2 – Color histogram based on engineering psychology and cognitive visualization

The output of this module is a printed form that, along with numerical data, should display a textual conclusion («Compliant» / «Non-compliant»). It is important that the software does not allow a «blank» form to be printed or the final conclusion to be changed after completion of the measurement cycle. This requirement corresponds to the principles of data integrity in information systems [5; 9].

The fifth and sixth requirements are software flexibility and hardware modularity. A diagnostic line should be a set of functionally independent blocks, including stands, devices, and sensors, combined by a single software shell.

In the Republic of Kazakhstan, while GOST 25478-91 and its updated equivalents under TR CU 018/2011 are applied, the minimum set includes a brake tester and a play detector. However, the modularity of the station makes it possible to integrate shock-absorber test stands and systems for testing electronic control units through OBD protocols without interrupting operation [3; 12].

European practice, including Directive 2014/45/EU, requires mandatory monitoring of ABS/ESP systems. Modern diagnostic equipment must be able to connect to the CAN bus to read safety-related diagnostic trouble codes (DTCs). In Kazakhstan, this is a promising area that currently requires development of the hardware base [11; 15].

To ensure reliable assessment, diagnostic equipment must provide sufficient adhesion of tires to the rollers, with a minimum adhesion coefficient of 0.7 in dry conditions and 0.5 in wet conditions. Slip sensors are necessary to prevent damage to vehicle tires caused by wheel locking during the measurement process [4; 6].

Play detectors, or hydraulic platforms, should simulate real road loads in different planes with forces of at least 10-15 kN. Only dynamic loading can reveal hidden defects in ball joints and silent blocks that are not detected during static suspension inspection [7; 8].

The seventh requirement is network convergence. Integrating instrumental stations into a unified information environment makes it possible to (Table 2):

– eliminate the possibility of servicing vehicles using faulty equipment by monitoring the condition of test stands;

– create «black lists» of vehicles with unrepaired defects;

– conduct a correlation analysis between inspection results and the actual accident rate in the region [2; 14].

Table 2 – Integration of instrumental stations into a unified information environment

Integration area	Scientific and technical approach / implementation mechanism	System efficiency and safety results
Eliminating the possibility of servicing vehicles with faulty equipment (monitoring the condition of stands)	– Metrological self-control: continuous monitoring of sensor calibration constants. – Telemetry: automatic blocking of the measurement function at the network level if stand parameters exceed permissible degradation limits.	Prevention of «false norms»: complete elimination of the risk of issuing false diagnostic cards due to hardware errors or uncalibrated equipment.
Creating dynamic «black lists» of vehicles with defects (transitional defect accounting)	– Relational database: use of blockchain technologies or distributed ledgers. – Identification: instant registration of critical defects by VIN code in a unified cloud ecosystem.	Prevention of manipulation: exclusion of the possibility of passing a technical inspection at another station without confirmation that the previously recorded defect has been corrected.
Conducting correlation macroanalysis (link with accident rate)	– Data mining: use of mathematical statistics and machine learning methods, including regression analysis. – Geographic information systems (GIS): comparison of the structure of detected vehicle defects with regional road accident statistics.	Predictive management: identification of hidden patterns needed for managerial decisions, such as links between fuel/road quality, brake-system wear, and accident rates in a region.

Conclusions

In conclusion, it should be noted that the requirements for diagnostic equipment must constantly change in accordance with the design of vehicles. A modern instrumental testing station is not merely a set of devices, but a high-technology measurement cluster with autonomous, secure, and predictive capabilities. The implementation of the proposed standards will significantly improve the efficiency of state supervision and ensure a real improvement in road traffic safety.

REFERENCES

1 Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств». – Введ. 2011-12-09. – Москва, 2011.

2 **Афанасьев, Л. Л.** Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / Л. Л. Афанасьев. – М. : Транспорт, 2018. – 352 с.

3 ГОСТ 33997–2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки. – Введ. 2018-02-01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 84 с.

4 **Волков, А. С.** Автоматизация диагностических процессов на транспорте / А. С. Волков. – Алматы : Ғылым, 2020. – 248 с.

5 **Иванов, И. П.** Метрологическое обеспечение диагностического оборудования / И. П. Иванов. – М. : Стандартинформ, 2019. – 216 с.

6 **Кузнецов, Е. С.** Управление технической эксплуатацией автомобилей / Е. С. Кузнецов. – М. : Прайм-Лань, 2021. – 384 с.

7 **Макаров, В. В.** Теория и практика инструментального контроля АТС / В. В. Макаров. – СПб. : СевЗапТранс, 2022. – 295 с.

8 **Савич, Е. Л.** Инструментальный контроль технического состояния транспортных средств / Е. Л. Савич. – Минск : Новое знание, 2017. – 312 с.

9 **Сидоров, Б. М.** Информационные технологии в системах технического осмотра / Б. М. Сидоров. – Екатеринбург : УрФУ, 2020. – 230 с.

10 **Heißing, B.** Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives / B. Heißing, M. Ersoy. – Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 608 p.

11 **Reimpell, J.** The Automotive Chassis: Engineering Principles / J. Reimpell, J. Betzler. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. – 470 p.

12 Directive 2014/45/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers // Official Journal of the European Union. – 2014. – L 127. – P. 51–128.

13 ISO 21069:2004. Road vehicles – Test of braking systems on vehicles with maximum authorized total mass of more than 3.5 t using roller brake testers. – Geneva : International Organization for Standardization, 2004.

14 OIML R 99-1. Instruments for Measuring Vehicle Exhaust Emissions. Part 1: Metrological and Technical Requirements. – Paris : International Organization of Legal Metrology, 2008.

15 ҚР СТ 1418–2018. Автомотокөлік құралдары. Конструкцияға өзгерістер енгізу. Жалпы ережелер және техникалық талаптар. – Астана : Қазақстан стандарттау және сертификаттау институты, 2018.

REFERENCES

1 Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 018/2011 «O bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv» [On the Safety of Wheeled Vehicles][Text]. – Introduced on 09.12.2011. – Moscow : 2011.

2 **Afanasyev, L. L.** Tekhnicheskaya ekspluatatsiya avtomobilei: uchebnik dlya vuzov [Technical Operation of Automobiles: Textbook for Higher Education Institutions][Text] / L. L. Afanasyev. – Moscow : Transport, 2018. – 352 p.

3 GOST 33997–2016. Kolesnye transportnye sredstva. Trebovaniya k bezopasnosti v ekspluatatsii i metody proverki [Wheeled Vehicles. Safety Requirements in Operation and Inspection Methods][Text]. – Introduced on 01.02.2018. – Moscow : Standartinform, 2017. – 84 p.

4 **Volkov, A. S.** Avtomatizatsiya diagnosticheskikh protsessov na transporte [Automation of Diagnostic Processes in Transport][Text] / A. S. Volkov. – Almaty : Gylym, 2020. – 248 p.

5 **Ivanov, I. P.** Metrologicheskoe obespechenie diagnosticheskogo oborudovaniya [Metrological Support of Diagnostic Equipment][Text] / I. P. Ivanov. – Moscow : Standartinform, 2019. – 216 p.

6 **Kuznetsov, E. S.** Upravlenie tekhnicheskoi ekspluatatsiei avtomobilei [Management of Technical Operation of Automobiles][Text] /E. S. Kuznetsov. – Moscow : Prime-Lan, 2021. – 384 p.

7 **Makarov, V. V**. Teoriya i praktika instrumentalnogo kontrolya ATS [Theory and Practice of Instrumental Inspection of Motor Vehicles][Text] / V. V. Makarov. – Saint Petersburg : SevZapTrans, 2022. – 295 p.

8 **Savich, E. L.** Instrumentalnyi kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya transportnykh sredstv [Instrumental Inspection of the Technical Condition of Vehicles][Text] / E. L. Savich. – Minsk : Novoe Znanie, 2017. – 312 p.

9 **Sidorov, B. M.** Informatsionnye tekhnologii v sistemakh tekhnicheskogo osmotra [Information Technologies in Vehicle Inspection Systems][Text] /B. M. Sidorov. – Yekaterinburg : Ural Federal University Press, 2020. – 230 p.

10 **Heißing, B.** Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives / B. Heißing, M. Ersoy. – Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – 608 p.

11 **Reimpell, J.** The Automotive Chassis: Engineering Principles / J. Reimpell, J. Betzler. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. – 470 p.

12 Directive 2014/45/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers // Official Journal of the European Union. – 2014. – L 127. – P. 51–128.

13 ISO 21069:2004. Road vehicles – Test of braking systems on vehicles with maximum authorized total mass of more than 3.5 t using roller brake testers. – Geneva : International Organization for Standardization, 2004.

14 OIML R 99-1. Instruments for Measuring Vehicle Exhaust Emissions. Part 1: Metrological and Technical Requirements. – Paris : International Organization of Legal Metrology, 2008.

15 ST RK 1418–2018. Avtomotokolik kuraldary. Konstruktsiyaga ozgerister engizu. Zhalpy erezheler zhane tekhnikalyk talaptar [Motor Vehicles. Modifications to Vehicle Design. General Provisions and Technical Requirements][Text]. – Astana : Kazakhstan Institute of Standardization and Certification, 2018.

Received 24.06.26.
Received in revised form 25.06.26.
Accepted for publication 18.08.26.

С. М. Кардасинов[1], Ұ. А. Мурзахметова[2], М. Ә. Канибекова[3], А. Р. Кабашев[4]
[1,2,3,4]Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
24.06.26 ж. баспаға түсті.
25.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
18.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АВТОКӨЛІК ҚҰРАЛДАРДЫН ТЕХНИКАЛЫҚ КҮЙІН ҚҰРАЛМЕН БАҚЫЛАУ ОРТАЛЫҒЫНА АРНАЛҒАН ДИАГНОСТИКАЛЫҚ ЖАБДЫҚТАРҒА ТАЛАПТАР

Бұл мақалада мемлекеттік техникалық тексеру үдерісінде қолданылатын бағдарламалық және аппараттық жүйелерге қойылатын талаптардың терең жүйелік талдауы ұсынылған. Онда метрологиялық үйлесімділік, сараптамалық бағалаулардың алгоритмдік бағасы, диагностикалық деректердің киберқауіпсіздігі және шасси параметрлерінің көлік құралдарының белсенді қауіпсіздігіне әсері мәселелері қарастырылады. Қазақстан Республикасы мен Еуразиялық экономикалық одақтың ұлттық стандарттарын халықаралық директивалармен үйлестіруге ерекше назар аударылады. Сонымен қатар, көлік құралдарының аспаптық жағдайын бақылау станцияларында қолданылатын диагностикалық жабдықтарға қойылатын техникалық және пайдалану талаптарының кешенді әдіснамалық негіздемесі ұсынылған. Бұл зерттеудің өзектілігі жол қозғалысы қауіпсіздігі жүйелеріндегі антропогендік факторларды азайту және сараптамалық бағалаулардың сенімділігін арттыру қажеттілігінен туындайды.

Автор негізгі жабдықтың жұмыс істеу критерийлерін сипаттамалық тұрғыдан жіктеуді ұсынып, мынадай басым бағыттарды айқындайды: өлшеу циклдерін жоғары деңгейде автоматтандыру, метрологиялық бақылау, аппараттық құралдардың модульдік архитектурасы және берілетін деректердің киберқауіпсіздігі.

Өлшенген мәндерді ҚО ТР 018/2011 талаптарына және халықаралық стандарттарға сәйкес нормативтік рұқсат етілген шектер жиынтығымен автоматты түрде салыстыратын интеллектуалды тексеру алгоритмдеріне ерекше назар аударылады.

Мақалада көлік құралдары жүйелері мен диагностикалық станциялар арасындағы өзара әрекеттесу физикасы талданып, виброакустикалық және цифрлық тексеру әдістерін біріктіру қажеттілігі негізделеді.

Басқарушы компьютерлердің желілік бірігуіне қойылатын талаптар қазіргі көлік құралдарын аспаптық бақылау станцияларын техносфералық қауіпсіздікті мониторингтеуге арналған бірыңғай киберфизикалық жүйенің элементтері ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелерін жаңа техникалық байқау желілерін жобалау және қолданыстағы нормативтік-техникалық базаны жаңғырту кезінде пайдалануға болады.

Кілтті сөздер: Аспаптық басқару, диагностикалық жабдықтар, техникалық жағдай, автокөлік құралдары, метрология, жол қауіпсіздігі, сараптамалық жүйелер.

С. М. Кардасинов[1], Ұ. А. Мурзахметова[2], М. Ә. Канибекова[3], А. Р. Кабашев[4]
[1,2,3,4]Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л. Б. Гончарова,
Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 24.06.26.
Поступило с исправлениями 25.06.26.
Принято в печать 18.08.26.

ТРЕБОВАНИЯ К ДИАГНОСТИЧЕСКОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ЦЕНТРА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В данной статье представлен углубленный системный анализ требований к программно-аппаратным комплексам, применяемым в процессе государственного технического осмотра. Рассматриваются вопросы метрологической совместимости, алгоритмической оценки экспертных заключений, кибербезопасности диагностических данных, а также влияния параметров шасси на активную безопасность транспортных средств. Особое внимание уделяется гармонизации национальных стандартов Республики Казахстан и Евразийского экономического союза с международными директивами. Кроме того, представлено комплексное методологическое обоснование технических и эксплуатационных требований к диагностическому оборудованию, применяемому на станциях инструментального контроля технического состояния транспортных средств. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения антропогенных факторов в системах обеспечения безопасности дорожного движения и повышения достоверности экспертных оценок.

Автор предлагает структурную декомпозицию критериев функционирования основного оборудования, выделяя в качестве приоритетных следующие направления: высокий уровень автоматизации измерительных циклов, метрологический контроль, модульная аппаратная архитектура и кибербезопасность передаваемых данных. Особое внимание уделяется интеллектуальным алгоритмам проверки, автоматически сопоставляющим измеренные значения с массивами нормативных допусков в соответствии с ТР ТС 018/2011 и международными стандартами. В статье анализируется физика взаимодействия транспортных систем и диагностических станций, а также обосновывается необходимость интеграции виброакустических и цифровых методов тестирования. Требования к сетевой конвергенции управляющих компьютеров позволяют рассматривать современные станции инструментального контроля технического состояния транспортных средств как элементы единой киберфизической системы мониторинга техносферной безопасности. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых сетей технического осмотра и модернизации действующей нормативно-технической базы.

Ключевые слова: инструментальный контроль, диагностическое оборудование, техническое состояние, автотранспортные средства, метрология, безопасность дорожного движения, экспертные системы.

ҒТАМР 73.43.17

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/566-578

М. А. Нохатов[1], М. Н. Айкумбеков[2], К. К. Атабеков[3]

[1]Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]Қ. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті,
Қырғыз Республикасы, Бішкек қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1581-3979
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1951-1977
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2306-2381
*e-mail: totesh_@mail.ru

ҚАЛАҒА КІРЕТІН КӨШЕЛЕРДЕГІ ҚОЗҒАЛЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫНЫҢ КЕҢІСТІКТІК-УАҚЫТТЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ТАЛДАУ

Зерттеуде қалалық магистральдық кірме көшелердегі көлік ағыны жылдамдығының уақыттық өзгермелі қағидаттарын талдаумен байланысты, бұл бүгінгі күні қалалық магистральдық кірме көшелердің көліктік жүктемелік деңгейін жоғарылаты отырып, көлік кідірістері мен кептелістің шамадан тыс артуына ықпал етуде.

Зерттеудің негізгі мқсаты-қалалық магистральдық кірме көшелердегі көлік ағыны жылдамдығының кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауы мен қалалық кешенді жол қозғалысын ұйымдастыру сызбалары (КСОДД) мен жүйесінде пайдалануға негіздеу.

Зерттеуімізде қарастырылатын екі негізгі магистральдық кірме көшелер: батыс бағыттан ең үлкен қарқындылықты Райымбек батыр даңғылы және солтүстіктен-Ақсуат көшесі.

Зерттеу жұмысымызда-көлік ағынының орташа қозғалыс жылдамдығы мен көлік қарқынылығы, жылдамдық режимі, көлік құралдарының қауіпсіздік аралықтары мен колонналық қозғалыс режимі кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауы негізінде мәндік шамада зерттеліп талданды.

Зерттеу барысында қолданылған аспап Sierzega SR7 (жылдамдық режимдерін-V_{max}, V85, V_a жеке талдауда) және осы аспаптың мамандандырылған SRA Web бағдарламалық баптау жүйесімен өңделді. Зерттеу учаскелер 2GIS және Yandex Maps, яғни нақты уақыттағы жол қозғалысы жағдайы мен ауқымды геосервисті ашық платформалар көмегімен қосымша анықталды.

Деректер қалыпты статистикалық талдау әдістері негізінде де жүргізілді. Ол көлік ағыны жылдамдығының, ағын тығыздығының өзара байланысын нақтылауға, көше-жол тораптарында жүктемелілік деңгейін талдауға негіз болды.

Зерттеу жұмыс нәтижесінде көлік ағыны қарқындылығының тәулік бойғы сипатын, яғни таңертеңгі және кешкі кезеңдердегі қарбалас уақыттардағы қозғалыс жылдамдығы мен қарқындылықтың күрт өзгерулігін анықтауда, қарастырылатын магистральдық кірме көшелердің кеңістіктік-уақыттық ауытқуларына әсері сипатталды.

Нәтижелер негізінде қалалық көше-жол тораптары мен магистральдық көшелерде кідіріс пен кептеліс мәндерін азайтуға, көлік инфрақұрылымын жаңғырту мен жаңалауға, қалалық басқарушылық құрылымға жаңа сипат беруге ие.

Зерттеу жұмыстары көлік ағыны қарқындылығы мен қозғалысының нақты уақыттағы мәндерін талдау негізінде, нақты көлік кідірісі мен кептеліс мәндері жоғары аймақтарды нақты уақыт режимінде анықтап, қозғалысты тиімдендіруге бағытталған интеллектуальды көлік жүйелеріне бақылау мен талдау жүргізуге негіз болады.

Кілтті сөздер: кеңістіктік-уақыттық талдау, көлік қарқындылығы, көлік ағыны, жылдамдық режимі, кептеліс, кідіріс, көлік жүйесі, колонналық қозғалыс.

Кіріспе

Көлік ағынының қозғалыс жылдамдығы бойынша кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауы көлік ағыны қозғалысының сандық мәндері бойынша анықтап талдауға жол ашады. Өз кезегінде интеллектуальды көлік жүйесі мен қалалық жол қозғалысын ұйымдастырудың кешенді жүйесінде пайдалануға үлес қосады. Сондай-ақ жол қозғалысын басқа көлік түрлерімен өзара әрекеттесуінде, оңтайлы, ұтымды шешімдер қабылдауда осы сала мамандарының кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауы нәтижесінде нақты уақыт режимін пайдаланып шешімдер қабылдауға негіз бола алады [1].

Көлік қозғалысы ақпараттарын жинау мен оларды өңдеу, әртүрлі жолдармен қарқынды дамып келеді. Бұл әсіресе «сандық қалаларда» өте жоғары дәлдікпен анықталады [1; 2].

Қалаға сырттан кіретін магистральдық көшелердегі көлік ағыны қарқындылығының орташа жылдамдығын ескеріп (кідіріс пен кептеліс уақытын), жолаушылардың қала орталығына жетудегі уақыт жоғалтуларын алдын-ала нақтылауға және ұтқыр, ыңғайлы жолаушы тасымалы көлігін ұсынуға мүмкіндік береді.

Қалалық кірме магистральдық көшелерде көлік ағыны жылдамдығы тұрақсыз, әсіресе қарбалас уақыттарда кездеседі. Бұл жеке көлік құралдары санының артуымен және көліктердің жолаушыларды қала орталығына жеткізуімен, жолаушыларды қала маңынан тікелей қала орталығына тасымалдайтын ұтқыр жолаушылар көлігінің болмауымен тікелей байланысты. Сонымен қатар, қалаішілік реттелетін қиылыстар мен көше-жол тораптарының көлік ағынын өткізуде әлі де қабілеттілігі төмендігімен түсіндіріледі. Авторлар [3] жол қозғалысын басқаруда көптеген қолданыстағы бағдаршамдық жүйелер көлік ағынының өткізу қабілетін арттыруда шешуші рөлге ие емес екенін келтіре отырып, жолдың өткізу қабілетін арттыруда бағдаршам фазаларының уақытша нейронды желіге (Temporal Convolution Network, YCN) аудару стратегиясын ұсынады.

Келесі авторлар [4] бағдаршаммен реттелетін қиылыстар үшін көпмақсатты модель NSGA-III DAE алгоритмін біріктіретін оңтайландыру әдісін әзірлейді. Мультисенсорлық [5] камералар көмегімен қажетті ақпаратты жинау және регрессиялық талдау нәтижелерінің сипаттамаларын ескере отырып, қиылыстың өткізу қабілетін болжау моделі әзірленген. Бұл модель көлік кептелісі жағдйында өткізу қабілеті мен қозғалыс жылдамдығына әсер етеін ең маңызды факторларды анықтауға мүмкіндік береді. Дегенмен, автор бұл өзара қатынастардың нақты жағдайларға байланысты өзгеруін қарастырмаған. Мысалы, жолдың өткізу қабілетіне әсер ететін басқа да факторлар [6], жолдар мен қиылыстардың жобалық ерекшеліктері, көлік құралдарының құрамы, сондай-ақ жүргізушілердің мінез-құлқы. Егер өткізу қабілеті осы факторлармен шектелетін болса, онда тек қозғалыс жылдамдығын төмендету арқылы көлік ағынының көлемін арттыру мүмкін емес.

Аталған авторлар өз өңірлері бойынша жүргізілген зерттеулер негізіне сүйеніп, дәлелдерді келтіреді. Бұл біздегі статистикалық деректермен салыстырғанда айырмашылығы өте үлкен көрсеткіштер. Мысалы, біздің жолдардағы көлік құралдарының қарқындылығы бұл зерттеулердегі елдердің көлік сандарының мәндерінен үлкен айырмашылыққа төмен екені белгілі.

Белгілі-бір жол учаскесінде қозғалыстың орташа жылдамдығының жалпы көше-жол тораптарындағы қозғалысқа әсерін анықтауда [7], нақты қозғалыстағы көліктердің GPS деректері негізінде олардың жылдамдық көрсеткіштерін жинап, алынған деректерді әрбір тиісті учаскелердегі қозғалыс жылдамдығымен салыстырмалы түрде ұсынған.

Бірақ бұл әдіс жүргізушілеге тек ақпараттық дәлдікті ғана ұсына алады. Ал, көлік ағыны тығыздығының таралу тәртібі мен колонналық қозғалысты тарату жолдары мен қозғалыстың қауіпсіздік аралықтарын көрсету мүмкін емес.

Мәселе қалаға кіретін магистральдық көшелердегі көліктік жүктемелікті барынша азайту. Бұл Алматы қаласында да үлкен мәселеге айналуда. Себебі, транзиттік көлік ағыны мен қалаішілік көлік ағыны қозғалысы бүгінде қалалық көлік қозғалысын төменгі жылдамдық шегіне жеткізіп отыр. Бұған қауіпсіз қозғалыс аралығын (Headway), колонна бойымен қозғалысты (Traffic in column), орташа уақыт аралығын (Average time interval) тиімдендіру тәртібі мен ұйымдастырушылық-басқару жолдарының төмендігінен. Бұның салдары жанар-жағар майдың артық шығынданыу мен артық уақыт жоғалтуы және экологиялық ахуалды ушықтыруға соқтырып отыр.

Келесі авторлар [8] газ шығарындылардың пропорционалды өсуі, ұйымдастырушылық пен басқарушылық шараларды көбіне қауіпсіздікті арттыру мақсатында қозғалыс жылдамдығын төмендету әсерімен сипаттайды. Бұл жасалған талдаулар бүгінде қаламыздағы тәжірибелік үрдіске дәлме-дәл келеді.

Материалдар мен әдістері

Зерттеуіміздегі алынған негізгі жол учаскелері бұл Алматы қаласындағы сырттан кіретін екі негізгі магистралдық көшелер. Олар: батыс бағыттан Райымбек батыр даңғылы (қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейін) және Қонаев

қаласы бағытынан Ақсуат көшесі (қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейін). Осы аралық учаскеге қажетті біршама деректер алдыңғы [9] зерттеу жұмыстарымызда ұсынылған.

Деректерді жинау.

Қарастырудағы барлық магистралдық кірме көшелердегі зерттеу учаскелер алдымен, бейнетіркегіш және жылдамдық өлшегіш аспабы (Sierzega SR7) көмегімен тәулігіне 24 сағат жүзеге асырылып, жалпы кезеңі 1 аптаға созылды. Ол екі нұсқада өңделіп талданды. Біріншісі жартылай автоматты түрде, бейнетіркегіштегі деректерді қолмен өңдеу және екіншісі бағдарламалық қамту нұсқасында. Талдау нәтижелердің орта мәнін есепке алдық және қозғалыс қарқындылығының ең жоғары мәндері болып таңғы 07:00-ден 09:00-ге дейін, бұл жұмыс уақыты мен оқу (сабақ) уақытының басталуымен сәйкес келуі. Сондықтан, қала орталығына жетудегі көлік ағыны қарқындылығының шамадан тыс шоғырлануымен байланысты. Екі көше учаскесіндегі сағаттық айырмашылық қатты өзгермейді, бұған басты себеп қала ішіне жылжудағы халықаралық немесе аймақтық көлік ағынының да қозғалысымен түсіндіріледі. Зерттеудегі Райымбек батыр даңғылы халықаралық Батыс Еуропа-Батыс Қытай автожолымен жалғасып жатыр. Сонымен қатар аталған автомобиль жолы бірнеше мемлекеттік транзиттік және облыс аралық күре жол болып табылады.

Келесі зерттеу учаскеміздегі Ақсуат көшесі негізінен жоғарыда аталған транзиттік бағыттар мен облыстық қатынастардағы жолдардың жалғасы саналады. Алматы қаласы еліміздің ең ірі сауда қатынас орталығының бірі болғандықтан, транзиттік көлік қатынасы күн санап арта түсуде.

Күндізгі қарбалас уақытынан кейін (10:00-ден 16:00-ге дейін) көлік қарқындылығы қалыпты деңгейде болғанымен, біртіндеп төмендеу деңгейі барлық учаскеде байқалды. Екінші қарбалас уақыт (17:00-ден 20:00-ге дейін) кешкі кезеңдерде өткендіктен, бұл күндізгі қарбалас уақыттан біршама төмен мәндерімен ерекшелінеді. Бұған себеп негізгі қарқындылық жұмыс, оқу үрдісіне байланысты қала орталығына бағытталса, кешкі қарбалас уақыттарда қаладан сыртқы бағыттарға бағытталады. Бұл қалыпты үрдіс саналады. Сондықтан магистралды кірме көшелердегі зерттеу жұмыстар, бұл біріншіден қала бағытына тұрақты түрде қалыптасқан көлік ағындарының жылдамдық режимдерін кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдау барысында қалалық көлік жүйесін оңтайлы басқарушылыққа негіз болады.

Учаскелерді бөлу.

Зерттеудегі екі учаскені 1-ші және 2-ші деп номермен бөлдік.

1-ші участок бойынша сипаттама. Райымбек батыр даңғылы бойынша қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейінгі қашықтық, қоғамдық көліктер қозғалысының араласуынсыз (арнайы қозғалыс жолағының бар болуы) 2,58 шақырымды құрады.

2-ші участок бойынша сипаттама. Ақсуат көшесі бойынша қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейін, қоғамдық көліктердің аралас қозғалысымен (арнайы қозғалыс жолағының болмауымен) 2,82 шақырымды құрады.

Теориялық деңгейде салыстыру мен талдау.

Таралу тораптары немесе таралу аймақтарына қатысты зерттеулерде автор [10] магистралды көше қозғалысындағы көлік ағындарын екіге, тұрақты және тұрақсыз аймақ деп бөліп көрсетіп анықтаған. Осындай таралу торабындағы тәуекел аймақтарды кеңістіктік сегментация нәтижесімен талдап көрсеткен.

Қалалық магистралдық көшелердегі тығыз көлік ағыны жағдайын, қозғалыс жылдамдығымен ғана өлшеп көрсетуге болмайтынын [11], себебі жол бойындағы көптеген келеңсіз, оқыс оқиғалардың есепке алынбай қалуымен байланыстырады. Сондықтан авторлар осындай оқыс оқиғалардың пайда болуы арасындағы көпөлшемді авто регрессиялық моделмен талдап (MVCAR) ұсынады.

Аталған зерттеу бағыты біздің зерттеуімізден салыстырмалы түрде ерекшеленетінін көрсетеді.

Кеңістік-уақыттық талдау.

Қалаға кіретін негізгі көше учаскелерінде көлік қозғалысының кеңістік-уақыттық таралуын зерттеу үшін аспаптық талдау жүйесі ұсынылды. Аспаптық зерттеуден алынған деректерге негізделіп Yandex Maps картасына сәйкес аумақтар белгіленді, 2GIS (нұсқа-3.16.3.0) бағдарламалық жасақтамасы пайдаланылды. Бұл өз кезегінде жол параметрлері мен қоғамдық көліктердің қозғалыс маршрутын нақтылау үшін маңызды.

Төмендегі 1-суретте қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейінгі қозғалыс жылдамдығын зерттеу аумағы қашықтығы берілген.

1-ші участок бойынша:



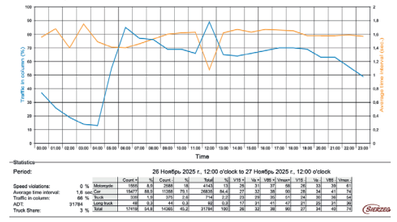
2-ші участок бойынша:



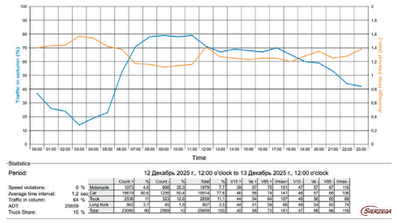
1-сурет – Қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейінгі қашықтық

Көлік ағыны өлшемдерінің кеңістіктік талдауы Sierzega SR7 жол жағдайын бағалау аспабы арқылы жүргізіліп, Sierzega SRA бағдарламалық қамтамасыз ету қолданылды. Бұл өз кезегінде деректерді нақты, кәсіби статистикалық әдістермен талдауға және нәтижелерді ақпараттық диаграммалар арқылы көрсетуге мүмкіндік береді. Төмендегі 2-4 суреттерде қарастырылатын учаскелер бойынша қозғалыс жылдамдығы режимінің диаграммалық нәтижелері ұсынылған.

1-ші участок бойынша:

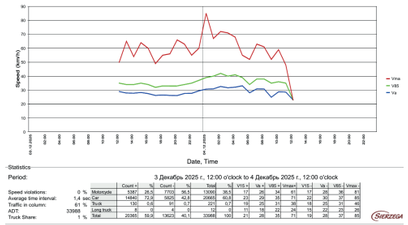


2-ші участок бойынша:

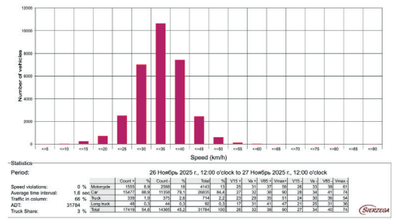


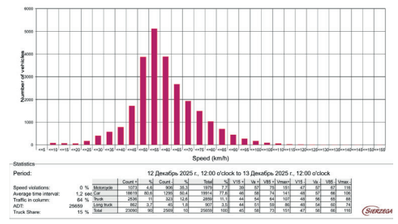
2-сурет – 1-диаграмма: тәулік бойына көлік құралдарының колонналық қозғалысы және орташа уақыт аралық өзгерістері





3-сурет – 2-диаграмма: Тәулік бойына қозғалыс жылдамдығы





4-сурет – 3-диаграмма: Көлік ағынының қозғалыс жылдамдығының таралуы

Зерттеудегі учаскеде көлік құралдарының колонналық қозғалысы мен орташа уақыт аралық өзгерістері, сонымен қатар тәулік бойынша қозғалыс жылдамдығы және оның уақыт бойынша таралу өзгерістері талданды.

Бағдарламалық қамту көмегімен алынған нәтижелер тәуліктің әрбір сағатындағы, яғни нақты уақыт режимінде деректерді өңдеп талдауымызға ұсынды. Бұл көлік ағынының қозғалыс динамикасын талдауға, кептелістердің өзгермелі әсерін болжауға негіз болды. Алынған барлық деректер көлік қозғалысы жүйесінде кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу нәтижелері қалалық магистралдық кірме көшелердегі көлік ағыны қарқындылығы мен қозғалыс жылдамдығы режимін сандық негізде сипаттап, көлік қозғалысының кідірісі мен кептеліс уақытын ғана анықтамай, нақты уақыт режимінде кеңістіктік-уақыттық кідіріс пен кептелістің белгілі-бір аймақтағы жағдайларын бақылауға мүмкіндік береді. Өз кезегінде бағдарламалық баптаудан

алынған деректер өңделіп, талдауға алынды. Нәтижесінде бастапқы деректерден алынған сандар қолданылып есептеулер жүргізілді.

Бұл сандардың орташа мәндері (Mean), орташа ауытқу мәндері (Std.Error) төмендегі формула бойынша былай анықталады:

$$SEM = SD/\sqrt{N} \quad (1)$$

мұндағы, SD – қалыпты стандарттық ауытқу (Standart deviation);
N – бақылау саны, бірл.;
$\sqrt{N}$ – бақылау санының квадрат түбірі.

Стандарттық ауытқу (Standart Deviation) анықталады:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1}} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

мұндағы, x_i – і-ші бақылаудың мәні;
$\bar{x}$ – бақылаулардың орташа мәні;
$\sum$ – барлық бақылаулар бойынша қосынды алу;
N – деректер үшін бөлу коэффициенті.

Бақылаулардың орташа арифметикалық мәнін – $\bar{x}$ есептеуде келесі формуланы қолданып анықтаймыз:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \quad (3)$$

мұндағы, $\sum_{i=1}^{N} - i$ индексі 1 ден N - ге дейінгі барлық мәндердің қосындысы.

Келесі процентиль мәні (бұл мәліметтер жиынын кішіден үлкенге реттегенде, сол жиынның төменгі 15 % бөлігіне жататын мән. Яғни, жылдамдықтың 15%-ы осы мәнге тең немесе төмен болады).

$$i = \frac{p}{100} x(N+1) \quad (4)$$

мұндағы, p – қажетті процентиль (біздің жағдайда 15);
i – процентиль орналасатын индекс.

Алынған деректердің орташа мәннен қаншалықты шашырап орналасуын сандық түрдегі көрсеткішін – Дисперсия (Var) төмендегі формуламен анықтаймыз:

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (5)$$

Зерттеу барысында қозғалыс жылдамдығының тәулік бойы әр кезеңге тән статистикалық сипаттамалары анықталды. 1 және 2 участоктар бойынша

бақылау саны, орташа мәндер, стандартты ауытқу, медиана (ортаңғы мән), Mode (ең жиі кездесетін мән), дисперсия (өзгергіштік мән), диапазон (аралық мән) көрсеткіштері есептелді.

Зерттеу нәтижесінің көрсеткіші бойынша қозғалыстың орташа жылдамдық мәндері және олардың таралу деңгейі әрбір зерттелетін учаскенің әрбір кезеңдері үшін өзгермелігі талданды. алғашқы кезеңдерде қозғалыстың орташа жылдамдығы арта отырып, қарбалас уақытқа жақындауда баяулай бастады. Қозғалыс жылдамдығының максимум және минимум мәндерінде ауытқушылық анықталды. 15 және 85 процентильдер көлік қозғалысындағы өзгерістің алшақтығын сипаттады.

Қалыпты стандарттық ауытқу мәні барлық учаскелердің барлық уақыт аралығында қалыпты болып, жинақталған мәліметтерге сәйкестігін көрсетті. Зерттеу көлік қозғалысының кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауды пайдалануға мүмкіндік берді. Зерттеу учаскелері үшін анықталған қозғалыс режимдері деректерінің есептік сандық көрсеткіштері төмендегі кестеде берілді.

1-кесте – Әр кезең бойынша қозғалыс жылдамдығының уақыт бойынша есептік сандық көрсеткіштері

Көрсеткіштер, бірл.	Кезең	1 участок	2 участок	Кезең	1 участок	2 участок	Кезең	1 участок	2 участок
N (бақылау саны)	I (06:00-12:00)	72	68	II (12:00-18:00)	55	50	III (18:00-24)	60	57
Орташа мән (Mean)		35.65	34.20		34.87	33.50		32.40	31.80
Орташа қате (Std. Error)		0.66	0.70		0.65	0.72		0.68	0.70
Стандарттық ауытқу (SD)		5.62	5.90		5.62	5.08		5.28	5.27
Минимум (Min)		12	18		20	22		18	18
Максимум (Max)		45	46		45	42		40	39
15-процентиль		30	28		30	28		28	27
85- процентиль		42	41		42	40		38	37
Медиана (Median)		35.00	34.00		35.00	33.00		32.00	31.50
Ең жиі кездесетін мән (Mode)		35.00	33.00		35.00	32.00		32.00	31.00
Дисперсия (Variance)		31.55	34.80		31.55	25.85		27.85	27.75
Диапазон (Range)		25	28		25	20		22	21

Қорытынды

Зерттеудегі уақыттық кезеңдер тұрақты қарбалас уақытын сипаттайды. Қалаға кірме магистралдық көшелердегі зерттелген учаскелерде талданған қозғалыс жылдамдығы режимі күндізгі қарбалас уақыт (07:00–09:00) пен түскі қарбалас уақытқа (13:00–14:00) сай келді. Сәйкесінше қала шекарасынан бірінші таралу торабына дейінгі зерттеу учаскелерде көлік ағынының қозғалыс жылдамдығы 12–23 км/сағатқа дейін төмендеп кетті. Бұл жылдамдықтың күрт төмендеуі көліктік кідіріс пен кептелістің артуына әсер етті. Бұл бірінші таралу торабына дейінгі аралықтағы көрсеткіштерді дәлдікпен көрсете алды.

Барлық көрсеткіштер үш негізгі уақыт кезеңіне бөлінді. Бұл таңғы 06:00-ден түскі 12:00-ге дейін бірінші кезең. Бұл уақыт аралығы көлік ағынының қозғалыс жылдамдығын ең төменгі мәнге жеткізген қарбалас уақыты болып қалыптасты. Бұл уақытта көлік кептелісінің жоғары шоғырлануы анықталды. Осы жағдай қозғалыс жылдамдығын түсіріп қана қоймай, жету орындарына барудың ұзақ уақытын құрайды. Сондықтан, көлік ағыны қарқындылығының баяулау түскі кезеңге дейін жалғасып жатады.

Екінші кезең түскі 12:00-ден 18:00-ге дейінгі аралық. Алынған көрсеткіштерге сүйене жасалған талдауларда бұл аралықта V85 мәндері де қатты өзгеріске ұшыоамады. Бұл қалалық кірме магистральдық көше учаскелерінде жүктемелік деңгейі әлі де сақталып отырғанын нақтылады.

Үшінші кезең 18:00-ден 24:00-ге дейінгі аралық болды. Бұл уақыт кезеңдерінде кірме магистральдық көше бағыты болғандықтан, қозғалыстың жылдамдық режимдері тұрақты жағдайды көрсетті. Бұл стандартты ауытқу мен жылдамдықтың таралу деңгейінде қалыпты ғана ауытқуларды көрсетті.

Зерттеудің алынған нәтижелерінің кеңістіктік-уақыттық сипаттамалық талдауы қандай уақыт кезеңдерінде белгілі-бір аумаққа немесе жол учаскесіне түсіретін көліктік жүктемені дер кезінде анықтауға болатынын көрсетеді. Зерттеу жалғасы ретінде болашақта жыл мезгілдері мен ауа-райының күрделі жағдайында кеңістіктік-уақыттық талдаулар жүргізу ұсынылады.

Аспаптық талдамалы әдіс кеңістіктік-уақыттық кезеңдерде орын алатын көліктік кідіріс пен кептеліс жағдайларын нақты уақыт режимінде бағамдап, сала мамандары мен қалалық басқарушылық жүйе үрдісін оңтайландырудағы жұмыс бағыттарына енгізуде қолдану ұсынылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Liu, L., Zhan, H., Liu, J., Man, J.** Visual analysis of traffic data via spatio-temporal graphs and interactive topic modeling [Text] // Journal of Visualization. – 2019. – Vol. 22. – P. 141–160. – https://doi.org/10.1007/s12650-018-0517-z.

2 **Martínez Márquez, R.A., Patanè, G.** Traffic Analysis and Visualisation from Sparse Mobility Data [Text] // International Journal of Intelligent Transportation Systems Research. – Online first. – 2025. – 2019. – Vol. 24. – P. 427–441. – https://doi.org/10.1007/s13177-025-00584-8.

3 **Zhang, Y., Shang, K., Cui, Z., Zhang, Z., Zhang, F.** Research on Traffic Flow Prediction at Intersections Based on DT-TCN-Attention [Text] // Sensors. – 2023. – Vol. 23 – № 15 – article 6683. – https://doi.org/10.3390/s23156683.

4 **Xinghui, Zh., Xiumei, F., Shunyuan, Y., Axida, Sh., Rui, M.** Multi-Objective Optimization Method for Signalized Intersections in Intelligent Traffic Network [Text] // Sensors (Basel). – 2023. – Vol. 23 – №14 – article 6303. – https://doi.org/10.3390/s23146303.

5 **Shepelev, V., Aliukov, S., Nikolskaya, K., Shabiev, S.** The Capacity of the Road Network: Data Collection and Statistical Analysis of Traffic Characteristics [Text] // Energies. – 2020. –13 – № 7 – article 1765. – https://doi.org/10.3390/en13071765.

6 **Li, J., Jiang, C., Han, K., Yu, Q., Zhang, H.** High-resolution spatiotemporal inference of urban road traffic emissions using taxi GPS and multi-source urban features data: a case study in Chengdu, China [Text] // Urban Info. – 2024. – Vol. 3. – article 17. – https://doi.org/10.1007/s44212-024-00045-9.

7 **Litman, T.** Traffic Speed Versus Roadway Capacity [Text]. – Victoria Transport Policy Institute. – 2025. – [Electronic resource]. – https://www.vtpi.org/tsrc.pdf. (accessed: 16.06.2026).

8 **Atabekov, K. K., Sarymsakov, B. A., Maksimovich, K. Yu., Voinash, S. A., Kamenchukov, A. V., Gamilia, O. N., Sokolova, V. A.** Decrease in average traffic speed and increase in harmful emissions of vehicles at unregulated pedestrian crossings in cities [Text] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – issue 5. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052055.

9 **Нохатов, М. А., Кобдикова, Ш. М., Айкумбеков, М. Н.** Қалалық магистральдық көшелердің тығыз көлік ағыны жағдайында көлік тұрақтары жүйесінің әсерін талдау [Текст] // Азаматтық авиация академиясының Жаршысы. – 2026. – № 1(40). – 115–123 б. – https://doi.org/10.53364/24138614_2026_40_1_10.

10 **Chong, K.** Spatiotemporal influence analysis through traffic speed pattern analysis using spatial classification [Text] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15 – № 1 – article 196. – https://doi.org/10.3390/app15010196.

11 **Xu, S., Xie, X., Wang, C., Yan, J.** On the safety effects of off-peak hour speed characteristics of urban arterials [Text] // Multimodal Transport. – 2025. – Vol. 4 – № 2. – article 100206. – https://doi.org/10.1016/j.multra.2025.100206.

REFERENCES

1 **Liu, L., Zhan, H., Liu, J., Man, J.** Visual analysis of traffic data via spatio-temporal graphs and interactive topic modeling [Text] // Journal of Visualization. – 2019. – Vol. 22. – P. 141–160. – https://doi.org/10.1007/s12650-018-0517-z.

2 **Martínez Márquez, R.A., Patanè, G.** Traffic Analysis and Visualisation from Sparse Mobility Data [Text] // International Journal of Intelligent Transportation Systems Research. – Online first. – 2025. – 2019. – Vol. 24. – P. 427–441. – https://doi.org/10.1007/s13177-025-00584-8.

3 **Zhang, Y., Shang, K., Cui, Z., Zhang, Z., Zhang, F.** Research on Traffic Flow Prediction at Intersections Based on DT-TCN-Attention [Text] // Sensors. – 2023. – Vol. 23 – № 15 – article 6683. – https://doi.org/10.3390/s23156683.

4 **Xinghui, Zh., Xiumei, F., Shunyuan, Y., Axida, Sh., Rui, M.** Multi-Objective Optimization Method for Signalized Intersections in Intelligent Traffic Network [Text] // Sensors (Basel). – 2023. – Vol. 23 – №14 – article 6303. – https://doi.org/10.3390/s23146303.

5 **Shepelev, V., Aliukov, S., Nikolskaya, K., Shabiev, S.** The Capacity of the Road Network: Data Collection and Statistical Analysis of Traffic Characteristics [Text] // Energies. – 2020. –13 – № 7 – article 1765. – https://doi.org/10.3390/en13071765.

6 **Li, J., Jiang, C., Han, K., Yu, Q., Zhang, H.** High-resolution spatiotemporal inference of urban road traffic emissions using taxi GPS and multi-source urban features data: a case study in Chengdu, China [Text] // Urban Info. – 2024. – Vol. 3. – article 17. – https://doi.org/10.1007/s44212-024-00045-9.

7 **Litman, T.** Traffic Speed Versus Roadway Capacity [Text]. – Victoria Transport Policy Institute. – 2025. – [Electronic resource]. – https://www.vtpi.org/tsrc.pdf. (accessed: 16.06.2026).

8 **Atabekov, K. K., Sarymsakov, B. A., Maksimovich, K. Yu., Voinash, S. A., Kamenchukov, A. V., Gamilia, O. N., Sokolova, V. A.** Decrease in average traffic speed and increase in harmful emissions of vehicles at unregulated pedestrian crossings in cities [Text] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – issue 5. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052055.

9 **Nokhatov, M. A., Kobdikova, Sh. M., Aykumbekov, M. N.** Qalalyq magistraldyq koshelerdin tygyz kolik agyny zhagdayynda kolik turaqtary zhuyesinin aserin taldau. [Analysis of the impact of parking systems on urban arterial roads under conditions of heavy traffic flow] [Text] // Bulletin of the Civil Aviation Academy. – 2026. – № 1(40). – P. 115–123. – https://doi.org/10.53364/24138614_2026_40_1_10.

10 **Chong, K.** Spatiotemporal influence analysis through traffic speed pattern analysis using spatial classification [Text] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15 – № 1 – article 196. – https://doi.org/10.3390/app15010196.

11 **Xu, S., Xie, X., Wang, C., Yan, J.** On the safety effects of off-peak hour speed characteristics of urban arterials [Text] // Multimodal Transport. – 2025. – Vol. 4 – № 2. – article 100206. – https://doi.org/10.1016/j.multra.2025.100206.

28.05.26 ж. баспаға түсті.
22.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
21.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

М. А. Нохатов[1], М. Н. Айкумбеков[2], К. К. Атабеков[3]
[1]Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л. Б. Гончарова, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек.
Поступило в редакцию 18.05.26.
Поступило с исправлениями 22.06.26.
Принято в печать 21.08.26.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ВЪЕЗДНЫХ УЛИЦАХ ГОРОДА

Данное исследование связано с актуальностью анализа закономерностей изменения скорости движения на городских въездных улицах, поскольку увеличение транспортных потоков усилило нагрузку на улично-дорожную сеть и привело к образованию заторов.

Цель исследования – комплексный анализ пространственно-временных характеристик скорости движения на городских въездных улицах и обоснование возможностей их эффективного использования в системе управления дорожным движением.

В исследовании рассмотрены основные магистральные улицы, ведущие в город Алматы – проспект Райымбек батыр и улица Аксуат. В работе изучались интенсивность транспортного потока, распределение средней скорости движения, скоростные режимы (V_{max}, V85, V_d), колонное движение и интервалы безопасности. В качестве методов исследования проводился количественный анализ их пространственно-временных характеристик.

Пространственно-временной анализ был выполнен с использованием прибора Sierzega SR7 и программного обеспечения SRA, а также с помощью сервисов 2GIS и Yandex Maps были определены участки исследования.

Кроме того, при обработке данных использовались методы статистического анализа (среднее значения, дисперсия и корреляционный анализ), что позволило уточнить взаимосвязь между скоростью движения и плотность транспортного потока.

Результаты исследования позволили выявить суточный циклический характер транспортного потока, включая закономерности изменения интенсивности в утренние и вечерние пиковые периоды. Также было доказано, что изменение скорости движения по пространству напрямую влияет на пропускную способность уличных участков.

Выявленные результаты имеют важное практическое значение для планирования и оптимизации городской транспортной инфраструктуры, а также для принятия управленческих решений, направленных на снижение уровня заторов.

В ходе исследования на основе анализа пространственно-временных характеристик скорости движения были рассмотрены возможности оперативного выявления зон заторов эффективного управления транспортными потоками.

Предложенная методика в будущем может быть интегрирована в интеллектуальные транспортные системы (ITS) и стать основой мониторинга в режиме реального времени.

Ключевые слова: пространственно-временной анализ, режим скорости, транспортный поток, интенсивность движения, транспортная система, затор, интервал безопасности.

M. A. Nokhatov[1], M. N. Aykumbekov[2], K. K. Atabekov[3]
[1]Automobile and Road Institute, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek.
Received 18.05.26.
Received in revised form 22.06.26.
Accepted for publication 21.08.26.

ANALYSIS OF SPATIOTEMPORAL CHARACTERISTICS OF TRAFFIC SPEED ON URBAN ENTRY STREETS

The study is related to the relevance of analyzing the patterns of traffic speed variation on urban entry streets, as the increase in traffic flows has intensified the load on the street and road network and led to congestion formation.

The aim of the study is a comprehensive analysis of the spatiotemporal characteristics of traffic speed on urban entry streets and substantiation of the possibilities for their effective use in traffic management systems.

The study considers the main arterial streets entering the city of Almaty-Rayimbek Batyr Avenue and Aksuat Street. The work examined traffic flow intensity, distribution of average speed, speed regimes (V_{max}, V85, V_d), platoon movement, and safety headways. The research methods included quantitative analysis of their spatiotemporal characteristics.

The spatiotemporal analysis was carried out using the Sierzega SR7 device and SRA software, and the study sections were identified using 2GIS and Yandex Maps services.

In addition, statistical analysis methods (mean value, variance, and correlation analysis) were used in data processing, which made it possible to clarify the relationship between traffic speed and traffic flow density.

The results of the study revealed the daily cyclical nature of traffic flow, including patterns of intensity changes during morning and evening peak periods. It was also proven that spatial variation in traffic speed directly affects the capacity of street sections.

The identified results are of significant practical importance for planning and optimizing urban transport infrastructure, as well as for making managerial decisions aimed at reducing congestion levels.

During the study, based on the analysis of spatiotemporal characteristics of traffic speed, the possibilities of rapid identification of congestion zones and effective traffic flow management were considered.

The proposed methodology may in the future be integrated into Intelligent Transportation Systems (ITS) and serve as a basis for real-time monitoring.

Keywords: space-time analysis, vehicle speed, speed mode, traffic volume, transport system, congestion, headway.

SRSTI 73.49.23
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/579-587

A. A. Rakisheva[1], S. B. Kokin[2], *A. N. Baltabekova[3], Petr Bouchner[4], K. K. Abishev[5]
[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2,3,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2,3,5]Kazakhstan Institute of Science and Technology LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
[4]Czech Technical University in Prague, Czech Republic, Prague.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7020-5672
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2461-2231
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0603-2463
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8308-1656
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2001-0428
*e-mail: almagul_bn@mail.ru

OPTIMIZATION OF BATTERY PACK DESIGN FOR HYBRID POWERTRAIN VEHICLES

The article is devoted to the design and research of a vehicle with hybrid propulsion, carried out at the Department of Transport Equipment and Logistics of the Toraighyrov University. One outcome of the work is that based on the analysis of layout schemes of such vehicles, a new practical vehicle design with a combined power unit has been proposed, with particular attention given to the battery.

The article looks at ways to improve the design of batteries in vehicles with hybrid power systems. It is stated that one of the main requirements for batteries nowadays is to ensure corrosion resistance at high operating temperatures. The battery is not just a power source; it is a key part of a vehicle with a hybrid system, determining its durability, efficiency and competitiveness.

The article reviews patent research and looks at different battery designs. Their main drawback is a shorter lifespan. The paper sets out and solves the problem of improving the lead-acid battery. The solution involves each cell in the lead-acid battery having a block of electrodes with opposite polarity, separated by separators and electrolyte.

Based on the conducted patent research, a battery design that meets the required specifications was selected. The article describes the battery design chosen as a prototype and outlines the pros and cons of this prototype.

The article presents a design for an automatic battery that significantly improves its user-friendliness, specifically by maintaining full capacity in cold weather and extending its reliable service life. The article also explains the key features of the battery's design.

Keywords: vehicle, combined propulsion, battery, patent research, automatic rechargeable battery.

Introduction

Currently, the Department of Transport Equipment and Logistics of the Toraighyrov University is working on the development and research of a vehicle with a combined power plant [1].

Vehicles with hybrid propulsions are commonly referred to as hybrid vehicles. By putting together traditional combustion engines with electric propulsion systems, these vehicles can reduce fuel consumption and harmful emissions. Secondly, energy crises and rising fuel prices are pushing for the need to develop more economical and efficient transport solutions.

Based on the analysis of layout schemes of such vehicles, a new practical vehicle design with a combined power system has been proposed, with special attention given to the battery. This is because progress in car manufacturing puts higher demands on the performance of batteries used in vehicles, such as better resistance to deep discharges and longer lifespan. Changes in car construction and design that give them better aerodynamic properties have led to batteries operating at higher temperatures due to reduced access to cooling air. So one of the main requirements for batteries has been to ensure corrosion resistance at high operating temperatures. On the other hand, consumers want easier maintenance and improved safety when using batteries [1; 2].

So, developing and improving battery design is a relevant scientific and technical challenge, with the battery acting not just as a power source, but as a strategic component of a vehicle with a hybrid power system, determining its longevity, efficiency and competitiveness.

Materials and methods

Batteries with corrosion-resistant lead-calcium alloy terminals have low self-discharge and no water loss, but they quickly lose capacity when deeply cycled due to the formation of a passivating $PbSO_4$ layer between the terminals and the active material. Lead–antimony alloy batteries with current collectors have opposite characteristics – relatively high self-discharge and water loss. The positive terminals of such batteries have low corrosion resistance. However, these batteries last longer when cycled with deep discharge [3; 4].

Recently, the problem of reduced resistance to deep discharges has been solved by adding some tin to the lead-calcium alloy conductors, which prevents the formation of a passive layer between the conductors and the active material. Rechargeable batteries with lead-tin-calcium alloy terminals have increased corrosion resistance at high operating temperatures, can handle deep discharges, have low self-discharge and don't lose water. Therefore, these batteries are easy to maintain and there is less risk of an explosion from minor gas emissions. However, their lifespan is shorter because the active material does not stick well to the conductors. [5].

New rechargeable batteries should meet the following requirements at the same time: have a long service life, resist deep discharges, offer increased corrosion resistance of the terminals at high operating temperatures, and be easy to maintain and safe [6].

To tackle this issue, patent research was carried out and various battery designs were looked into [7;8]. The main drawback of rechargeable batteries is their reduced

lifespan due to poor adhesion of the active material to the positive plates, caused by uncontrolled low calcium content in the plate alloy, which leads to premature shedding of the active material, as well as cracking and crumbling of the active material during battery manufacturing.

Therefore, the goal was set to improve the lead-acid battery by changing the chemical composition of the positive plates and adding extra elements to ensure the active material sticks to the plates properly and does not crack or fall apart. This leads to a longer lifespan while keeping all the benefits of the prototype battery.

The task is accomplished in that in a lead-acid battery, which has a casing closed at the top with a cover and divided into compartments containing batteries connected in series by inter-element connections, each battery consists of a block of electrodes of opposite polarity separated by separators and electrolyte, the electrodes consist of current collectors and active material, the current collectors of the positive electrodes are made of a lead-tin-calcium alloy with silver additives, and the active material of the positive and negative electrodes is covered with fixing layers of porous acid-resistant material.

The battery's current collectors are made from perforated lead alloy strips. The presence of tin in the positive collectors prevents a passive layer from forming between the collectors and the active material, ensuring the electrodes withstand deep discharges and can be recharged later. Having positive calcium conductors in the alloy ensures good mechanical strength of the conductors, sufficient corrosion resistance at high operating temperatures, and reliable bonding with the active mass. Having silver increases the corrosion resistance, hardness and strength of the conductors. Aluminium helps reduce calcium loss during alloy melting by forming a protective surface layer in the melt.

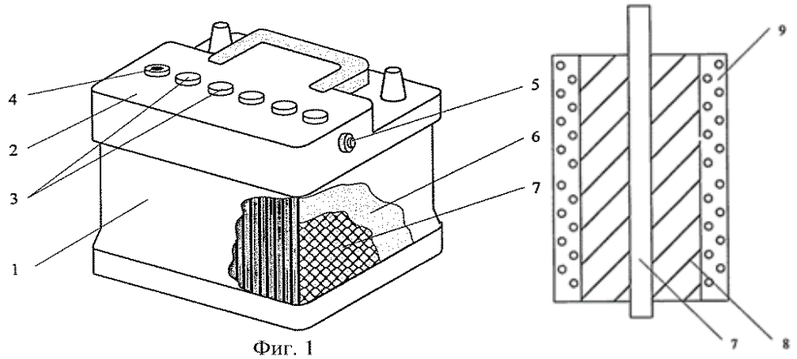
The fixing layers made of porous acid-resistant material that cover the active mass help prevent it from cracking and falling apart both during battery production and during use. At the same time, the material of the fastening layers is highly porous and breathable. The high porosity and air permeability of the material in the fixing layers allows gas bubbles, which form in small amounts during recharging, to escape freely from the pores.

The results of the patent research allowed us to choose a battery design that meets the required specifications. The description of the battery design selected as a prototype is given below.

The lead-acid battery [9] has a case 1, closed on top with a lid 2, which can have a handle attached for carrying. The lid has filling holes that are sealed with plugs 3. The stated battery can be equipped with a removable optical detector 4 for the electrolyte level and battery charge, which is made in the form of a plug for the filling hole. The battery can also be fitted with explosion-proof devices 5, located at the outlets of the gas vent channel. The electrodes of the claimed battery 6 consist of current collectors 7 made from perforated strips of a lead-tin-calcium alloy with added silver and aluminium, and an active material 8. The active mass of the positive and negative electrodes is covered with fixing layers 9 made of porous acid-resistant material.

The optical detector that moves according to the battery levels and charge is screwed into one of the filling holes during battery assembly.

Explosion-proof devices 5 are installed during the battery assembly on the outlets of the gas vent channel. The device uses a well-known type of disc made of porous hydrophobic material, which lets gases escape, traps electrolyte droplets and aerosols, prevents flames and sparks from entering the battery, and keeps out dust.



Фиг. 1

Figure 1 – Lead-acid battery and its electrode

The fixing layers 9 made of porous acid-resistant material, covering the electrode on both sides, are pressed into the active mass during the plate coating process.

Results and discussions

The proposed battery design gets rid of the issues mentioned above, significantly improves the battery's performance, especially in maintaining full capacity during winter and extending its reliable service life [10].

This is achieved by adding extra devices inside the battery (see figure 3), which include a measuring part with electronic temperature sensors in each battery cell, an electronic control module 2, a controller and output devices connected to the microcontroller. The electronic control module, in turn, is made up of the microcontroller's analog and digital input devices. Output devices are used to control the input signals and the programmed algorithm that collects information, processes it, generates control commands and operates the executive part, which is the temperature-controlled element turning the incoming commands into control currents sent to the output executive part of device 3, shown in figure 2. The device's output control unit keeps the battery running at the right temperature. The device's operating mode settings are set during manufacturing. The user turns the device on and off. The automatic battery is covered with thermal insulation.

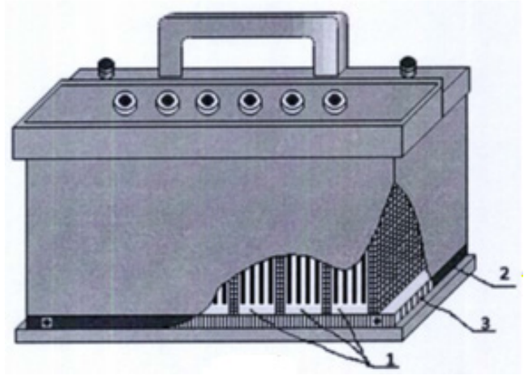
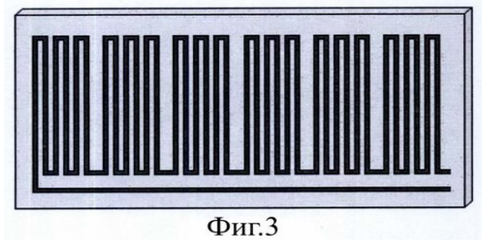


Figure 2 – Automatic rechargeable battery

Making a trial batch of batteries of this design in a production setting showed that the binding layers from cracking and falling apart reliably protect the active material of the positive and negative electrodes.

Lab tests on a trial batch of the claimed lead-acid batteries confirmed that the conductors have improved corrosion resistance at high working temperatures, low water loss during recharge, and a long service life under deep discharge cycling.



Фиг.3

Figure 3 – Autonomous electric module of the battery

So, the technical result achieved is automatically keeping the battery at its optimal operating temperature with minimal use of the battery's own power, effectively doubling its reliable service life compared to existing traditional batteries.

Financing information

The study was carried out within the framework of grant funding for fundamental and applied scientific research on scientific and (or) scientific and technical projects for 2025–2027 under project AP26104617 «Research and development of a vehicle with an automatic battery combined propulsion», funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

Conclusions

The article goes over the results of a comparison of existing battery designs. A major issue with batteries is the «imbalance» effect. The gist of this is that with the

most commonly used series connection of cells, the charge and discharge times of each individual cell differ slightly, and over time the voltage difference across individual cells in the battery increases.

Based on the work done, a battery design has been proposed that significantly improves the battery's performance, specifically keeping its full capacity in cold weather and extending its trouble-free lifespan.

REFERENCES

1 **Rakisheva A. A., Kokin S. B., Yessaulkov V. S., Bouchner Petr, Abishev K. K.** On the problem of designing a vehicle with hybrid propulsion // Scientific journal «Science and Technology of Kazakhstan». – № 3 – 2025. – P. 359–367. – https://doi.org/10.48081/GXFT8138.

2 **Abishev, K. K., Kassenov A. Zh., Yessaulkov, V. S., Kokin, S. B., Rakisheva, A. A.** Some Issues Regarding the Enhancement of Technical and Economic Performance of Electric Vehicles // Proceedings of the 10th International Conference Industrial Engineering (ICIE 2024). – P. 682–691. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_63.

3 **Tukunaga A.** A comparison of calcium, hybrid and low antimony SLI batteries. «New Mater and New Process. Vol. 3», Cleveland, Ohio, 1985. – P. 245–247.

4 **Varlamov R. G.** Modern Power Supplies: A Handbook. – DMK-Press Publishing, 1998. – P. 192.

5 **David Prengaman R.** Challenges from corrosion-resistant grid alloys in lead acid battery manufacturing. Journal of Power Sources. – 2001. – № 95. – P. 224–233. – https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00620-0.

6 **Khrustalev D. A.** Batteries. – Moscow : Izumrud Publishing, 2003. – P. 222.

7 **Bolotovsky V. I., Vaisgant Z. I.** Operation, maintenance and repair of lead-acid batteries. – Leningrad : Energoatomizdat, Leningrad branch, 1988. – P. 34–46.

8 Lead-acid battery. US Patent No. 5298350, Int. CL5 H 01 M 4/68, CL 429–245, 1991.

9 Lead-acid battery // Dzenzersky V. A., Skosar Yu. I., Burylov S. V., Skosar V. Yu. // Patent № 2233510, RU from 08.09.2002, IPC H01M 4/68; H01M 10/06.

10 Development of a hybrid battery: R&D report (final). /S. Toraighyrov Pavlodar State University; supervised by K. K. Abishev. Pavlodar, 2017. 46 pages. Executed by A. Zh. Kasenov, R. B. Mukanov, A. N. Baltabekova, B. Kairolla. No. GR 0117PKU0328. Inv. № 5.3-14/668 dated 14.07.2017.

Received 12.08.26.
Received in revised form 10.08.26.
Accepted for publication 18.08.26.

А. А. Ракишева[1], С. Б. Кокин[2], *А. Н. Балтабекова[3], П. Бухнер[4], К. К. Абишев[5]
[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2,3,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2,3,5]Қазақстан ғылым және технологиялар институты, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[4]Прага қаласындағы Чехия техникалық университеті, Чехия Республикасы, Прага қ.
02.08.26 ж. баспаға түсті.
10.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
18.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АРАЛАС ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫ БАР КӨЛІКТЕГІ АККУМУЛЯТОР БАТАРЕЯСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақала Торайғыров университетінің «Көліктік техника және логистика» кафедрасында жүргізілетін аралас энергетикалық қондырғысы бар көлік құралды жобалау және зерттеу жұмысына арналған. Жұмыстың нәтижелерінің бірі – осындай көліктердің құрылымдық сызбаларын талдауға негізделіп, аккумуляторлық батареясына ерекше көңіл бөлінген, аралас энергетикалық қондырғысы бар жаңа рационалды көлік сызбасы ұсынылған.

Мақалада аралас энергетикалық қондырғысы бар көліктердегі аккумуляторлық батареяның құрылымын жетілдіру мәселелері қарастырылады. Қазіргі уақытта аккумуляторлық батареяларға қойылатын негізгі талаптардың бірі ретінде жоғары жұмыс температурасы жағдайында коррозияға төзімділікті қамтамасыз ету көрсетілген. Аккумулятор батареясы тек энергия көзі ғана емес, аралас энергетикалық қондырғысы бар көліктің стратегиялық торабы болып табылады. Ол оның ұзақ қызмет ету мерзімін, тиімділігін және бәсекеге қабілеттілігін анықтайды.

Мақалада патенттік зерттеулер жүргізілді, әртүрлі аккумулятор батареяларының құрылымдары қаралды. Олардың негізгі кемшілігі – қызмет ету мерзімінің қысқаруы. Жұмыста қорғасын қышқылды аккумуляторлық батареяны жетілдіру мәселесі қойылып, шешілді. Мәселе былай шешіледі: қорғасын қышқылды аккумулятор батареясында әр аккумулятор әртүрлі полярлы электродтар блогынан тұрады, олар сепараторлар мен электролит арқылы бөлінген.

Өткізілген патенттік зерттеулер нәтижесінде қойылатын талаптарға сәйкес аккумуляторлық батареяның құрылымы таңдалды. Мақалада прототип ретінде таңдалған аккумуляторлық батареяның құрылымы сипатталған. Сондай-ақ прототиптің артықшылықтары мен кемшіліктері келтірілген.

Жұмыста аккумуляторлық батареяның автоматты құрылымы ұсынылған, ол аккумуляторлық батареяның тұтынушылық қасиеттерін едәуір жақсартады, атап айтқанда, суық мезгілде батареяның толық сыйымдылығын сақтау және оның сенімді қызмет ету мерзімін ұзарту. Мақалада аккумулятордың құрылысының ерекшеліктері сипатталған.

Кілтті сөздер: көлік құралы, аралас энергетикалық қондырғы, аккумулятор, патенттік зерттеулер, автоматты аккумуляторлық батарея.

А. А. Ракишева[1], С. Б. Кокин[2], *А. Н. Балтабекова[3], П. Бухнер[4], К. К. Абишев[5]
[1]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2,3,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2,3,5]Казахстанский институт науки и технологий,
Республика Казахстан, г. Павлодар;
[4]Чешский технический университет в Праге,
Чешская Республика, г. Прага
Поступило в редакцию 02.08.26.
Поступило с исправлениями 10.08.26.
Принято в печать 18.08.26.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

Статья посвящена разработке и исследованию транспортного средства с комбинированной энергетической установкой, проводимом на кафедре «Транспортная техника и логистика» НАО «Торайгыров университет». Одним из результатов работы является то, что на основе анализа компоновочных схем таких транспортных средств предложена новая рациональная схема транспортного средства с комбинированной энергетической установкой, в которой особое внимание уделено аккумуляторной батарее.

В статье рассматриваются вопросы совершенствования конструкции аккумуляторной батареи в транспортных средствах с комбинированной энергетической установкой. Указано что одним из основных требований к аккумуляторным батареям в настоящее время является обеспечение коррозионной стойкости в условиях высоких рабочих температур. Аккумуляторная батарея является не просто элементом энергоснабжения, а стратегическим узлом транспортного средства с комбинированной энергетической установкой, определяющим её долговечность, эффективность и конкурентоспособность.

В статье проведены патентные исследования, рассмотрены различные конструкции аккумуляторных батарей. Основным их недостатком является пониженный срок службы. В работе поставлена и решена задача по усовершенствования свинцово-кислотной аккумуляторной батареи. Задача решается тем, что в свинцово-кислотной аккумуляторной батарее каждый аккумулятор состоит из блока разнополярных электродов, разделенных сепараторами и электролитом.

По результатам проведённых патентных исследований осуществлен подбор конструкции аккумуляторной батареи, соответствующая предъявляемым требованиям. В статье представлено описание конструкции аккумуляторной батареи выбранной в качестве прототипа. Также приводятся преимущества и недостатки прототипа.

В работе предложена конструкция автоматической аккумуляторной батареи, которая существенно улучшает потребительские качества аккумуляторной батареи, а именно сохранение полной ёмкости аккумуляторной батареи в холодное время года и увеличения срока её безотказной службы. В статье приводится описание особенностей конструкции аккумулятора.

Ключевые слова: транспортное средство, комбинированная энергетическая установка, аккумулятор, патентные исследования, автоматическая аккумуляторная батарея.

МРНТИ 73.49.19

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/588-605

***А. В. Рожков[1], Б. Ш. Аскаров[2], А. Д. Касымжанова[3],**
А. Б. Куанышбаев[4], К. Б. Коныртаева[5]

[1,2,3]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;

[4,5]Карагандинский университет Казпотребсоюза, Республика Казахстан, г. Караганда.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9408-9461
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2621-9938
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4623-0202
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9577-5279
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6179-9472
*e-mail: alexktpm@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АВТОНОМНЫМИ КОНТУРАМИ КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА

В данной статье представлены результаты теоретического исследования механизма распределения нагрузки между автономными контурами крутонаклонного конвейера. Двухконтурный пластинчатый конвейер представляет собой конвейер, в конструктивной схеме которого используется принцип подпора транспортируемого груза, для удерживания его скатывания. Тягово-несущий контур представляет собой пластинчатый конвейер. Поддерживающий контур представляет собой комплект тяговых цепей, к которым закрепляются перегородки, обеспечивающие удержание груза на несущем полотне. Такая конструкция позволяет иметь в качестве тягового органа комплект из шести цепей (четыре на нижнем контуре и две на верхнем), что позволяет обеспечить максимальную высоту подъема одним конвейером, достаточную для большинства эксплуатируемых карьеров. Распределение нагрузки между автономными контурами учитывается вводимыми при определении сопротивления движению коэффициентами загрузки автономных контуров. Установлены зависимости коэффициентов загрузки автономных контуров от коэффициентов распределения веса, и зависимости предельных значений коэффициентов распределения веса на автономные контуры конвейера от коэффициента трения между грузом и несущим полотном, коэффициента внутреннего трения транспортируемого груза и угла установки конвейера.

Полученные зависимости могут быть использованы при расчетах в процессе проектирования подобных конструкций конвейеров.

Ключевые слова: крутонаклонный конвейер, подпор транспортируемого груза, распределение нагрузки, коэффициенты загрузки контуров, коэффициенты распределения веса.

Введение

Современное состояние открытых горных разработок характеризуется устойчивой тенденцией увеличения глубины карьеров. В связи с тем, что традиционные виды транспорта, такие как автомобильный и железнодорожный имеют ограниченные уклоны, которые они способны преодолевать, то увеличение глубины карьера требует устройства путей значительной длины, что ведет к увеличению капитальных затрат на транспорт, и увеличение доли затрат на транспорт в себестоимости продукции.

Применение циклично-поточной технологии разработки полезных ископаемых, в которой используется конвейерный транспорт, позволяет частично решить данную проблему, поскольку крутонаклонные конвейеры имеют возможность транспортировать горную массу под более значительными углами, нежели автомобильный и железнодорожный транспорт.

Применение крутонаклонных конвейеров специальных конструкций позволяет устанавливать их под углами равными углу естественного откоса борта карьера, что значительно уменьшает объемы горно-капитальных работ, а следовательно снижает удельный вес затрат на транспорт в себестоимости продукции [1; 2; 3].

Отличительной особенностью крутонаклонных конвейеров является применение в конструкции различных способов удержания груза на несущем полотне конвейера от скатывания [4;5]. Способы удержания груза на полотне можно разделить на три группы: увеличение сцепления груза с несущим полотном; увеличение нормального давления груза на несущее полотно; применение подпора груза [6, с. 245]. Наиболее эффективным является способ подпора груза, достигаемого устройством перегородок на несущем полотне конвейера [7; 8]. Перегородки могут быть предусмотрены в конструкции несущего полотна конвейера (одноконтурная схема), или располагаться на отдельном автономном контуре. Одной из таких конструкций является конструкция крутонаклонного пластинчатого конвейера с двумя автономными контурами – несущего и поддерживающего (Рисунок 1).

Такая конструкция позволяет значительно увеличить длину конвейера за счет дополнительного поддерживающего контура, также несущего тяговую нагрузку. Кроме того длину пластинчатого конвейера можно увеличить за счет использования промежуточных приводов, в конструкции которых предусмотрено применение линейного асинхронного двигателя, основные параметры которого определены в [9], (следует отметить неточность перевода данной статьи: вместо «apron conveyor» следует читать «plate conveyor»).

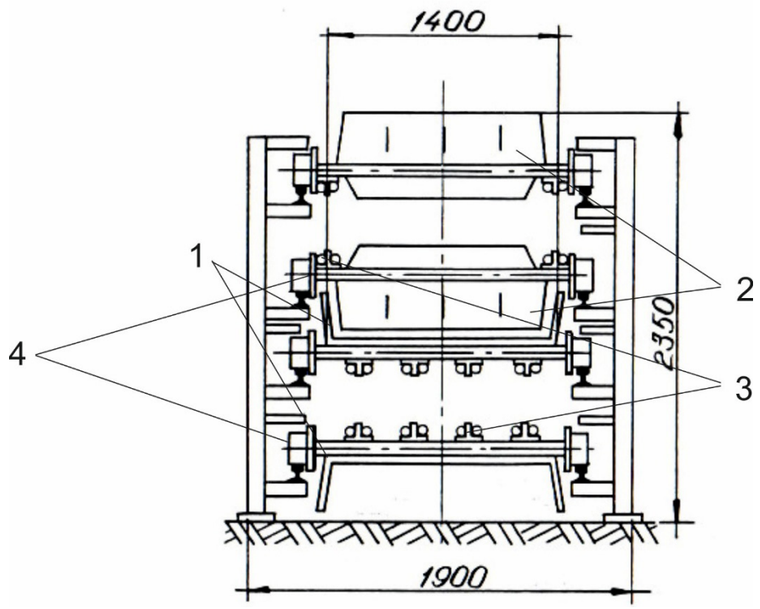


Рисунок 1 – Конструктивная схема крутонаклонного пластинчатого конвейера
1 – Тягово-несущий контур; 2 – Тягово-поддерживающий контур;
3 – Тяговая цепь; 4 – Ходовой ролик

Целью исследования является определение условий обеспечивающих равную скорость движения несущего и поддерживающего контура.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– установить зависимость коэффициентов нагрузки автономных контуров от коэффициентов распределения веса груза на автономные контуры;

– установить зависимости коэффициентов распределения веса на автономные контуры от коэффициента внутреннего трения груза и коэффициента трения между грузом и несущим полотном.

Материалы и методы

Крутонаклонный пластинчатый конвейер, выполненный по двухконтурной схеме, имеет в своем составе нижний, тягово-несущий контур и верхний, тягово-поддерживающий контуры. Таким образом часть общего сопротивления движению воспринимается тяговыми органами верхнего контура, а часть – тяговыми органами нижнего контура.

Поскольку грузонесущим является нижний контур, то часть общего сопротивления движению, обусловленную нормальным давлением полотна нижнего контура с лежащим на нем грузом и скатывающими составляющими веса полотна нижнего контура, следует отнести на тяговые органы нижнего контура, а часть общего сопротивления движению, обусловленную нормальным

давлением полотна верхнего контура и скатывающими составляющими веса верхнего контура, на тяговые органы верхнего контура.

Скатывающие составляющие веса груза следует отнести на тяговые органы обоих контуров при определенной доли их участия. В этом случае сопротивления движению на линейных участках можно определить по формулам [10, 11], с введением в известные формулы безразмерных коэффициентов распределения нагрузки между автономными контурами:

-для нижнего контура:

$$W_{нi}=gl_i[(q_{гр}+q_{п}^{н})w'\cos\beta+(q_{гр}K_{н}+q_{п}^{н})\sin\beta] \quad (1)$$

для верхнего контура

$$W_{вi}=gl_i[q_{п}^{в}w'\cos\beta+(q_{гр}K_{в}+q_{п}^{в})\sin\beta] \quad (2)$$

Где: $K_{н}$, $K_{в}$ – безразмерные коэффициенты распределения нагрузки между автономными контурами конвейера.

$q_{гр}$ – линейная масса груза на конвейере, кг/м;

$q_{п}^{н}$ – линейная масса нижнего полотна, кг/м;

$q_{п}^{в}$ – линейная масса верхнего полотна, кг/м;

w' – коэффициент сопротивления движению полотна конвейера

β – угол установки наклонной части конвейера, град

Очевидно, что:

$$K_{н}+K_{в}=1 \quad (3)$$

Распределение нагрузки между автономными контурами конвейера учитывается коэффициентами нагрузки контуров $K_{н}$ и $K_{в}$, которые определяют, какая часть линейной массы груза на крутонаклонном конвейере воспринимается нижним и верхним контуром. Поскольку автономное контуры имеют связь через транспортируемый груз, то необходимо определить условия, при которых обеспечивается заданное распределение нагрузки между автономными контурами. Реализуемые значения коэффициентов $K_{н}$ и $K_{в}$, будут определяться соотношением усилий, действующих на груз со стороны автономных контуров.

Рассмотрим участок грузовой ветви крутонаклонного конвейера между двумя перегородками верхнего контура. Рисунок 2 – Участок грузовой ветви крутонаклонного конвейера.

Приложим к грузу силы P_1 и P_2 – соответственно верхнего и нижнего контуров. Можно записать следующие соотношения для коэффициентов $K_{н}$ и $K_{в}$ [12, с. 90]:

$$K_{в}=\frac{P_1}{P_1+P_2} \quad (4)$$

$$K_{\text{н}}=\frac{P_2}{P_1+P_2} \quad (5)$$

Разделим весь груз, находящийся между перегородками, условно на две части, плоскостью, проходящей через концы перегородок. (Рисунок 2), и обозначим через Q_1, Q_2, Q – веса, соответственно, верхней и нижней части груза и общий вес груза между перегородками.

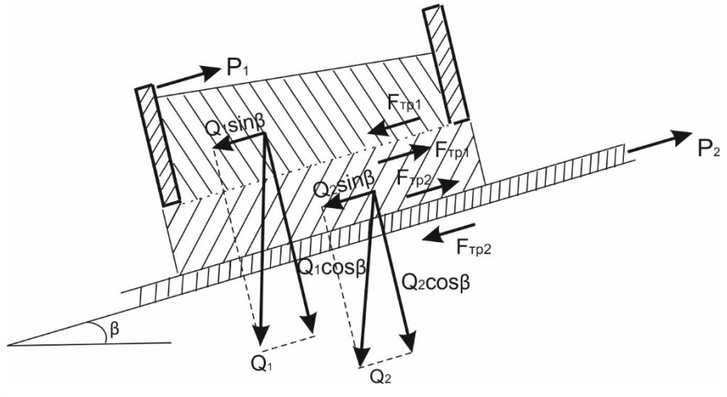


Рисунок 2 – Участок грузовой ветви крутонаклонного конвейера

Введем понятие безразмерных коэффициентов распределения веса груза на автономные контура конвейера, определяемые формулами:

$$K_Q^{\text{в}}=\frac{Q_1}{Q} \quad (6)$$

$$K_Q^{\text{н}}=\frac{Q_2}{Q} \quad (7)$$

Очевидно, что

$$K_Q^{\text{в}}+K_Q^{\text{н}}=1 \quad (8)$$

$$Q_1+Q_2=Q \quad (9)$$

Коэффициенты $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$ зависят от конструктивных и эксплуатационных характеристик крутонаклонного конвейера, таких как величина зазора между концом перегородки и нижним несущим полотном, степени загрузки конвейера и выражаются геометрическими зависимостями.

Установив зависимость коэффициентов загрузки контуров конвейеров $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$ от коэффициентов распределения веса на контуры конвейера $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$, можно определить требуемое значение зазора между концом перегородки верхнего контура и несущим полотном конвейера для реализации расчетных значений

$K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$, а также установить пределы колебания производительности конвейера, при которых не происходит изменение значений коэффициентов $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$.

Приложим к обеим частям груза силу трения $F_{\text{тр1}}$, возникающую между ними, и силу трения $F_{\text{тр2}}$, возникающую между нижней частью груза и несущим полотном (Рисунок 2 – Участок грузовой ветви крутонаклонного конвейера).

Уравнение равновесия частей груза в проекции имеют вид:

- для верхней части

$$P_1-Q_1 sin\beta-F_{\text{тр1}}=0 \quad (10)$$

- для нижней части

$$F_{\text{тр1}}+F_{\text{тр2}}-Q_2 sin\beta=0 \quad (11)$$

- всего груза

$$P_1 + P_2 -Q sin\beta=0 \quad (12)$$

Усилие со стороны полотна на груз создается силой P_2, поэтому можно записать:

$$P_2 -F_{\text{тр2}}=0 \quad (13)$$

С учетом (6), (7), (13) соотношения (10), (11) примут вид:

$$P_1-K_Q^{\text{в}}\text{Q } sin\beta-F_{\text{тр1}}=0 \quad (14)$$

$$F_{\text{тр1}}+P_2 -K_Q^{\text{н}}\text{ Q } sin\beta=0 \quad (15)$$

При номинальной загрузке конвейера и расчетном значении коэффициентов и $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$ силовой связи между автономными контурами через транспортируемый груз быть не должно, а в этом случае

$$F_{\text{тр1}}=0 \quad (16)$$

Подставляя (16) в (14) и (15) с учетом (4), (5), (12) получим:

$$K_Q^{\text{н}}=K_{\text{н}} \quad (17)$$

$$K_Q^{\text{в}}=K_{\text{в}} \quad (18)$$

Откуда следует, что для реализации требуемых значений $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$, зазор между перегородкой верхнего контура и несущим полотном должен быть таким, чтобы соблюдались равенства (17) и (18).

В процессе эксплуатации возможно несоблюдение равенств (17) и (18), вследствие отклонения величины зазора от расчетной величины из-за исполнения перегородок подпружиненными, или вследствие изменения степени загрузки, при этом будет возникать силовая связь между контурами через транспортируемый груз. В связи с этим, установив зависимость коэффициентов $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$ от $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$, можно найти и оценить пределы возможных колебаний , и , при которых заданное распределение нагрузки не нарушается.

Для конкретной конструкции конвейера, из условия равного использования прочности тяговых органов обоих контуров, определяюеся расчетные значения коэффициентов $K_{\text{н.р}}$ и $K_{\text{в.р}}$.

Очевидно, что силовая связь между контурами через груз обеспечит постоянство значений $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$ при условии, что сила трения между слоями груза не превышает своего максимального значения, равного:

$$\left|F_{mp.1}\right| \le F_{mp1.\max} = K_Q^e Q\cos\beta f_1 \tag{19}$$

Из (10) и (19), учитывая возможные разные знаки силы $F_{mp.1}$, получим два неравенства:

$$P_1 \ge K_Q^e Q\sin\beta - K_Q^e Q\cos\beta f_1 \tag{20}$$

$$P_1 \le K_Q^{\text{в}} Q\sin\beta + K_Q^{\text{в}} Q\cos\beta f_1 \tag{21}$$

Откуда, с учетом (4), (5) и (12) получим

$$\frac{K_{в.р.}}{1+f_1 ctg\beta} \le K_Q^e \le \frac{K_{в.р.}}{1-f_1 ctg\beta} \tag{22}$$

$$\frac{K_{н.р.}}{1-f_1 ctg\beta} - \frac{f_1}{tg\beta - f_1} \le K_Q^н \le \frac{f_1}{tg\beta + f_1} - \frac{K_{н.р.}}{1+f_1 ctg\beta} \tag{23}$$

Таким образом, при изменении $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$, определяемых неравенствами (22) и (23) коэффициенты $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$ постоянны и равны:

$$K_н = K_{н.р.} = const \tag{24}$$

$$K_в = K_{в.р.} = const \tag{25}$$

Очевидно, что сила трения $F_{\text{тр2}}$ между несущим полотном и грузом тоже не может превышать своего максимального значения:

$$F_{mp.2} \le F_{mp.\max 2} = Q\cos\beta f_2 \tag{26}$$

Где: f_2 – коэффициент трения между грузом и несущим полотном.

Выражение (13) с учетом (26) примет вид:

$$P_2 \le Q\cos\beta f_2 \tag{27}$$

Откуда с учетом (4), (5), (6), (7) получим

$$K_{н.р.} \le f_2 ctg\beta \tag{28}$$

$$K_{в.р.} \ge 1 - f_2 ctg\beta \tag{29}$$

Заметим, что всегда соблюдается соотношение

$$K_Q^e \le 1 \tag{30}$$

Следовательно, если

$$\frac{K_{в.р.}}{1-f_1 ctg\beta} \ge 1 \tag{31}$$

Тогда

$$K_Q^e = 1 \tag{32}$$

Из (31) имеем

$$K_{в.р.} \ge 1 - f_1 ctg\beta \tag{33}$$

Поскольку соблюдение соотношения (29) обязательно, а коэффициенты трения для рассматриваемого случая обычно подчиняются неравенству

$$f_1 \ge f_2 \tag{34}$$

то, следовательно, выполнение (29) влечет обязательное соблюдение (33), а значит и (31). Поэтому (22) и (23) запишутся в следующем виде:

$$\frac{K_{в.р.}}{1+f_1 ctg\beta} \le K_Q^e \le 1 \tag{35}$$

$$0 \le K_Q^н \le \frac{K_{н.р.}}{1+f_1 ctg\beta} + \frac{f_1}{tg\beta + f_1} \tag{36}$$

При несоблюдении неравенства (35) и (36) равновесие груза на полотне может не нарушаться до того момента, когда сумма максимально возможных величин сил трения не сравняется с составляющей силы веса нижнего слоя груза, т.е. необходимо соблюдение соотношения:

$$F_{mp.\max 1} + F_{mp.\max 2} \geq QK_Q^н \sin\beta \tag{37}$$

или с учетом (19) и (26) имеем:

$$K_Q^в Q\cos\beta f_1 + Q\cos\beta f_2 \geq QK_Q^н \sin\beta \tag{38}$$

Откуда с учетом (8) и условия нарушения (19) и (36) получим:

$$\frac{tg\beta - f_2}{tg\beta + f_1} \leq K_Q^в \lhd \frac{K_{в.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} \tag{39}$$

$$\frac{K_{н.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} + \frac{f_1}{tg\beta + f_1} \lhd K_Q^н \leq \frac{f_1 + f_2}{tg\beta + f_1} \tag{40}$$

Очевидно, что в данных пределах изменения $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$ сила трения $F_{\text{тр1}}$ достигла максимального значения и изменяется только пропорционально $K_Q^{\text{в}}$, в соответствии с (19), поэтому перепишем (14) и (15) с учетом (19) в виде:

$$P_1 = K_Q^в Q\sin\beta + K_Q^в Q\cos\beta f_1 \tag{41}$$

$$P_2 = K_Q^н Q\sin\beta - K_Q^в Q\cos\beta f_1 \tag{42}$$

Откуда с учетом (8), (12) и (5) получим изменения коэффициентов $K_{\text{н}}$ и $K_{\text{в}}$ от $K_Q^{\text{в}}$, и $K_Q^{\text{н}}$ в пределах определяемых выражениями (39) и (40):

$$K_в = K_Q^в (1 + f_1 ctg\beta) \tag{43}$$

$$K_н = K_Q^н (1 + f_1 ctg\beta) - f_1 ctg\beta \tag{44}$$

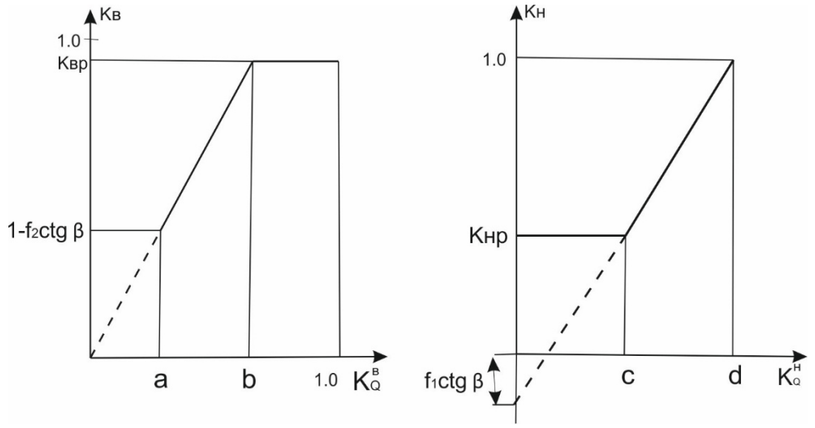
Таким образом, объединяя вышеизложенное, можно записать две функции, выражающие зависимость коэффициентов загрузки контуров конвейера от коэффициентов распределения веса груза:

$$\begin{aligned} &K_в = K_Q^в (1 + f_1 ctg\beta), при \frac{tg\beta - f_2}{tg\beta + f_1} \leq K_Q^в \lhd \frac{K_{в.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} \\ &K_в = K_{в.р} = \text{co}nst, при \frac{K_{в.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} \leq K_Q^в \leq 1 \end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned} &K_н = K_{н.р.} = const, при 0 \leq K_Q^н \leq \frac{K_{н.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} + \frac{f_1}{tg\beta + f_1} \\ &K_н = K_Q^н (1 + f_1 ctg\beta) - f_1 ctg\beta, при \frac{K_{н.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} + \frac{f_1}{tg\beta + f_1} \leq K_Q^н \leq \frac{f_1 + f_2}{tg\beta + f_1} \end{aligned} \tag{46}$$

Где: $K_{\text{н}}$, $K_{\text{в}}$ – значения коэффициентов загрузки, при изменении коэффициентов распределения веса.

Графики функций $K_в = f(K_Q^в)$ и $K_н = f(K_Q^н)$ представлены на Рис 3.



На схеме приняты обозначения:

a=$\frac{tg\beta - f_2}{tg\beta - f_1}$ b=$\frac{K_{\text{вр}}}{1 + f_1 ctg\beta}$ c=$\frac{K_{\text{нр}}}{1 + f_1 ctg\beta} + \frac{f_1}{tg\beta + f_1}$ d=$\frac{f_1 + f_2}{tg\beta + f_1}$

а) верхний контур ; б) нижний контур

Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов загрузки автономных контуров от коэффициентов распределения веса

Анализ графиков показывает, что изменение коэффициентов загрузки контуров происходит следующим образом: начиная от значений $K_Q^в = 1$ и $K_Q^н = 0$ коэффициентов распределения веса до значений, равных

$$K_Q^н \leq \frac{K_{н.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} + \frac{f_1}{tg\beta + f_1} \tag{47}$$

$$K_Q^в \geq \frac{K_{в.р.}}{1 + f_1 ctg\beta} \tag{48}$$

значения коэффициентов загрузки контуров остаются постоянными равными расчетным.

В этом случае величина усилия, возникающего между слоями груза, не превышает предельного значения силы трения между слоями груза.

При значениях коэффициентов распределения веса контуров больших значений, определяемых формулой (47) и меньших, определяемых формулой (28), коэффициенты загрузки контуров изменяются по линейному закону. Объясняется это тем, что сила трения между слоями груза достигает предельного значения, поэтому величины усилия между слоями груза ограничиваются значением предельной силы трения между слоями груза.

При значениях коэффициентов распределения веса груза, определяемых формулами

$$K_Q^н = \frac{f_1 + f_2}{tg\beta + f_1} \quad (49)$$

$$K_Q^в = \frac{tg\beta - f_2}{tg\beta + f_1} \quad (50)$$

происходит срыв сцепления груза с несущим полотном, так как скатывающая составляющая веса груза на полотне становится больше силы трения между грузом и несущим полотном.

Как видно из формул (47), (30), предельные значения коэффициентов распределения веса зависят от угла установки конвейера β, коэффициента трения между грузом и несущим полотном f_1 и коэффициента внутреннего трения транспортируемого материала f_2.

Для различных значений данных параметров рассчитаны предельные значения коэффициентов распределения веса в программной среде Scilab. Алгоритм составления программного кода представлен в виде двух вложенных циклов, в которых изменяются значения f_1 и f_2 и вычисляются предельные значения $K_Q^н$ и $K_Q^в$. По полученным расчетам построены трехмерные графики средствами Scilab. Предельные значения коэффициентов распределения веса; графики зависимости представлены на Рисунках 4–7.

Результаты и обсуждение

Из представленных зависимостей видно, что при неблагоприятных условиях, т.е.: низких уровне коэффициента внутреннего трения (f_1=0,2), и коэффициента трения между грузом и несущим полотном (f_2=0,5), и существенным углом установки конвейера $\beta = 45°$ значения предельных коэффициентов распределения веса, вызывающих изменение расчетных коэффициентов загрузки не превышают: $K_Q^в \le 0.5$ и не ниже $K_Q^н \ge 0.5$, при коэффициентах загрузки: $K_{в.р.} = 0.6$ и $K_{н.р.} = 0.4$, т.е. при установлении коэффициентов распределения веса в соответствии с (17) и (18), заданное распределение нагрузки не нарушится при полной загрузке конвейера.

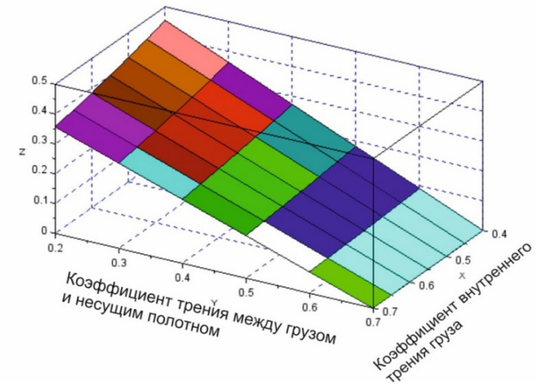


Рисунок 4 – Зависимость предельных значений коэффициента распределения веса груза на верхний контур при угле установки β=35°

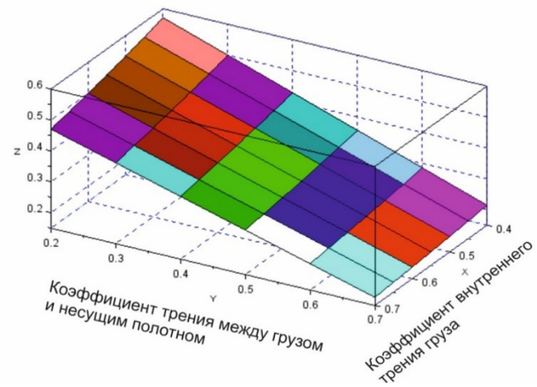


Рисунок 5 – Зависимость предельных значений коэффициента распределения веса груза на верхний контур при угле установки β=45°

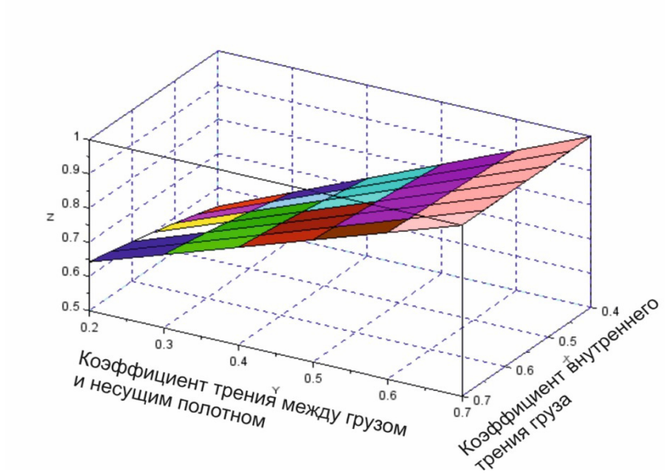


Рисунок 6 – Зависимость предельных значений коэффициента распределения веса груза на нижний контур при угле установки β=35°

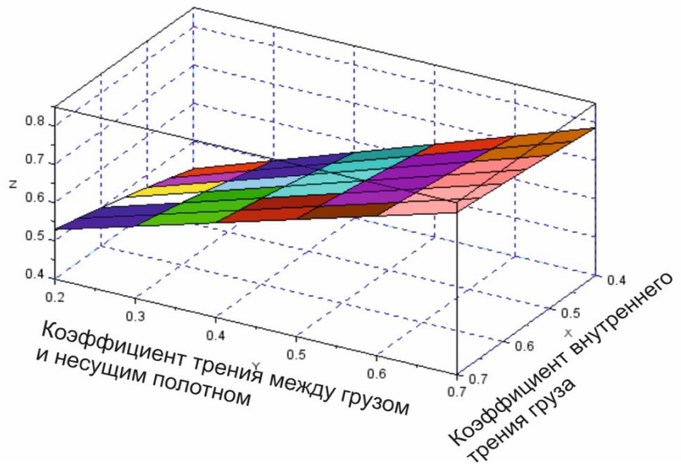


Рисунок 7 – Зависимость предельных значений коэффициента распределения веса груза на нижний контур при угле установки β=45°

Однако поскольку предельные значения коэффициентов распределения веса близки к расчетным, то при неполной загрузке конвейера возможно нарушение расчетного распределения нагрузки и даже срыв сцепления.

Исключить данное явление можно двумя способами. Первый следует из зависимостей, представленных на Рисунке 3., согласно которым заданное

распределение нагрузки сохраняется при значениях $K_Q^н$=0 и $K_Q^в$=1, которые можно обеспечить путем полного погружения перегородки верхнего контура в транспортируемый груз, при этом заданное распределение нагрузки будет сохраняться при любой степени загрузки конвейера. Второй способ заключается в регулировании скорости конвейера в зависимости от величины поступающего на него грузопотока, что достигается использованием регулируемого привода конвейера.

Совершенно очевидно, что при первом способе увеличивается металлоемкость конвейера, а при неполной загрузке увеличивается соотношение линейной массы полотна к линейной массе груза, что увеличивает энергоемкость транспортирования. Второй способ требует дополнительных затрат на оборудование конвейерной линии системой автоматического регулирования скорости. Конкретное решение должно приниматься при проектировании конкретной конвейерной линии.

Таким образом, при обеспечении в определенных пределах значений коэффициентов распределения нагрузки будут обеспечиваться и расчетные значения коэффициентов загрузки контуров, которые в свою очередь будут определяться параметрами, как самого конвейера, так и его привода, поэтому необходимо рассмотреть вопрос обеспечения расчетных значений коэффициентов загрузки параметрами привода крутонаклонного конвейера.

Выводы

В представленной работе определены

– зависимости безразмерных коэффициентов нагрузки автономных контуров от безразмерных коэффициентов распределения веса груза на автономные контуры;

– зависимости предельных значений безразмерных коэффициентов распределения веса на автономные контуры от безразмерных: коэффициента внутреннего трения груза и коэффициента трения между грузом и несущим полотном.

– при среднестатистических параметрах эксплуатации двухконтурного крутонаклонного конвейера: угол установки – 35 град., коэффициента внутреннего трения груза – 0,6 , коэффициента трения между грузом и несущим полотном – 0,4 , коэффициентов распределения нагрузки: на нижний контур – 0,67 ; на верхний контур – 0,33, значения коэффициентов распределения веса, при которых обеспечивается работа конвейера без взаимного проскальзывания автономных контуров, составляет: на верхний контур – от 0,21 до 1,0 , на нижний контур от 0,0 до 0,79.

Полученные зависимости могут быть использованы при расчетах в процессе проектирования подобных конструкций конвейеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Бурмистров, К. В., Головей, С. И., Крутикова, А. В., Даутбаев З. Р.** Исследование возможности применения конвейерного транспорта в сложных

горно-геологических условиях глубоких высокопроизводительных карьеров [Текст] // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – № 2. – Т. 6 – С. 32–38. – https://doi.org/10.18503/2222-9396-2016-6-2-32-38

2 **Andrey Minkin, Peter Borsting, Norbert Becker.** A new Technology for Steep Incline High Capacity Open Pit Conveying [Text] // Bulk solids handling. – 2016. – № 2. – Vol. 36. – P. 99–118.

3 **Яковлев, В. Л., Тюлькин, А. П., Кармаев, Г. Д.** Технологические аспекты применения крутонаклонных конвейеров в горно-добывающей промышленности [Текст] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – № 7 – С. 34–39.

4 **Галкин, В. И., Шешко, Е. Е.** Возможность применения различных типов ленточных конвейеров при циклично-поточной технологии глубоких карьеров [Текст] // Горная Промышленность. – 2023. – № 3. – С. 117–122. – https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-117-122

5 **Рожков, А. В., Куанышбаев, А. Б., Кобеген, С.** Обзор состояния вопроса и перспективы применения пластинчатых конвейеров [Текст] // Вестник КазАТК. – 2019. – № 2 (109) – С. 90–97.

6 **Рожков, А. В., Молдабаев, Б. Г., Аскаров, Б. Ш., Балабаев, О. Т., Хайбуллин, Р. Р.** Обоснование конструктивной схемы крутонаклонного карьерного пластинчатого конвейера [Текст] // Павлодар : ПГУ им. С.Торайгырова «Наука и техника Казахстана». – 2023. – № 4. – С. 239–249.

7 А.с. 1273301 СССР, МКИ2 С22 С37/10 Крутонаклонный конвейер/ Данияров А. Н., Акашев З. Т., Руткевич В. И., Рожков А. В., А. И. Белявская. (СССР) [Text]. – № 3936149/27-03 ; заявл. 26.07.85 ; Опубл. 30.11.86, Бюл. № 44. – 2 с.

8 Пат. 35971 РК, МПК B65G 17/06/ Пластинчатый конвейер. Рожков А. В., Акашев А. З.,Молдабаев Б. Г.,Куанышбаев А. Б. (РК) [Текст] - № 2021/0618.1 ; заявл. 13.10.21 ; опубл. 14.04.23, Бюл. № 15. – 3 с.

9 **Alexander V. Rozhkov, Baurzhan G. Moldabayev, Oyum T. Balabayev** Determining basic geometric parameters of the apron conveyor drive [Text] // Communications, Scientific letters of the University of Zilina. – 2023. – Vol. 25. – № 3. – P. B201–B208. – https://doi.org/10.26552/com.C.2023.050

10 **Данияров, А. Н., Акашев, З. Т., Рожков, А. В., Руткевич, В .И.** Основы тягового расчета двухконтурного конвейерного подъемника [Текст] // Алма-Ата : КазПТИ. – 1987. – С. 34–41.

11 **Спиваковский, А. О., Дьячков, В. К.** Транспортирующие машины : учебное пособие для машиностроительных вузов [Текст]. – Москва : Изд-во Машиностроение, 1983. – 487 с.

12 **Рожков, А. В.** Определение основных параметров крутонаклонного двухконтурного пластинчатого конвейера [Текст] // Караганда : КарПТИ. – I990. – С. 89–92.

REFERENCES

1 **Burmistrov, K. V., Golovej, S. I., Krutikova, A. V., Dautbaev, Z. R.** Issledovanie vozmozhnosti primeneniya konvejernogo transporta v slozhnyh gorno-geologicheskih usloviyah glubokih vysokoproizvoditel'nyh kar'erov [Investigation of the possibility of application of conveyor transport in complex mining and geological conditions of deep high-productivity quarries] [Text] // Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii. – 2016. – № 2. – Vol.6 – P. 32–38. – https://doi.org/10.18503/2222-9396-2016-6-2-32-38

2 **Andrey Minkin, Peter Borsting, Norbert Becker.** A new Technology for Steep Incline High Capacity Open Pit Conveying [Text] // Bulk solids handling. – 2016. – № 2. – Vol. 36. – P. 99–118.

3 **Yakovlev, V. L., Tyul'kin, A. P. Karmaev, G. D.** Tekhnologicheskie aspekty primeneniya krutonaklonnyh konvejerov v gorno-dobyvayushchej promyshlennosti [Technological aspects of the application of tilting conveyors in the mining industry] [Text] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2002. – № 7 – P. 34–39.

4 **Galkin, V. I., Sheshko, E. E.** Vozmozhnost' primeneniya razlichnyh tipov lentochnyh konvejerov pri ciklichno-potochnoj tekhnologii glubokih kar'erov [Possibility to use different types of belt conveyors in the cycle-stream technology of deep quarries] [Text] // Gornaya Promyshlennost' – 2023. – № 3. – P. 117–122. – https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-117-122

5 **Rozhkov, A. V., Kuanyshbaev, A. B., Kobegen, S.** Obzor sostoyaniya voprosa i perspektivy primeneniya plastinchatyh konvejerov [Overview of the status and prospects for sheet conveyor applications] [Text] // Vestnik KazATK. – 2019. – № 2 (109) – P. 90–97.

6 **Rozhkov A. V.,Moldabaev B. G., Askarov B. Sh., Balabaev O. T., Hajbullin R. R.** Obosnovanie konstruktivnoj skhemy krutonaklonnogo kar'ernogo plastinchatogo konvejera [Justification of the design scheme of a tilted quarry plate conveyor] [Text] // Pavlodar : PGU im. S.Torajgyrova «Nauka i tekhnika Kazahstana». – 2023. – № 4. – P. 239–249.

7 A.s. 1273301 SSSR, MKI2 S22 S37/10 Krutonaklonnyj konvejer/ Daniyarov A. N., Akashev Z. T., Rutkevich V. I., Rozhkov A. V., Belyavskaya A. I. (SSSR) [Text] - № 3936149/27-03 ; zayavl. 26.07.85; Opubl. 30.11.86, Byul. № 44. – 2 p.

8 Pat. 35971 RK, MPK B65G 17/06/ Plastinchatyj konvejer. Rozhkov A. V., Akashev A. Z., Moldabaev B. G.,Kuanyshbaev A. B. (RK) [Text]. – № 2021/0618.1 ; zayavl. 13.10.21 ; opubl. 14.04.23, Byul. № 15. – 3 p.

9 **Alexander V. Rozhkov, Baurzhan G. Moldabayev, Oyum T. Balabayev** Determining basic geometric parameters of the apron conveyor drive [Text] // Communications, Scientific letters of the University of Zilina. – 2023. – Vol. 25. – № 3. – P. B201–B208. – https://doi.org/10.26552/com.C.2023.050

10 **Daniyarov, A. N., Akashev, Z. T., Rozhkov, A. V., Rutkevich, V. I.** Osnovy tyagovogo rascheta dvuhkonturnogo konvejernogo pod"emnika [The basic tensile

calculation of a double-circuit conveyor lift] [Text] // Alma-Ata : KazPTI. – 1987. – P. 34–41.

11 **Spivakovskij, A. O., D'yachkov, V. K.** Transportiruyushchie mashiny : uchebnoe posobie dlya mashinostroitel'nyh vuzov [Transport machines : training manual for engineering schools] [Text]. – Moscow : Izd-vo Mashinostroenie, 1983. – 487 p.

12 **Rozhkov, A. V.** Opredelenie osnovnyh parametrov krutonaklonnogo dvuhkonturnogo plastinchatogo konvejera [Definition of the basic parameters of a two-circuit corrugated sheet conveyor] [Text] // Karaganda: KarPTI. – I990. – P. 89–92.

Поступило в редакцию 15.04.26.
Поступило с исправлениями 22.04.26.
Принято в печать 03.09.26.

***А. В. Рожков[1], Б. Ш. Аскаров[2], А. Д. Касымжанова[3],**
А. Б. Куанышбаев[4], К. Б. Коныртаева[5]
[1,2,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4,5]Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
15.04.25 ж. баспаға түсті.
22.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТҮК КӨЛБЕУ КОНВЕЙЕРДІҢ АВТОНОМДЫҚ ТІЛБЕГІ ЖЕЛІЛЕРІ АРАСЫНДА ЖҮКТІМНІҢ БӨЛУ МЕХАНИЗМІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада тік көлбеу конвейердің тәуелсіз тізбектері арасындағы жүктемені бөлу механизмін теориялық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Қос тізбекті алжапқыш конвейер тасымалданатын жүктің домалап кетуіне жол бермеу үшін оны ұстап тұруға арналған. Тартымды тасымалдау тізбегі – тақтайшалы конвейер. Тірек тізбегі – жүктемені тірек торында ұстап тұруды қамтамасыз ететін бөгеттер бекітілген тарту тізбектерінің жиынтығы. Бұл конструкция алты тізбектің (төменгі тізбекте төрт және жоғарғы тізбекте екеуі) тарту элементі ретінде әрекет етуіне мүмкіндік береді, бұл бір конвейер үшін көптеген карьерлер үшін жеткілікті максималды көтеру биіктігін қамтамасыз етеді. Тәуелсіз тізбектер арасындағы жүктемені бөлу жүргізу кедергісін анықтаған кезде енгізілген жүктеме факторларымен ескеріледі. Автономды тізбектердің жүктеме факторларының салмақты бөлу факторларына тәуелділігі және конвейердің автономды тізбектеріндегі салмақты бөлу факторларының шекті мәндерінің жүк пен тасымалдаушы тор арасындағы үйкеліс коэффициентіне, тасымалданатын жүктің ішкі үйкеліс коэффициентіне және конвейердің орнату бұрышына тәуелділігі анықталды.

Кілтті сөздер: тік бұрышты конвейер, жүктеме тірегі, жүктеменің таралуы, контурлық жүктеме коэффициенттері, салмақтың таралу коэффициенттері.

***A. V. Rozhkov[1], B. S. Askarov[2], A. D. Kasymzhanova[3],**
A. B. Kuanyshbaev[4], K. B. Konyrtaeva[5]
[1,2,3]Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[4,5]Karaganda University of Kazpotrebsoyuz,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 15.04.26.
Received in revised form 22.04.26.
Accepted for publication 03.09.26.

STUDY OF THE MECHANISM OF LOAD DISTRIBUTION BETWEEN AUTONOMOUS CIRCUIT LINES OF A STEEPLY-INCLINE CONVEYOR

This article presents the results of a theoretical study of the load distribution mechanism between the independent circuits of a steep-inclined conveyor. A dual-circuit apron conveyor is designed to support the transported load to prevent it from rolling. The traction-carrying circuit is a slat conveyor. The supporting circuit is a set of traction chains to which baffles are attached, ensuring the load is held on the supporting web. This design allows for a set of six chains (four on the lower circuit and two on the upper circuit) to act as the traction element, ensuring the maximum lifting height for a single conveyor, sufficient for most quarries. Load distribution between the independent circuits is accounted for by the load factors entered when determining the driving resistance. The dependences of the load factors of autonomous circuits on the weight distribution coefficients were established, as well as the dependences of the maximum values of the weight distribution coefficients on the autonomous conveyor circuits on the friction coefficient between the load and the carrier belt, the internal friction coefficient of the transported load, and the conveyor installation angle. These dependences can be used in calculations during the design of similar conveyor structures.

Keywords: steeply inclined conveyor, support of transported cargo, load distribution, contour loading factors, weight distribution factors.

МРНТИ 73.31.41

https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/606-618

***А. Н. Ситакова[1], С. Ж. Кабикенов[2], А. П. Ищенко[3], Г. В. Киселева[4]**

[1,2,3,4]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0912-9798

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7412-6026

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3935-557X

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0795-4720

*e-mail: aliyushenka89@mail.ru

ЭЛЕКТРОМОБИЛИ И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАРЯДНЫЕ СИСТЕМЫ: НАДЕЖНОСТЬ, УПРАВЛЕНИЕ И АДАПТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Статья посвящена комплексному анализу современных зарядных систем электромобилей в контексте глобального энергетического перехода и устойчивого развития транспортной отрасли. Рассматривается классификация зарядного оборудования по трём уровням мощности – AC Level 1, AC Level 2 и DC Fast Charging, – а также международные стандарты разъёмных интерфейсов и коммуникационных протоколов. Исследована проблема надёжности зарядной инфраструктуры: установлено, что показатель первой успешной зарядки (FTCSR) составляет в среднем 71 % глобально и снижается на 15–20 процентных пунктов к четвёртому году эксплуатации оборудования. Проанализированы технологии интеллектуального управления нагрузкой (Smart Charging) и двунаправленной интеграции электромобиля с электрической сетью (Vehicle-to-Grid), способные снизить пиковую нагрузку на распределительные сети на 20–40 %. Дана оценка перспективных адаптивных технологий: твердотельных аккумуляторов, беспроводной динамической зарядки и мегаваттных зарядных систем. Проведён региональный анализ зарядной инфраструктуры Республики Казахстан с учётом специфических барьеров – резкоконтинентального климата, больших межгородских расстояний и высокого износа базовой энергосети. Сформулированы практические рекомендации по адаптации зарядных технологий к условиям эксплуатации в Центральноазиатском регионе с учётом перспектив развития инфраструктуры.

Ключевые слова: электромобиль, зарядное устройство, надёжность, беспроводная зарядка, аккумуляторы, инфраструктура.

Введение

Если говорить про современный этап развития мировой экономики, то существует множество стремительных переходов транспортного сектора к электрической тяге. Согласно Международному энергетическому агентству, к концу 2024 года мировой парк электромобилей достиг 58 миллионов единиц. Хотя

рост при ежегодном темпе продаж свыше 20 %, что формирует принципиально новые требования к системам зарядки тяговых аккумуляторов [1].

Вместе с тем существующая инфраструктура пронизана недостатками. Первый успешный сеанс зарядки достигается лишь в 71 % случаев, надёжность оборудования к третьему году эксплуатации снижается до 69,9 %, а около 55 % отказов обусловлено проблемами коммуникационного стека [4]. Зарядка постоянным током свыше 150 кВт дополнительно сопряжена с ускоренной деградацией литий-ионных ячеек [5].

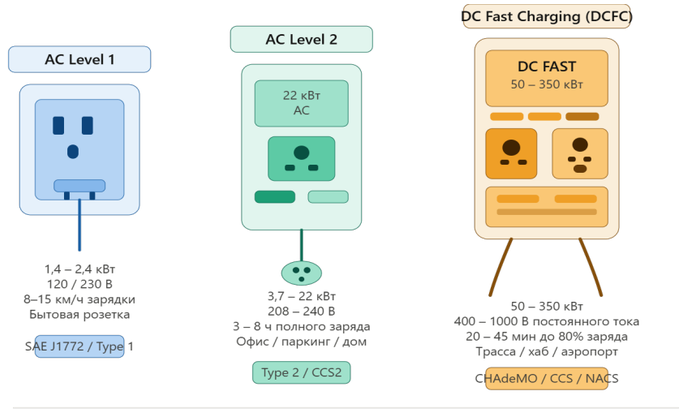


Рисунок 1 — Классификация зарядных устройств электромобилей (объекты исследования)

Рисунок 1 – Классификация зарядных устройств электромобилей

Если говорить про актуальность исследования, то она определяется отсутствием комплексного научного обобщения, то есть никто не связал, интегрирующую проблематику надёжности зарядного оборудования, умное управления зарядкой и адаптивных технологий применительно к регионам Казахстана с экстремальным климатом.

Одними из объектов исследования, являются зарядные устройства всех уровней мощности: AC Level 1 (1,4–2,4 кВт), AC Level 2 (3,7–22 кВт) и DC Fast Charging (50–350 кВт и выше) [2].

В связи с этим, целью исследования является комплексный анализ современных зарядных систем электромобилей, оценка их надёжности, методов управления нагрузкой, и разработка рекомендаций по внедрению адаптивных технологий в условиях Республики Казахстан.

Для достижения цели решаются следующие задачи: систематизация зарядных устройств по международным стандартам; анализ работоспособности и безотказности (показатель первой успешной зарядки FTCSR ГОСТ 27.002-2015); исследование технологий Smart Charging и V2G; оценка перспективных технологий WPT, SSB и MCS; региональный анализ инфраструктуры Казахстана с разработкой адаптационных рекомендаций.

Научная новизна, в том, что актуален сам анализ зарядных систем с региональной спецификой Центральной Азии. Практическая значимость определяется применимостью результатов при разработке технических регламентов, проектировании инфраструктуры и в образовательных программах Карагандинского технического университета [12].

Материалы и методы

Исследование выполнено в рамках смешанного (mixed-methods) подхода, сочетающего теоретико-аналитические и эмпирические методы, что обусловлено многоаспектностью объекта исследования [2]. Проведён систематический обзор свыше 80 источников в базах IEEE Xplore, Scopus, Web of Science и Google Scholar за 2020–2025 годы по направлениям: архитектура зарядных устройств, надёжность инфраструктуры, управление зарядкой, V2G, беспроводная передача мощности и твердотельные аккумуляторы [3]. Изучены международные стандарты SAE J1772, IEC 62196-2, ISO 15118, SAE J2954, CharIN MCS, а также казахстанские нормативные документы: концепция развития электромобильности до 2030 года, дорожная карта по зарядной инфраструктуре (2023) и приказ Министерства промышленности РК от 22 апреля 2024 года [13]. Изучен опыт формирования зарядной инфраструктуры в Китае, ЕС, Нидерландах, Норвегии и США с целью выявления трансферабельных решений для Казахстана [14]. Анкетирование проведено среди 120 владельцев электромобилей Алматы, Астаны и Темиртау (январь–апрель 2024 г., 32 вопроса, шкала Лайкерта). Дополнительно проведены глубинные интервью с представителями 8 организаций – операторов зарядных сетей и АО «KEGOC» – и экспертные беседы с тремя специалистами в области силовой электроники. В феврале–мае 2024 года обследованы 14 зарядных станций в трёх городах (каждый объект – не менее трёх раз): фиксировались доступность, время ожидания, отказы и состояние оборудования. Констатирующий эксперимент зафиксировал показатель первой успешной зарядки (FTCSR) на станциях возраста 0–3 лет. Формирующий эксперимент апробировал три режима Smart Charging на двух станциях AC Level 2 (22 кВт) в течение 8 недель. Контрольный эксперимент подтвердил воспроизводимость результатов в зимних условиях (−15…−32 °C).

Для анализа надежности использован один из показателей безотказности, характеризуемый коэффициентом успешного выполнения зарядных сессий (FTCSR).

Обработка количественных данных проводилась с применением следующих статистических процедур:

Для описательной статистики, вычисление среднего арифметического, медианы, стандартного отклонения и коэффициента вариации по показателям FTCSR, относящийся к показателям безотказности, а также времени ожидания и пиковой мощности.

среднее арифметическое:

$$x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (1)$$

медиана *Me* – значение, делящее упорядоченную выборку пополам;
стандартное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2} \quad (2)$$

коэффициент вариации:

$$\mathrm{CV} = (\mathrm{x} \cdot \sigma) \cdot 100\% \quad (3)$$

для проверки значимости различий между режимами управления зарядкой – критерий Вилкоксона для связанных выборок (при отклонении гипотезы о нормальности распределения по критерию Шапиро – Уилка;

Для анализа взаимосвязей вычислялся коэффициент ранговой корреляции Спирмена:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (4)$$

где, *di* – разность рангов наблюдений,
n – объём выборки.

Статистический анализ включал: коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_s) – для оценки взаимосвязи возраста оборудования с FTCSR и температуры с передаваемой мощностью; доверительные интервалы (α = 0,05) – для оценки достоверности результатов; метод наименьших квадратов (линейная и степенная модели, верификация по критерию Фишера) – для прогнозирования динамики парка зарядных станций. Обработка выполнена в Microsoft Excel и Python (SciPy, NumPy, Pandas, Matplotlib); критический уровень значимости – $p < 0,05$.

Эмпирическую базу составили: анкетирование 120 владельцев электромобилей (Алматы, Астана, Темиртау, 2024 г.); наблюдения 14 зарядных станций (312 визитов); сервисные журналы двух операторов за 2022–2024 годы (свыше 4 800 сессий); данные 8-недельного эксперимента по управлению нагрузкой; статистика БНС РК, АКАБ и МВД РК; аналитические материалы IEA (2023–2025), ICCT (2024) и Roland Berger (2025).

Совокупность применённых методов обеспечивает методологическую триангуляцию и достаточность доказательной базы для формулирования научно обоснованных выводов.



Рисунок 3 — Сопоставление темпов роста мирового парка ЭМ и публичных зарядных станций (2018–2024). Составлено по данным: IEA Global EV Outlook 2023, 2024, 2025.

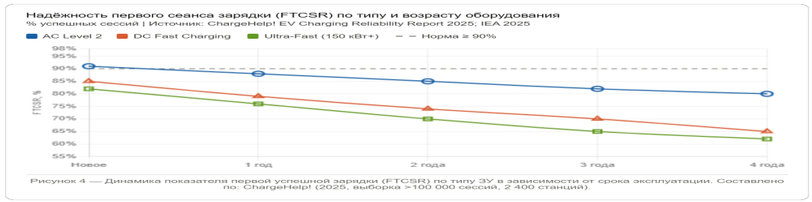


Рисунок 4 — Динамика показателя первой успешной зарядки (FTCSR) по типу ЗУ в зависимости от срока эксплуатации. Составлено по: ChargeHelp! (2025, выборка >100 000 сессий, 2 400 станций).

Рисунок – 3 Сопоставление темпов роста мирового парка ЭМ и публичных зарядных станций (2018–2024)

На рисунке 3 демонстрируется нарастающий разрыв между темпами роста парка электромобилей и публичной зарядной инфраструктуры. К 1 июля 2025 года в стране эксплуатируется около 15,8 тыс. электромобилей – почти в десять раз больше, чем в начале 2023 года. При этом на конец 2023 года на 7,7 тыс. электромобилей приходилось лишь 180 зарядных станций; к середине 2024 года парк утроился, тогда как число станций росло несопоставимо медленнее [14]. Данный инфраструктурный разрыв составляет ключевую проблему, обосновывающую актуальность исследования.

Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ технических характеристик зарядных устройств.

Одним из основных результатов проведенного исследования стала систематизация и сравнительная характеристика трёх классов зарядного оборудования, представленная в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные технические характеристики ЗУ разных уровней

Параметр	AC Level 1	AC Level 2	DC Fast Charging	Ultra-Fast (150+ кВт)
Мощность, кВт	1,4–2,4	3,7–22	50–150	150–350+
Напряжение	120 / 230 В AC	208–240 В AC	200–1000 В DC	400–1000 В DC
Ток, А	12–16	16–96	125–400	400–500+
Время заряда до 80 %	14–40 ч	2–8 ч	20–45 мин	10–20 мин
КПД, %	85–90	90–94	94–97	93–96
Стандарт разъёма	SAE J1772	IEC 62196-2	CCS / CHAdeMO / NACS	CCS2 / NACS
Охлаждение кабеля	Не требуется	Не требуется	Воздушное	Жидкостное
Средняя стоимость, USD	300–800	500–2 500	20 000–80 000	80 000–300 000

В таблице 1 показано: рост мощности сокращает время зарядки, но и стоит она намного дороже (до 375 раз между AC Level 1 и Ultra-Fast). Именно поэтому даже в развитых странах доля ультрабыстрых станций не превышает 10 %. Для Казахстана рациональнее всего будет сосредоточиться на AC Level 2 в городах и DC Fast Charging на межгородских маршрутах.



а) КПД ЗУ по уровням мощности; б) компромисс «стоимость – скорость» по уровням ЗУ; в) влияние климатических условий РК на FTCSR зарядного оборудования; г) профили нагрузки при трёх сценариях управления зарядкой

Рисунок 4 – Прогнозируемый экономический эффект технологий адаптивной зарядки к 2030 г

В Казахстане основная проблема с электромобилями, малое количество зарядных точек вне крупных городов и их отсутствие на трассах. Из-за этого многие автомобилисты не могут себе позволить путешествовать на электромобиле между городами. К тому же износ основного оборудования к началу 2024 года на электростанциях достиг почти 57 %. А по прогнозам к 2031 году нам может не хватать до 4,8 ГВт [15].

Надежность зарядного оборудования может зависеть от разных факторов, включая и роль климата. Отчет ChargeHelp! (2025) охватывает 100 000 зарядных сессий на 2 400 станциях, что позволило выявить несколько важных закономерностей.

Рисунок 5 – совокупный парк с 2020 по 2030 год: факт по данным Бюро национальной статистики РК и АКАБ, плюс три сценария прогноза – базовый (50 тыс. к 2030), оптимистичный (70 тыс.) и консервативный (32 тыс.)

Между заявленным временем и тем, как это ощущают пользователи, есть существенная разница. Поставщики зарядных сетей обычно указывают uptime на уровне 95–99 %, но на практике по показателю безотказности FTCSR (ГОСТ 27.002-2015) первая успешная зарядка на новом оборудовании происходит примерно в 85 % для DC и 91 % в случае для зарядки AC Level 2. К четвертому году эксплуатации эти показатели падают примерно до 65 % для DC и 80 % для зарядки AC. Это означает, что за первые четыре года зарядные станции DC теряют около четверти своей надёжности.

Одним из ключевых факторов быстрого износа, является воздействие на зарядку экстремальных температур. Что является для Казахстана особенно важным. Рассмотрев показатели, мы видим, что при морозах от −30 °C до −40 °C (такая погода чаще всего бывает в северных и центральных частях, но последнее время, наблюдается и в западных частях страны), надежность быстрой зарядки падает до 64 %, а сверхбыстрой зарядки до 58 %. То есть она работает хуже, чем

на 27 % по сравнению с нормальной температурой (рис. 4 в). Это происходит из-за того, что в холод аккумуляторы работают хуже, охлаждающие жидкости в силовых модулях густеют, а в металлических контактах появляются напряжения из-за температурных изменений. Жара тоже создаёт похожую проблему: когда температура поднимается до плюс 40-45 градусов, системы воздушного охлаждения на таких станциях работают на пределе. Тогда им приходится снижать мощность зарядки, чтобы всё не перегрелось.

Можно сказать, около 55 % всех отказов зарядных сессий обусловлено сбоями в коммуникационном стеке между автомобилем и станцией, а не неисправностями силового оборудования. Это свидетельствует о том, что повышение надёжности зарядной инфраструктуры в значительной мере является задачей программной инженерии и стандартизации протоколов (ISO 15118, OCPP 2.0.1), а не только задачей аппаратного совершенствования. Интеллектуальное управление зарядкой и интеграция с электрической сетью.

Чаще всего неуправляемая зарядка электромобилей формирует резко выраженный вечерний пик спроса, обычно это время с 18:00 по 22:00, который как раз совпадает с бытовым максимумом потребления, который свою очередь превышает базовую нагрузку в 2,5–3,1 раза ночное время (рис. 4 г). О чем свидетиствует моделирования нагрузочных профилей. Если внедрить алгоритмы Smart Charging, которые перераспределяют сеансы зарядки на ночные часы, то с этими минимальными тарифами и малой нагрузкой, неуправляемый режим сократит пиковую нагрузку на 20–40 %.

Стоит отметить, технология Vehicle-to-Grid (V2G) станет дополнением системы Smart Charging, что обеспечит качественно иной эффект. Если использовать двустороннюю зарядку, то пиковый индекс зарядного устройства, снизится до 41 % по сравнению с обычным режимом. Когда в часы пика электромобили с заряженными аккумуляторами возвращают энергию в сеть, то механизмы активно начинают работать, при этом выступая распределёнными накопителями. Стоить отметить, что и с экономической точки зрения, к 2030 году экономия для владельца электромобиля от участия в программах V2G, может составить от 310 до 2780 евро в год, конечно в зависимости от тарифной модели и режима использования (рис. 4).

Если говорить в контексте прогнозируемого дефицита генерирующих мощностей, то особую ценность в реализации концепции Smart Charging предоставляет особую ценность для условий Республики Казахстан. При этом даже без полноценного использования V2G, управляемая зарядка, объединяющая нагрузку 8 000 зарядных станций мощностью около 120 МВт, может обеспечить значимый ресурс. К 2031 году дефицит может достичь 4,8 ГВт.

Если сопоставить прогнозные показатели перспективных технологий (рис. 4), то выявляется что каждая ихних влияет на экономический эффект для владельца, ну и конечно на снижение деградации аккумуляторной батареи.

Для сокращения деградации аккумулятора используют технологии беспроводной передачи мощности. Еще ее используют для исключения

механических циклов подключения/отключения разъёма. Она также используется для поддержания аккумулятора в оптимальном диапазоне, без участия пользователя. Для городской эксплуатации в Казахстане, представляет стандарт SAE J2954 мощность до 22 кВт при КПД 90–93 %.

Следует отметить, что одно из условий для Казахстана сохранять работоспособность при минус 40 градусов, без значительной потери емкости. Высокая мощность при малом времени зарядки, меньше воздействует на систему, с чем и справляются мегаваттные зарядки. Твердотельные аккумуляторы обеспечивают снижение деградации, заменяя жидкий электролит твёрдым. Исключая механизм литиевого плакирования анода.

Анализ по региональному аспекту в условиях Республики Казахстан представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица приоритетов технологий ЗУ для условий Республики Казахстан

Технология	Актуальность для РК	Ключевой барьер	Горизонт внедрения
AC Level 2 (Smart Charging)	Высокая	Запрет в жилых зданиях	2025–2027
DC Fast Charging (трассовая)	Критическая	Отсутствие на 90% маршрутов	2025–2028
Климатически адаптированное DCFC	Критическая	Отсутствие стандарта для –40°C	2026–2029
V2G / Smart Grid	Средняя	Нормативный вакуум, износ сети	2028–2032
WPT (беспроводная)	Средняя	Высокая стоимость инфраструктуры	2029–2033
SSB-аккумуляторы	Высокая (при доступности)	Стоимость и локализация	2027–2030
MCS (грузовой транспорт)	Высокая (флоты)	Мощность присоединения	2028–2032

Собрав все факторы устанавливаем прямую связь между надёжностью зарядной инфраструктуры и «зарядной тревожности». Установлено, каждый третий сеанс быстрой зарядки завершается неудачей, поведенческое нежелание потребителей переходить на электромобили конечно же связанно с низким качеством инфраструктуры. Так повышение до уровня ≥ 90 % на всех типах оборудования, представляет собой первоочередную инженерную задачу, требующую одновременного совершенствования аппаратных решений, программного стека и регуляторной базы.

Выводы

Проведенное исследование выявило, что различия между региональными стандартами делают обязательным использования связи Автомобиль-Станция и Станция-Сервер в качестве единственной основы обмена между зарядным станциями и автомобилями. По показателю безотказности FTCSR (ГОСТ 27.002-2015) если через года работы быстрых зарядок только 65 % из них исправны, стоит требовать, чтобы прописали законодательно закрепления норматива FTCSR не ниже 90 %. Применение интеллектуального управления нагрузкой и технология V2G обеспечит снижение потребления на 20–40 %. В связи с этим внедрение

пилотного проекта по агрегации будет актуальным в городе Алматы. Климат и территориальные особенности Казахстана диктуют свои условия, температура скачет от сорокаградусного мороза до летнего пекла, а между городами 300–600 километров степи. Чтобы электромобиль мог реально доехать из одной точки в другую точку, зарядные устройства должны стоять максимум через каждые 150 километров, и обязательным резервным электропитанием.

Для того чтобы прийти к устойчивой зарядной инфраструктуре должен быть комплексный подход внедрения требований нормирования надёжности, интеллектуального управления и технологий V2G. Эти решения приведут к снижению углеродных выбросов транспортного сектора и устранения дефицита регулировочных мощностей Казахстана к 2031 году.

В тексте использовались инструменты искусственного интеллекта для языковой обработки и редактирования (перефразирование и перевод).

Список использованных источников

1 International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2025. – Paris : IEA, 2025. – 286 p.

2 International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2024 : Moving towards increased affordability. – Paris: IEA, 2024. – 224 p.

3 International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2023 : Catching up with climate ambitions. – Paris: IEA, 2023. – 228 p.

4 ChargeHelp! EV Charging Reliability Report 2025: анализ более 100000-зарядных сессий на 2 400 станциях. – Los Angeles: ChargeHelp! 2025. – 42 p.

5 **Su R., Cui H., Zhang J., Peng X., Kang Z.** Global electric vehicle charging infrastructure market monitor (2024). – Washington, DC : International Council on Clean Transportation (ICCT), 2025. – 24 p.

6 Roland Berger GmbH. EV Charging Index 2025 : Steady progress amid uncertainty. – Munich: Roland Berger, 2025. – 68 p.

7 SAE International. SAE J1772: Electric Vehicle and Plug-In Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. – Warrendale, PA : SAE International, 2023. – 72 p.

8 ISO 15118-20:2022. Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements. – Geneva: ISO, 2022. – 198 p.

9 SAE International. SAE J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology. – Warrendale, PA : SAE International, 2022. – 58 p.

10 IMARC Group. Electric Vehicle Charging Station Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2025–2033. – Dubai : IMARC Group, 2024. – 143 p.

11 **Ержанова А.** Электромобили в Казахстане – текущее положение и перспективы // Kazakhstan Law Review. – 2024. – [Электронный ресурс]. – https://kazlawreview.kz/elektromobili-v-kazahstane-tekushhee-polozhenie-i-perspek tivy

12 Правительство Республики Казахстан. Концепция развития производства и использования электромобилей в Республике Казахстан до 2030 года: утверждена постановлением Правительства РК. – Астана, 2022.

13 Finprom.kz. Электромобили – глобальный тренд, актуальный и в Казахстане. Ключевую роль в развитии «зелёного» автопарка играет инфраструктура зарядных станций. – 2024.

14 Ассоциация казахстанского автобизнеса (АКАБ). Рынок электромобилей: тенденции и динамика. – Алматы: АКАБ, 2025. – [Электронный ресурс]. – https://akab.kz/rynok-elektromobilej-tendenczii-i-dinamika.

15 Министерство энергетики Республики Казахстан. Национальный проект «Модернизация энергетического и коммунального секторов» 2025–2029. – Астана: Минэнерго РК, 2024.

REFERENCES

1 International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2025. – Paris : IEA, 2025. – 286 p.

2 International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2024 : Moving towards increased affordability. – Paris: IEA, 2024. – 224 p.

3 International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2023 : Catching up with climate ambitions. – Paris: IEA, 2023. – 228 p.

4 ChargeHelp! EV Charging Reliability Report 2025 : analiz bolee 100000-zaryadnykh sessiy na 2400 stantsiyakh [Analysis of more than 100,000 charging sessions across 2,400 stations]. Los Angeles: ChargeHelp!, 2025. 42 p.

5 **Su R., Cui H., Zhang J., Peng X., Kang Z.** Global electric vehicle charging infrastructure market monitor (2024). – Washington, DC : International Council on Clean Transportation (ICCT), 2025. – 24 p.

6 Roland Berger GmbH. EV Charging Index 2025 : Steady progress amid uncertainty. – Munich: Roland Berger, 2025. – 68 p.

7 SAE International. SAE J1772: Electric Vehicle and Plug-In Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. – Warrendale, PA : SAE International, 2023. – 72 p.

8 ISO 15118-20:2022. Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements. – Geneva: ISO, 2022. – 198 p.

9 SAE International. SAE J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology. – Warrendale, PA : SAE International, 2022. – 58 p.

10 IMARC Group. Electric Vehicle Charging Station Market : Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2025–2033. – Dubai: IMARC Group, 2024. – 143 p.

11 **Erzhanova A.** Elektromobili v Kazakhstane – tekushchee polozhenie i perspektivy [Electric vehicles in Kazakhstan: current status and prospects]. Kazakhstan Law Review. – 2024. – [Electronic resource]. – https://kazlawreview.kz/elektromobili-v-kazahstane-tekushhee-polozhenie-i-perspektivy

12 Pravitelstvo Respubliki Kazakhstan. Kontseptsiya razvitiya proizvodstva i ispolzovaniya elektromobiley v Respublike Kazakhstan do 2030 goda [Concept for the development of production and use of electric vehicles in the Republic of Kazakhstan until 2030]. Astana, 2022.

13 Finprom.kz. Elektromobili – globalnyy trend, aktualnyy i v Kazakhstane. Klyuchevuyu rol v razvitii «zelenogo» avtoparka igraet infrastruktura zaryadnykh stantsiy [Electric vehicles are a global trend relevant in Kazakhstan. Charging infrastructure plays a key role in the development of a green vehicle fleet]. – 2024.

14 Assotsiatsiya kazakhstanskogo avtobiznesa (AKAB). Rynok elektromobiley: tendentsii i dinamika [Electric vehicle market: trends and dynamics]. Almaty : AKAB, 2025.

15 Ministerstvo energetiki Respubliki Kazakhstan. Natsionalnyy proekt «Modernizatsiya energeticheskogo i kommunalnogo sektorov» 2025–2029 [National project «Modernization of the energy and коммунал sectors» 2025–2029]. Astana : Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, 2024.

Поступило в редакцию 19.03.26.
Поступило с исправлениями 21.04.26.
Принято в печать 22.07.26.

***А. Н. Ситакова[1], С. Ж. Кабикенов[2], А. П. Ищенко[3], Г. В. Киселева[4]**
[1,2,3,4]Қарағанды техникалық университеті имени Әбілқас Сағинова,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
19.03.26 ж. баспаға түсті.
21.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.07.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЭЛЕКТР КӨЛІКТЕРІ ЖӘНЕ ЗАМАНАУИ ЗАРЯДТАУ ЖҮЙЕЛЕРІ: СЕНІМДІЛІК, БАСҚАРУ ЖӘНЕ БЕЙІМДЕЛГІШ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Мақала көлік саласының тұрақты дамуы және жаһандық энергетикалық көшу жағдайында электромобильдерді зарядтаудың заманауи жүйелеріне кешенді талдау жасауға арналған. Зарядтау жабдықтары қуат деңгейлері бойынша жіктеледі – AC Level 1, AC Level 2 және DC Fast Charging, сондай-ақ қосқыш интерфейстер мен коммуникациялық хаттамалардың халықаралық стандарттары қарастырылады. Зарядтау инфрақұрылымының сенімділігі мәселесі зерттелген: алғашқы сәтті зарядтау көрсеткіші (FTCSR) әлем бойынша орта есеппен 71 % құрайтыны және жабдықты пайдаланудың төртінші жылына қарай 15–20 пайыздық тармаққа төмендейтіні анықталған. Жүктемені интеллектуалды басқару (Smart Charging) және электромобильдің электр желісімен екіжақты интеграциясы (Vehicle-to-Grid) технологиялары талданып, олардың тарату желілеріндегі ең жоғары жүктемені 20–40 %

төмендетуге қабілетті екені көрсетілген. Қатты күйлі аккумуляторлар, сымсыз динамикалық зарядтау және мегаваттық зарядтау жүйелері сияқты перспективалы бейімделгіш технологияларға баға берілген. Қазақстан Республикасының зарядтау инфрақұрылымына өңірлік талдау жүргізіліп, күрт континенттік климат, қалааралық қашықтықтардың үлкен болуы және базалық энергия желілерінің тозуы сияқты ерекшеліктер ескерілген. Орталық Азия өңірінде пайдалану жағдайларына зарядтау технологияларын бейімдеу бойынша практикалық ұсынымдар ұсынылған.

Кілтті сөздер: электромобиль, зарядтау құрылғысы, сенімділік, сымсыз зарядтау, аккумуляторлар, инфрақұрылым.

A. N. Sitakova[1], S. Zh. Kabikenov[2], A. P. Ishchenko[3], G. V. Kiseleva[4]
[1,2,3,4]Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 19.03.26.
Received in revised form 21.04.26.
Accepted for publication 22.07.26.

ELECTRIC VEHICLES AND MODERN CHARGING SYSTEMS: RELIABILITY, CONTROL AND ADAPTIVE TECHNOLOGIES

The article is devoted to a comprehensive analysis of modern electric vehicle charging systems in the context of the global energy transition and sustainable development of the transport sector. The classification of charging equipment by three power levels–AC Level 1, AC Level 2, and DC Fast Charging–is considered, along with international standards for connector interfaces and communication protocols. The reliability of charging infrastructure is examined: it has been established that the first-time charging success rate (FTCSR) averages 71 % globally and decreases by 15–20 percentage points by the fourth year of equipment operation. Technologies of smart load management (Smart Charging) and bidirectional integration of electric vehicles with the power grid (Vehicle-to-Grid) are analyzed, demonstrating their ability to reduce peak loads on distribution networks by 20–40 %. Prospective, adaptive technologies, including solid-state batteries, wireless dynamic charging, and megawatt charging systems, are evaluated. A regional analysis of the charging infrastructure of the Republic of Kazakhstan is conducted, taking into account specific barriers such as a sharply continental climate, long intercity distances, and high wear of the base power grid. Practical recommendations are formulated for adapting charging technologies to operating conditions in the Central Asian region, considering future infrastructure development.

Keywords: electric vehicle, charging system, reliability, wireless charging, batteries, infrastructure.

FTAMP 73.01.75
https://doi.org/10.48081/NiTK3.2026/619-632

К. С. Чакеева[1], *А. Е. Қалқабаева[2], А. К. Қажмұратова[3], С. Болатқызы[4], Ж. М. Тымбаева[5]
[1,2,4,5]Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1473-0744
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3627-7522
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2119-4831
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3725-6627
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7705-9874
*e-mail: D@stud.satbayev.university

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ КӨЛІК-ЛОГИСТИКАЛЫҚ КОМПАНИЯЛАРЫНДА АДАМИ КАПИТАЛДЫҢ ЦИФРЛЫҚ ЖЕТІЛУІН БАҒАЛАУДЫҢ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІН БЕЙІМДЕУ

Мақалада адами капиталдың цифрлық жетілуін бағалаудың жетекші халықаралық модельдерін (Capgemini, DigComp және т.б.) Қазақстанның бизнес-ортасының ерекшеліктеріне бейімдеу үдерісі қарастырылады. Қазақстан Республикасындағы цифрландырудың жоғары деңгейі (БҰҰ рейтингісінде 24-орын) корпоративтік секторға жаңа талаптар қояды. Зерттеу отандық бизнестің жаһандық цифрландыру жағдайына табысты бейімделуіне ықпал ететін қызметкерлердің цифрлық құзыреттерін өлшеуге арналған құралдарды ұсынады.

Авторлар ғылыми әдебиеттерге сапалық талдауды және цифрлық дамудың индикаторларын цифрлық бағалауды үйлестіретін кешенді тәсілді қолданған. Зерттеуде өлшемдердің төрт негізгі кластеріне ерекше назар аударылады: цифрлық технологиялар, білім беру ресурстары, бизнес-процестер және құзыреттер.

Мақала халықаралық тәсілдерді жергілікті институционалдық орта мен мәдени контекстке бейімдеудің маңыздылығын дәлелдейді. Онда компаниялардың жалпы адами капиталын дамыту стратегиясына бағалау жүйелерін енгізу жөніндегі ұсыныстар берілген. Қазақстандық кәсіпорындардың басшылары мен кадр бөлімдерінің жеткешілері нәтижелерді қолдана отырып, қызметкерлердің инновацияға дайындығын талдауға және оқыту бағыттарын жетілдіруге мүмкіндік алады.

Кілтті сөздер: цифрлық құралдар, адами капитал, «Цифрлық Қазақстан», цифрлық жетілу моделі, цифрлық құзыреттер, цифрлық орта, цифрлық инфрақұрылым.

Кіріспе

Қазіргі жағдайда барлық салаларда, соның ішінде көлік-логистикалық компаниялардың қызметінде бизнес-процестерді цифрландыру олардың бәсекеге қабілеттілігінің негізгі шарты болып табылады.

Қазақстан ғаламдық цифрландырудың трансформациялық процестерінен тыс қалмай отыр, 2017 жылы «Цифрлық Қазақстан» Мемлекеттік бағдарламасын қабылдады, оның мақсаты цифрлық технологиялар арқылы азаматтардың өмір сүру сапасын жақсарту, еңбек өнімділігін арттыру болып табылады [1].

Адами капиталдың цифрлық жетілуі осы цифрлық трансформация үрдістерін тиімді жүзеге асыруға әсер ететін негізгі фактор болып табылады.

Цифрлық жетілу деп жеке тұлғаның, компанияның кәсіби қызметте, әлеуметтік коммуникацияда және білімін жоғарылатуда цифрлық технологияларды тиімді падйалануға дайындығының болуын айтады [2].

G.S.Becker классикалық тұжырымдамасына сәйкес адами капитал – бұл жоғары сапалы қызметті жүзеге асыруға мүмкіндік беретін дағдылардың, білімдердің, мотивация және басқа да сипаттамалардың жиынтығы. Цифландыру аясында адами капитал цифрлық құзіреттерді, цифрлық сауаттылықты, икемділікті және үздіксіз білім арттыруға қабілеттілікті қамтып, жаңа мәнге ие болады [3].

Цифрлық трансформация тек цифрлық технологияларды енгізіп қана қоймай, сонымен бірге қызметкерлердің құзіреттерін, мінез- құлқын және мәдениетінің өзгеруін талап етеді.

Ғылыми зерттеулерде адами капиталдың цифрлық жетілгендігін бағалаудың әртүрлі модельдері кездеседі. Модельдердің қолдану аясына қарай түрлі мақсаттарға арналған. Сондықтанда қазақстандық компаниялар үшін адами капиталдың цифрлық бастамаларын тиімді іске асыру үшін өз модельдерін әзірлеуі қажет. Осы мақсатта алдымен адами капиталының цифрлық жетілуіне әсер ететін негізгі факторларды анықтау қажет.

Адами капиталдың цифрлық жетілуне әсер ететін негізгі факторларды анықтау мақсатында Қазақстандағы көлік және өндіріс компанияларының жоғары деңгейлі менеджерлері мен бөлім басшылары арасында сұхбаттасу жүргізілді. Зерттеуге бизнес сегменттеріндегі ірі, орта және шағын кәсіпорындардың әртүрлі деңгейдегі шамамен 72 жетекші басшылары қатысты.

Зерттеу құралы ретінде компания туралы жалпы ақпарат, цифрландырудың деңгейі мен даму болашағы, цифрлық технологиялардың бизнес-процестерге әсері және қызметкерлердің цифрлық құзіреттілік деңгейін сипаттайтын мәлімет алуға бағытталған сұрақтар жиынтығы қолданылды. Жартылай құрылымданған сұхбаттасу нәтижесінде алынған мәліметтер SPSS бағдарламасы арқылы өңделді. Нәтижесінде негізгі факторлар анықталып, корреляциялық талдау жасалды.

Материал мен әдістері

Ғылыми зерттеулерде цифрлық жетілуді модельдеудің бірнеше тәсілдері қалыптасқан. Ең танымал және негізгі объектісі ретінде адами капиталды қарастыратын модельдерге төмендегілерді жатқызуға болады:

Capgemini моделі цифрлық жетілудің бес деңгейін қамтиды және стратегиялық көру, мәдениет, IT-инфрақұрылым және қызметкерлердің құзіреті сияқты параметрлерді бағалауға бағытталған [4].

«Digital Competence Framework» (DigComp) Еуропалық комиссия моделі адами капиталдың цифрлық дағдыларын бес негізгі критерейлер бойынша қарастырады: цифрлық сауаттылық, коммуникация, контент қалыптастыру, қауіпсіздік және мәселені шешу [5].

BCG Digital Acceleration Index цифрлық тұрғыдан жетілген бионикалық компанияларды адами капиталдың технологиялар арқылы күшеюін 3 деңгей арқылы қарастырады: қол еңбек, автоматтандыру және оңтайландыру [6]. Яғни бірінші деңгейде қызметкер өзі шешім қабылдайды және үрдістерді өзі орындайды, екінші деңгейде қызметкер өзі шешім қабылдайды ал үрдістер технологиялар көмегімен, ал үшінші деңгейде шешім қабылдау мен үрдістерді жүзеге асыру цифрлық технологиялар көмегімен орындалады.

Үш модельдің негізгі сипаттамалары мен қолдану салалары, нақты мысалдары 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте – Модельдердің салыстырмалы сипаттамасы

Модель	Қолдану деңгейі	Негізгі бағыты	Ерекшеліктері	Қолдану аясы
Capgemini	Ұйымдастыру деңгейі	Цифрлық стратегия-лар мен мәдениет	Кешенділік, стратеги-ялық мәні	Самұрық-Энерго
DigComp	Жеке, көпшілік	Жеке цифрлық дағ-дылар	Икемділік, стандарттау	Nazarbayev University
BCG Digital Acceleration Index	Компания	Адами капитал потен-циалының технологи-ялар арқылы артуы	Жеке мотивация және басшылықты тарту арқылы цифрлық мәде-ниетті қалыптастыру	Air Astana
Ескерту – [7-11] әдебиеттер негізінде авторлармен құрастырылған				

Көлік-логистика саласында қызмет көрсететін «KTZ Express» АҚ-да пилоттық жобалар жүзеге асырылуда. Бұл бастамалар көлік-логистиканың тиімділігін арттырып, техникалық мониторингті жақсарту мақсатында жасанды интеллектке негізделген сараптамалық платформаларды енгізуді көздейді [12].

Зерттеулер көрсеткендей, жалпы алғанда Қазақстандағы бизнестің цифрлық жетілу деңгейі орташа күйде қалып отыр. Компаниялардың басым бөлігі өздерінің дайындық деңгейін «бастапқы» және «жетілдірілген» деңгейлер арасындағы орташа деңгей ретінде бағалайды. Көптеген компаниялар IT-инфрақұрылымды дамыту, киберқауіпсіздікті қамтамасыз ету және цифрлық сауатты, білікті кадрларды тарту мәселелерінде қиындықтарға тап болуда.

Цифрлық жетілуді қалыптастыру білім беру бастамаларын, кадрлық саясатты, корпоративтік мәдениетті дамытуды, сондай-ақ технологиялар мен цифрлық инфрақұрылымға инвестициядарды қамтитын кешенді тәсілді талап етеді. Осы саладағы жетекші бағыттар болып төмендегі іс-шаралар табылады:

– тұрақты дамудың стратегиялық басымдығы ретінде үздіксіз білім беру және қайта даярлау (lifelong learning);

– корпрортивтік білім беру және цифрлық тренажерлар қолданбалы цифрлық дағдылар қалыптастырып, қызметкерлерді жаңа технологияларға бейімдейді;

– цифрлық құзіреттерді дамытудың мемелекеттік және жергілікті жобалары.

– Цифрлық жетілудің тұрақты дамуын сәйкесінше цифрлық мәдениет пен өзгерістерді басқаруды қалыптастырмай жүзеге асыру мүмкін болмайтынын атап өту керек.

Адами капиталдың цифрлық трансформациясы барысында ұйымдар мен қоғам алдында туындайтын мәселелер келесілер:

– білім мен дағдылардың тез арада ескіруі;

– цифрлық ресурстардың біркелкі қолжетімді болмауы;

– қызметкерлер тарапынан өзгерістерге деген қарсылықтарының болуы;

– цифрлық ортада этикалық және заңнамалық тұрғыда реттеудің қажет болуы.

Шетелдік зерттеулерде технологиялардың жедел өзгеруі және қызметкерлердің дағыларына деген талаптардың жоғарылауымен сипатталатын Индустрия 4.0 жағдайында адами капиталдың факторларын зерттеу үшін жартылай құрылымданған сұхбаттасу жиі қолданылады. Бұл әдіс кәсіби дағдыларды дамытудағы үрдістердің күрделілігі мен көпжақтылығын қамтуға мүмкіндік береді. [13] зерттеуді жүргізу барысында ғылыми әдебиетке шолу, деректерді іріктеу және жүйелік талдау сияқты кезеңдерін қамтитын P.Mayring, моделі негізінде сапалық конетент-талдау қолданылды. Эмпирикалық деректерді өңдеу үшін Braun V. және Clarke V әдістемесіне негізделген тақырыптық талдау қолданылған, ол кезек кезегімен кодтау, тақырыптарды анықтау және нақтылауды жүзеге асыруды қамтиды. Сонымен бірге талдау құрылымы Dennis A. Gioia және басқалардың әдісіне негізделген, бұл бірінші реттік концептке,, яғни сұхбаттасу барысындағы кең ауқымды сұрақтарды екінші реттік тақырыптар арқылы жүйелеп, соңында агрегатталған өлшемдерді қалыптастыруды қарастырады [14]. Мұндай кешенді әдіс зерттеу шеңберінде цифрлық трансформация және ұйым мәдениетін терең зерттеуге мүмкіндік береді.

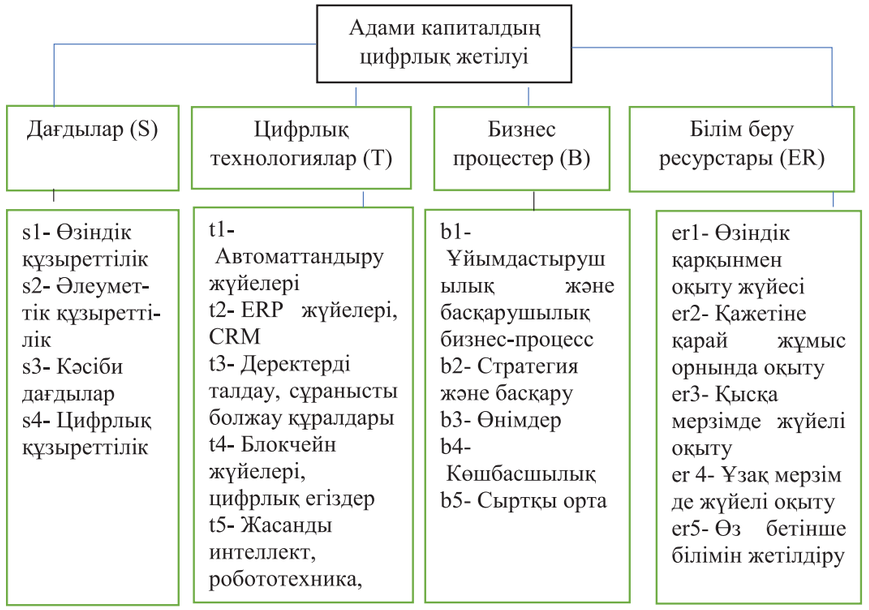
Жартылай құрылымданған сұхбаттасу алдын ала дайындалған сұрақтар қойып, респонденттердің жауаптарын еркін түрде өрбітуге жағдай жасайды [15]. Бұл тақырыпты терең зерттеп, белгілі саладағы цифрлық ұйымдық мәдениет туралы жаңа ақпарат алуға мүмкіндік береді. Galanti T. және басқалардың зерттеуінде компанияда цифрлық технологияларды енгізуге қызметкерлердың ықпалы сапалық әдістер, атап айтқанда жартылай құрылымданған эксперттік сұхбаттасу арқылы анықталды [16].

Адами капиталдың цифрлық жетілуін дамытудағы факторлардың өзара байланысын анықтау үшін факторлық талдау, гипотезаны тексеру мен деректерді өңдеу әдстерінің жиынтығы қолданылады [17].

Екі немесе бірнеше факторлардың арасындағы өзара байлансыты анықтау үшін корреляциялық талдауды қолдануға болады, ол көрсеткіштердің арасындағы байланысты, оның бағыты мен әсерін көрсетеді [18].

Адами капиталдың цифрлық жетілуін зерттеу аясында колданылатын әдістерді талдау, әдістемелік стратегия көп жағдайда сапалық және сандық әдстерді жүйелі түрде үйлестіру арқылы жүзеге асатындығын көрсетті [19].

Ғылыми әдебиеттерді зерделеу негізінде адами капиталдың цифрлық жетілу деңгейін айқындайтын негізгі өлшемдер төрт кластерге топтастырылды (1-сурет).



1-сурет – Адами капиталдың цифрлық жетілу факторларының кластерлері

Қазақстандық компаниялардың адами капиталының цифрлық жетілу деңгейін бағалау үшін бизнес-құрылымдардың бөлімше басшылары арасында жүргізілген сараптамалық сұхбаттасу әдісі қолданылды. Зерттеуге қазақстандық көлік-логистика саладағы кәсіпорындардың әртүрлі бөлімдерінен 72-ден астам басшы қатысты.

Сұхбаттасу арқылы жиналған деректерді SPSS V23 бағдарламасында орташа балл, Пирсонның x2 (хи-квадрат) критерийі және t-критерий көмегімен талдау жасалынды.

Көрсеткіштерді талдау нәтижесінде қызметкерлердің цифрлық даярлығының ағымдағы деңгейін анықталды және цифрлық құзыреттіліктің күшті және әлсіз жақтарын айқындады. Сонымен қатар, адами капиталды дамытудың орта және ұзақ мерзімді басымдықтарын қалыптастыруға, оларды кластерлерге топтауға мүмкіндік берді.

Құзыреттер кластері (S) – hard skills (кәсіби дағдылар және цифрлық құзыреттілік) және soft skills (өзіндік құзыреттілік және әлеуметтік құзыреттілік) жиынтығын қамтиды.

Цифрлық технологиялар (Т) – қызметкерлерге өз міндеттерін тиімді орындауға, деректерге негізделген шешімдер қабылдауға және тез өзгеретін жағдайларға бейімделуге мүмкіндік беретін құралдар: жасанды интеллект, үлкен деректер, бұлтты технологиялар, заттар интернеті.

Бизнес-процестер (В) – цифрлық дағдыларды дамытуға қажетті жағдайлардың болуы, яғни цифрлық ресурстарға қолжетімділік және басшылық тарапынан қолдау көрсету деңгейін сипаттайды.

Білім беру ресурстары (ER) – қызметкерлердің қажетті құзыреттерін қалыптастыру үдерісін қамтамасыз ететін материалдық, цифрлық, кадрлық және ұйымдастырушылық-әдістемелік компоненттердің жиынтығы.

Осылайша, ұсынылған факторлар адами капиталдың цифрлық жетілу деңгейін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді. Базалық, ілгері және инновациялық цифрлық құзыреттерді қамти отырып, олардың даму деңгейін де айқындайды.

Осы көрсеткіштерді қолдану қызметкерлердің цифрлық даярлығының ағымдағы деңгейін анықтауға, цифрлық құзыреттіліктің күшті және әлсіз жақтарын айқындауға, сондай-ақ адами капиталды дамытудың орта және ұзақ мерзімді басымдықтарын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде персоналдың цифрлану деңгейін ғылыми негізде диагностикалауды және ұйымның цифрлық трансформациясының стратегиялық үдерістерін қолдауды қамтамасыз ететін адами капиталдың цифрлық жетілуінің тұтас моделін қалыптастыруға жағдай жасайды.

Нәтижелер және талқылау

Эксперттік сұхбаттасу негізінде алынған мәліметтерді SPSS бағдарламасы арқылы өңдеу арқылы адами капиталдың цифрлық жетілуіне әсер ететін факторлардың өзара байланысы анықталды (2-кесте).

2-кесте – Факторлық жүктеме матрицасы

	Компонент			
	1	2	3	4
t1	0,917			-0,143
t3	0,914			
t2	0,913			-0,107
t4	0,858			-0,168
b4	0,129	0,826		-0,300
b2	0,120	0,791		-0,362
e1		0,624	0,274	
b1	0,173	0,579	-0,107	
e2	-0,256	0,498	0,246	
b3		-0,158	0,111	
e3		-0,222	0,781	
e4			0,763	
e5	-0,159			-0,224
t5		-0,120	-0,165	-0,155
s2	0,214		-0,145	-0,846
s4	0,227			-0,830
s1	0,241		0,103	-0,826

s3	0,112			-0,778
b5	-0,228		-0,273	-0,366

Факторлар өзара тығыз байланыс негізінде төмендегі 4 компонентке топтастырылған.

Компонент 1 – цифрлық технологиялар факторлары тобы: t1 (0.917), t3(0.914), t2(0.913), t4(0.858) тұрады. Көріп отырғанымыздай бұл айнымалылар өте жоғары фактролық жүктеменің болуымен сипатталады. Бұл цифрлық технологияларды енгізу, пайдалану, дамыту барысында компанияларада тұрақты оң үрдіс бар екенін көрсетеді. Осы топта басқа факторлардың болмауы цифрлық технологияларды дамыту үрдісі автономды құбылыс екенін бейнелейді.

Компонент 2 – білім беру ресурстары мен бизнес процестердің интеграцияланған тобы төмендегі элементтерден тұрады:

– b4 (0.826), b2 (0.791), b1 (0.579) бизнес-процесс факторлары;

– e1(0.624) e2(0.498) білім беру ресурстары факторлары.

Осы факторлардың бір жиынға жоғары фактролық жүкетеме негізінде шоғырлануы көшбасшылық, стратегия мен басқару, сонымен қатар ұйымдастырушылық бизнес-процестер қажеттілікке қарай мерзімді түрде жұмыс орнында оқутыды және өз қарқынымен білім алуды ұйымдастыруға бағытталғандығын көрсетеді.

Компонент 3 – білім беру ресурстарын дамыту жиыны: e3 (0.781), e4 (0.763), e5 (0.627) элементтерден тұрады. Осы жиын элементтерінің жоғарғы факторлық жүктеменің бар болуы қызметкерлердің құзіреттерін дамытуда қысқа мерзімді және жүйелі оқыту, өз бетінше білім жетілдіру жоғары мәнге ие екендігін көрсетеді. Сонымен қатар, аталған білім беру ресурстарын жүйелі түрде дамытып, қолдану керек. Тек сол кезде ғана қызметкерлердің құзіреттеліктері цифрлық жетілудің жоғарғы деңгейіне жете алады.

Компонент 4 – адами капиталдың құзыреттері жиыны. Бұл фактор адами капиталдың «қатты» (hard skills) және «жұмсақ» (soft skills) дағдыларынан тұрады: s1 (-0,826), s2 (-0,846), s3 (-0,778), s4 (-0,830) және бұл факторлардың абсолюттік мәндері жоғары. Ал бағыты теріс мәнмен сипатталады. Осы көрсетілген өзіндік, әлеуметтік, кәсіби және цифрлық дағылардың бір бірімен тығыз байланысты. Алайда, олардың қалыптасуы білім беру ресурстарымен сәйкес келмейді. Компаниялар білім беру ресурстарын ұйымдастыру және жүзеге асыру барысында заманауи қажеттіліктерді стратегиялық тұрғыдан жоспарлап, дамытып отыру қажет.

Сонымен қатар, цифрлық құралдар мен адами капиталдың құзыреттері арасында өзара байланыстың төмен болуы, компаниялардың ең алдымен технологияларға көңіл бөліп, адами капиталдың қажетті дағыдарын дамыту кейінге қалып отырғанын көрсетеді. Соның нәтижесінде қызметкерлердің дағдылары технологиялардын соңында үнемі кешігіп дамып отырады.

Жүргізілген факторлық талдау негізінде компаниялардың цифрлық даму барысында адами капиталдың дағдыларының қалыптасуына әсер ететін негізгі факторлардың төрт тобының қалыптасқанын көруге болады:

– цифрлық технологиялар тобы;

–бизнес-процестер мен білім беру ресурстарының интеграцияланған тобы;

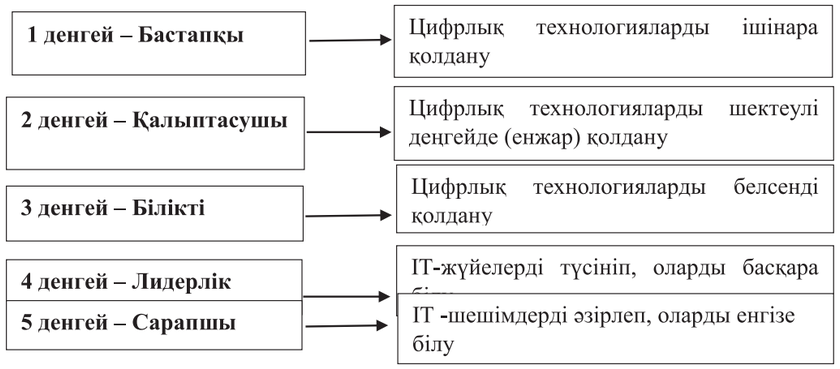
– жүйелі түрде білім ресурстары және өз бетінше білім жетілдірудің тығыз байланысы;

– адами капиталдың «қатты» және «жұмсақ» дағдыларының өзара тығыз байланысы.

Көрсетілген факторлар жиыны және олардың өзара байланысы компаниялардың цифрлық трансформация барысында адами капиталдың осы үрдістерге сәйкес болуын қамтамасыз етуде маңызды іс-шараларды жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Компаниялар үшін цифрлық трансформация тек цифрлық технологияларды енгізуді білдіретін құбылыс емес, сонымен қатар басқа да фактроларды есере отырып, компанияның барлық саласын қамтитын жүйелі түрде жүзеге асатын кешенді құбылыс болып табылады.

Қазақстанда компаниялардың цифрлық трансформация деңгейін көрсететін адами капиталдың цифрлық жетілу моделін ұсынуға болады. Бұл модель бірнеше деңгейден тұрады:



2-сурет – Адами капиталдың цифрлық жетілу моделі

Цифрлық жетілу моделін қолдану кәсіпорынның технологиялық дамуы мен ұйымдық дайындық деңгейі арасындағы сәйкессіздікті анықтауға мүмкіндік береді. IT-инфрақұрылымның дамыған жағдайында цифрлық трансформацияны тежегіш факторлары ретінде кадрлық әлеует пен инновациялық мәдениет болуы мүмкін деуге болады.

Жаһандық цифрлық трансформация жағдайында адами капиталдың цифрлық жетілу мәселелері кәсіпорындардың сәтті дамуы үшін негізгі болып табылады. Адами факторға бағыттылған цифрлық жетілу модельдері персоналдың цифрлық технологияларды енгізуге және өзгеріп отыратын бизнес орта жағдайына

бейімделуге дайындық деңгейін дәлірек бағалауға мүмкіндік береді. Халықаралық тәжірибені қолдану және оны Қазақстанның ерешеліктеріне бейімдеу цифрлық ортада адами капиталын дамытудың тиімді және кешенді тәсілдерін қалыптастыруға ықпал етеді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан № BR27198643 гранты аясында қаржыландырылды – «Ғылым, білім және өнеркәсіптің кластерлік ынтымақтастығы арқылы өнеркәсіп пен логистика саласындағы адами капиталының цифрлық құзыреттерін дамыту».

Қорытынды

Халықаралық модельдерді енгізу тек қана техникалық тұрғыдан ғана емес, мәдени ерекшеліктерді де ескеретін кешенді тәсілді қажет етеді. Бұл жағдайда корпоративтік мәдениетті дамыту маңызды рөл атқарады. Инновациялық ашықтық пен үздіксіз оқуға бағытталған орта қалыптастыру цифрлық бастамалардың нәтижелілігін арттырып, қызметкерлердің өзгерістерге бейімделуін жеңілдетеді.

Халықаралық тәжірибеде қолданылатын цифрлық жетілу модельдері (Capgemini цифрлық жетілу моделі, DigComp және BCG Digital Acceleration Index) қызметкерлердің цифрлық құзреттері мен мотивациясын, ұйымдық үдеріске қатысу деңгейінің негізгі элементтерін анықтауға мүмкіндік береді.

Аталған модельдер стратегиялық жоспарлаудың және қызметкерлердің біліктілігін арттыру, цифрлық оқыту бағдарламаларын қалыптастырудың негізіне айналып отыр.

Қазақстан жағдайында бұл модельдерді қолдану цифрлық трансформация үдерісін жеделдетуге оң әсер етеді. Себебі әлемдік озық тәжірибені жергілікті ерекшеліктер мен қажеттіліктерді ескере отырып бейімдеп енгізуге мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, адами капиталдың цифрлық жетілуі қазіргі цифрлық өзгерістер жағдайында кәсіпорындардың тұрақтылығы мен бәсекеге қабілеттілігін айқындап беретін негізгі фактор болып табылады. Талап етілетін цифрлық дағдыларға ие, өзгерістерге тез бейімделгіш, үздіксіз оқуға ұмтылатын қызметкерлер инновацияларды оңтайлы енгізудің негізін қалыптастырады. Сондықтан халықаралық тәжірибені, сонымен қатар ұлттық және салалық ерекшеліктерді ескеретін адами капиталдың цифрлық жетілу деңгейін бағалауға мүмкіндік беретін адаптивті модельдерді әзірлеу өзекті мәселе болуда.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 «Цифрлық Қазақстан» мемлекеттік бағдарламасын бекіту туралы: Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2017 жылғы 12 желтоқсандағы № 827 қаулысы [Электронды ресурс]. – https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P1700000827 – Қаралған күні: 24.01.2026.

2 **Luiz, da Silva J., Lopes, Vieira A.C., Vasconcelos, Silva S.** Digital Maturity Models: A Characterisation Study Based on a Systematic Literature Review //Brazilian

Business Review (English Edition). – 2024. – Vol. 21. – № 2. – https://doi.org/10.15728/bbr.2022.1330.en

3 **Becker, G. S.** Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education, by Gary S. Becker. – London, 1964. – Vol. 1.

4 **Westerman, G. et al.** Digital transformation: A roadmap for billion-dollar organizations //MIT Center for digital business and capgemini consulting. – 2011. – Vol. 1. – №. 1–68.

5 **Cosgrove, J. and Cachia, R.** DigComp 3.0: European Digital Competence Framework: Fifth Edition. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. – 123 p. – https://doi.org/10.2760/0001149.

6 **Michael Grebe, Michael Rüßmann, Michael Leyh, Marc Roman Franke, Wendy Anderson.** The Leaders' Path to Digital Value. – [Electronic resource]. – https://www.bcg.com/publications/2021/digital-acceleration-index. – Қаралған күні: 24.04.2025.

7 Samruk-Energy. ESG management [Электрондық ресурс]. – https://ar2022.samruk-energy.kz/en/control-esg-aspects.html. – Қаралған күні: 12.04.2025.

8 **Vuorikari, R., Kluzer, S., Punie, Y.** DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens – With New Examples of Knowledge, Skills and Attitudes. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. – JRC128415. – [Electronic resource]. – https://data.europa.eu/doi/10.2760/115376

9 **Yermekova, M., Yrymbayeva, N., Rakhimgalieva, P., & Akbidash, A.** Bridging the digital divide: Assessing future educators' competence in Kazakhstan's higher education through the DigCompEdu framework. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, – 2025. – Vol. 8. – № 1. – P. 1224–1238. – https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i1.4572.

10 **Айтқазин, Н. Н., Конурбаева, Ж. Т., Кайсанова, Н. Б., Рахимбердинова М. У.** Анализ методик оценивания цифровой зрелости компаний // Вестник Торайгыров университета. Экономическая серия. – 2026. – № 1. – С. 34–47. – https://doi.org/10.48081/BGQF1794

11 **Duisebayeva, A. M., Adilbekkyzy, A., Toktaly, G.** Artificial intelligence models for service personalization and marketing optimization: the case of air astana (JSC). Central Asian Economic Review. – Vol. 5. – № 164. – https://doi.org/10.52821/2789-4401-2025-5-212-226

12 Искусственный интеллект в КТЖ — новый уровень управления железной дорогой. [Электронды ресурс]. – https://rail-news.kz/ru/news/22073-iskusstvennyi-intellekt-v-ktz-novyi-uroven-upravleniia-zeleznoi-dorogoi.html. – Қаралған күні: 20.01.2026.

13 **Hoessler, S., Carbon, C. C.** Digital transformation in incumbent companies: a qualitative study on exploration and exploitation activities in innovation // Journal of Innovation and Entrepreneurship. – 2024. – Vol. 13. – № 1. – P. 46. – https://doi.org/10.1186/s13731-024-00404-5

14 **Gioia, D. A., Corley, K. G., & Hamilton, A. L. Gioia D. A., Corley K. G., Hamilton A. L.** Seeking qualitative rigor in inductive research: Notes on the Gioia methodology // Organizational research methods. – 2013. – Vol. 16. – №. 1. – P. 15–31. – https://doi.org/10.1177/1094428112452151

15 **Bluhm, D. J., W. Harman, T. W. Lee, and T. R. Mitchell.** «Qualitative Research in Management: A Decade of Progress». Journal of Management Studies 48, 2011. – № 8. – P. 1866–1891. – https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2010.00972

16 **Galanti, T., De Vincenzi, C., Buonomo, I., & Benevene, P.** Digital transformation: Inevitable change or sizable opportunity? The strategic role of HR management in industry 4.0 //Administrative Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 30. – https://doi.org/10.3390/admsci13020030.

17 **Kocak, S., & Pawlowski, J.** Digital organizational culture: A qualitative study on the identification and impact of the characteristics of a digital culture in the craft sector //SN Computer Science. – 2023. – Vol. 4. – № 6. – P. 819. – https://doi.org/10.1007/s42979-023-02302-1

18 Romualdas Ginevicius, Dainora Gedvilaite, Andrius Stasiukynas, Karel Suhajda. Complex expert assessment of the state of business enterprises //Acta Polytechnica Hungarica. – 2022. – Vol. 19. – № 2. – P. 135–150. – https://doi.org/10.12700/APH.19.2.2022.2.8

19 **Sappaile, B. I., Abeng, A. T., Nuridayanti, N.** Exploratory Factor Analysis as a Tool for Determining Indicators of a Research Variable: Literature Review // International Journal of Educational Narratives. – 2023. – Vol. 1. – № 6. – P. 352–361. – https://doi.org/10.55849/ijen.v1i6.387

REFERENCES

1 «Sifrlyq Qazaqstan» memlekettık bağdarlamasyn bekıtu turaly: Qazaqstan Respublikasy Ükımetınıñ 2017 jylğy 12 jeltoqsandağy № 827 qaulysy [On Approving the «Digital Kazakhstan» State Program: Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan № 827 dated December 12, 2017] [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P1700000827. – Date of access: January 24, 2026.

2 **Luiz, da Silva J., Lopes, Vieira A.C., Vasconcelos, Silva S.** Digital Maturity Models: A Characterisation Study Based on a Systematic Literature Review //Brazilian Business Review (English Edition). – 2024. – Vol. 21. – № 2. – https://doi.org/10.15728/bbr.2022.1330.en

3 **Becke,r G. S.** Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education, by Gary S. Becker. – London, 1964. – Vol. 1.

4 **Westerman, G. et al.** Digital transformation: A roadmap for billion-dollar organizations //MIT Center for digital business and capgemini consulting. – 2011. – Vol. 1. – №. 1–68.

5 **Cosgrove, J. and Cachia, R.** DigComp 3.0: European Digital Competence Framework: Fifth Edition. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. – 123 p. – https://doi.org/10.2760/0001149.

6 **Michael Grebe, Michael Rüßmann, Michael Leyh, Marc Roman Franke, Wendy Anderson.** The Leaders' Path to Digital Value. – [Electronic resource]. –

https://www.bcg.com/publications/2021/digital-acceleration-index. – Date of access: 24.04.2025.

7 Samruk-Energy. ESG management [Electronic resource]. – https://ar2022.samruk-energy.kz/en/control-esg-aspects.html. – Date of access: 12.04.2025.

8 **Vuorikari, R., Kluzer, S., Punie, Y.** DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens – With New Examples of Knowledge, Skills and Attitudes. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. – JRC128415. – [Electronic resource]. – https://data.europa.eu/doi/10.2760/115376

9 **Yermekova, M., Yrymbayeva, N., Rakhimgalieva, P., & Akbidash, A.** Bridging the digital divide: Assessing future educators' competence in Kazakhstan's higher education through the DigCompEdu framework. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, – 2025. – Vol. 8. – № 1. – P. 1224–1238. – https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i1.4572.

10 **Aitkazin, N., Konurbayeva, Zh. T., Kaisanova, N., Rakhimberdinova, M. U.** Analiz metodik osenivania sifrovoi zrelosti kompani [Analysis of methods for assessing the digital maturity of companies] // Bulletin of Toraighyrov University Economics series. – 2026. – № 1. – С. 34–47. – https://doi.org/10.48081/BGQF1794

11 **Duisebayeva, A. M., Adilbekkyzy, A., Toktaly, G.** Artificial intelligence models for service personalization and marketing optimization: the case of air astana (JSC). Central Asian Economic Review. – Vol. 5. – № 164. – https://doi.org/10.52821/2789-4401-2025-5-212-226

12 Iskusstvennyj intellekt v KTZh — novyj uroven' upravlenija zheleznoj dorogoj. [It turns out that the journal can be embedded in the ResearchGate platform.Creative intelligence in KTZ-new level management of the wind road]. [Electronic resource]. – https://rail-news.kz/ru/news/22073-iskusstvennyi-intellekt-v-ktz-novyi-uroven-upravleniia-zeleznoi-dorogoi.html. – Date of access: January 20, 2026.

13 **Hoessler S., Carbon C. C.** Digital transformation in incumbent companies: a qualitative study on exploration and exploitation activities in innovation // Journal of Innovation and Entrepreneurship. – 2024. – Vol. 13. – № 1. – P. 46. – https://doi.org/10.1186/s13731-024-00404-5

14 **Gioia, D. A., Corley, K. G., & Hamilton, A. L. Gioia D. A., Corley K. G., Hamilton A. L.** Seeking qualitative rigor in inductive research: Notes on the Gioia methodology // Organizational research methods. – 2013. – Vol. 16. – №. 1. – P. 15–31. – https://doi.org/10.1177/1094428112452151

15 **Bluhm, D. J., W. Harman, T. W. Lee, and T. R. Mitchell.** «Qualitative Research in Management: A Decade of Progress». Journal of Management Studies 48, 2011. – № 8. – P. 1866–1891. – https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2010.00972

16 **Galanti, T., De Vincenzi, C., Buonomo, I., & Benevene, P.** Digital transformation: Inevitable change or sizable opportunity? The strategic role of HR management in industry 4.0 //Administrative Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 30. – https://doi.org/10.3390/admsci13020030.

17 **Kocak, S., & Pawlowski, J.** Digital organizational culture: A qualitative study on the identification and impact of the characteristics of a digital culture in the craft sector

//SN Computer Science. – 2023. – Vol. 4. – № 6. – P. 819. – https://doi.org/10.1007/s42979-023-02302-1

18 Romualdas Ginevicius, Dainora Gedvilaite, Andrius Stasiukynas, Karel Suhajda. Complex expert assessment of the state of business enterprises //Acta Polytechnica Hungarica. – 2022. – Vol. 19. – № 2. – P. 135–150. – https://doi.org/10.12700/APH.19.2.2022.2.8

19 **Sappaile B. I., Abeng A. T., Nuridayanti N.** Exploratory Factor Analysis as a Tool for Determining Indicators of a Research Variable: Literature Review // International Journal of Educational Narratives. – 2023. – Vol. 1. – № 6. – P. 352–361. – https://doi.org/10.55849/ijen.v1i6.387

26.04.26 ж. баспаға түсті.
27.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. С. Чакеева[1], *А. Е. Калкабаева[2], А. К. Кажмуратова[3], С. Болаткызы[4], Ж. М. Тымбаева[5]
[1,2,4,5]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 26.04.26.
Поступило с исправлениями 27.04.26.
Принято в печать 20.08.26.

АДАПТАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОМПАНИЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАНА

В статье рассматривается процесс адаптации ведущих международных моделей оценки цифровой зрелости (Capgemini, DigComp и др.) к специфике казахстанской бизнес-среды. Высокий уровень цифровизации РК (24-е место в рейтинге ООН) диктует новые требования к корпоративному сектору. Исследование предлагает инструменты для измерения компетенций сотрудников, которые помогут отечественному бизнесу успешно адаптироваться к глобальной цифровизации.

Авторами применен комплексный подход, сочетающий качественный анализ научной литературы и количественную оценку индикаторов цифрового развития. Основное внимание уделено четырем кластерам измерений: цифровым технологиям, образовательным ресурсам, бизнес-процессам и компетенциям.

В работе аргументирована важность адаптации зарубежных подходов к местной институциональной среде и культурному контексту. Представлены рекомендаций по внедрению оценочных систем в общую стратегию развития человеческого капитала в компаниях. Практическая значимость исследования

заключается в возможности применения полученных выводов HR-службами и руководителями казахстанских предприятий для анализа инновационной готовности штата и совершенствования образовательных траекторий.

Ключевые слова: цифровые инструменты, человеческий капитал, «Цифровой Казахстан», модель цифровой зрелости, цифровые компетенции, цифровая среда, цифровая инфраструктура.

K. S. Chakeeva[1], *A. Y. Kalkabayeva[2], A. K. Kazhmuratova[3], S. Bolatkyzy[4], Zh. M. Tymbayeva[5]
[1,2,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 26.04.26.
Received in revised form 27.04.26.
Accepted for publication 20.08.26.

ADAPTATION OF INTERNATIONAL MODELS FOR ASSESSING THE DIGITAL MATURITY OF HUMAN CAPITAL IN TRANSPORT AND LOGISTICS COMPANIES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

The article examines the process of adapting leading international digital maturity assessment models (Capgemini, DigComp, etc.) to the specific characteristics of the Kazakhstani business environment. Kazakhstan's high level of digitalization (24th place in the UN ranking) sets new requirements for the corporate sector. The study proposes tools for measuring employee competencies that can help domestic businesses successfully adapt to global digitalization.

The authors apply a comprehensive approach that combines qualitative analysis of academic literature with quantitative assessment of digital development indicators. Particular attention is paid to four measurement clusters: digital technologies, educational resources, business processes, and competencies.

The paper substantiates the importance of adapting foreign approaches to the local institutional environment and cultural context. Recommendations are presented for integrating assessment systems into the overall human capital development strategy of companies. The practical significance of the study lies in the applicability of the findings by HR departments and Chief Digital Officers (CDOs) of Kazakhstani enterprises to assess workforce innovation readiness and improve learning and development pathways.

Keywords: digital tools, human capital, «Digital Kazakhstan», digital maturity model, digital competencies, digital environment, digital infrastructure

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Абдулина Сауле Амангельдыевна, PhD, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс-Қазақстан техникалық университеті, «Халықаралық инженерия» мектебі, Өскемен қ., 070001, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Абдулина Сауле Амангельдыевна, PhD, ассоц.профессор, специальность «Металлургия», Высшая школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Abdulina Saule Amangeldyevna, PhD Associate Professor, «Metallurgy», School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Абишев Кайратолла Кайроллинович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Қазақстан Ғылым және технологиялар институты, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.kairatolla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2001-0428

Абишев Кайратолла Кайроллинович, кандидат технических наук, профессор, ТОО «Казахстанский институт науки и технологий», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: a.kairatolla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2001-0428

Abishev Kairatolla Kairollinovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Kazakhstan Institute of Science and Technology, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.kairatolla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2001-0428

Абылкалыкова Риза Батырхановна, жаратылыстану ғылымдары және IT Жоғары мектебінің физика және технологиялар кафедрасының профессоры, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: abylkalykovar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3671-9503

Абылкалыкова Риза Батырхановна, профессор кафедры физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, кандидат физико-математических наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: abylkalykovar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3671-9503

Abylkalykova Riza Batyrkhanovna, Professor, Department of Physics and Technologies, School of IT and Natural Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: abylkalykovar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3671-9503

Айкумбеков Муслим Нурымович, Қ. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, техника ғылымының кандидаты, қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: muslim050182@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-1951-1977

Айкумбеков Муслим Нурымович, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: muslim050182@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-1951-1977

Aykumbekov Muslim, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: muslim050182@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-1951-1977

Айткалиева Гүлзат Сляшқызы, PhD, қауымд. профессор, «Химиялық және биохимиялық инженерия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050012, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

Айткалиева Гульзат Сляшевна, PhD, ассоц. профессор кафедры «Химическая и биохимическая инженерия», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

Aitkaliyeva Gulzat, PhD, Associate Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

Алмагамбетов Марал Сәрсенбайұлы, техника ғылымдарының кандидаты, «ERG Research and Development» ЖШС металлургия зертханасының бастығы, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: maral.almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0000-0003-3167-3462

Алмагамбетов Марал Сарсенбаевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории металлургии ТОО «ERG Research and Development», г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: maral.almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0000-0003-3167-3462

Almagambetov Maral Sarsenbayevich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Metallurgy Laboratory, ERG Research and Development LLP, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: maral.almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0000-0003-3167-3462

Альперен Тозлу, PhD, Байбурт университетінің электр энергетикасы кафедрасының доценті, Байбурт, 69010, Түркия, e-mail: alperentozlu@bayburt.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-2610-5279

Альперен Тозлу, доцент, доктор PhD, кафедра электротехники и энергетики Байбуртского университета, Байбурт, 69010, Турция, e-mail: alperentozlu@bayburt.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-2610-5279

Alperen Tozlu, PhD, associate professor, Department of Electricity and Energy of Bayburt University, Bayburt, 69010, Turkiye, e-mail: alperentozlu@bayburt.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-2610-5279

Амитова Айгул Амантаевна, PhD, зерттеуші, «Химиялық және биохимиялық инженерия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 050012, e-mail: aikkash@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7721-6473

Амитова Айгуль Амантаевна, PhD, исследователь кафедры «Химическая и биохимическая инженерия», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: aikkash@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7721-6473

Amitova Aigul, PhD, Researcher, Project Supervisor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aikkash@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7721-6473

Атабеков Калмамат Каримович, техника ғылымының докторы, профессор, И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек қ., 720044, Қырғыз Республикасы, e-mail: atabekov_k@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2306-2381

Атабеков Калмамат Каримович, доктор технических наук, профессор Кыргызского государственного технического университета имени И. Раззакова, г. Бишкек, 720044, Кыргызская Ресубликa, e-mail: atabekov_k@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2306-2381

Atabekov Kalmamat, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic, e-mail: atabekov_k@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2306-2381

Ахметова Эльвира Кульшановна, «PlasmaScience» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Институт материаловедения и металлургии, Өскемен қ., 070018, Қазақстан Республикасы, e-mail: elya.akhmetova.04@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-4060-1001

Ахметова Эльвира Кульшановна, младший научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», Институт материаловедения и металлургии, г. Усть-Каменогорск, 070018, Республика Казахстан, e-mail: elya.akhmetova.04@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-4060-1001

Akhmetova Elvira Kulshanovna, Junior Researcher at LLP «PlasmaScience», Ust-Kamenogorsk, 070018, Republic of Kazakhstan, e-mail: elya.akhmetova.04@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-4060-1001

Асқаров Бахтияр Шарапиденұлы, философия ғылымдарының докторы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің көлік және жол факультетінің кафедра меңгерушісі, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2621-9938

Асылбекова Роза Кемельбековна, «Көлік қызметтері» мамандығы бойынша докторант, «Көлік инженериясы және логистика» мектебі, «Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті», Алматы қ, 050013, Қазақстан Республикасы,e-mail: assylbekovaroza1985@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6126-3668

Айкумбеков Муслим Нурымович, техника ғылымдарының кандидаты, ассоц. профессор, «Көлік инженериясы және логистика» мектебі, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.aikumbekov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0007-1951-1977

Аскаров Бахтияр Шарапиденович, доктор философских наук, заведующий кафедрой, Транспортно-дорожный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2621-9938

Асылбекова Роза Кемельбековна, докторант по специальности «Транспортные услуги», Школа «Транспортная инженерия и логистика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатбаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: assylbekovaroza1985@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6126-3668

Айкумбеков Муслим Нурымович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Школа «Транспортная инженерия и логистика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатбаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: m.aikumbekov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0007-1951-1977

Askarov Bakhtiyar Sharapidenovich, Doctor of Philosophy, Head of Department, Transport and Road Faculty, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2621-9938

Asylbekova Roza Doctoral Student in «Transport services», School of Transport Engineering and Logistics, Kazakh national research technical university named after K. I. Satpayev, Almaty 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: assylbekovaroza1985@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6126-3668

Aikumbekov Muslim, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, School of «Transport Engineering and Logistics», Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbaev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.aikumbekov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0007-1951-1977

Аубакиров Алмат Муканович, PhD, аға оқытушы, Инженерия Факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almat.aubakirov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-3775-655X

Абдуллаев Сейдулла Сейдеметович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Мектеп басшысы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, М. Тынышбаев атындағы «Көлік инженериясы және логистика мектебі», Алматы қ., 050013/A15P4X4, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.abdullayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

Абекова Айдана Жумагалиевна, «Көлік инженериясы» бағыты бойынша аға оқытушы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Аубакиров Алмат Муканович, PhD, ст.преподаватель, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almat.aubakirov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-3775-655X

Абдуллаев Сейдулла Сейдеметович, доктор технических наук, профессор, руководитель школы, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, «Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева», г. Алматы, 050013/A15P4X4; Республика Казахстан, e-mail: s.abdullayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

Абекова Айдана Жумагалиевна, ст.преподаватель направления «Транспортная инженерия», университет Сатпаев, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Aubakirov Almat Mukanovich, PhD, Senior Lecturer, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almat.aubakirov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-3775-655X

Abdullayev Seidulla, Head of School, Doctor of technical sciences, Professor, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, «School of transport engineering and logistics» named after M. Tynyshpayev, Almaty, 050013/A15P4X4, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.abdullayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

Abekova Aidana Zhumagalievna, Senior lector of the deportment «Transport engeenering», Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Аскаров Бахтияр Шарапиденович, PhD, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 100027, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

Аскаров Бахтияр Шарапиденович, PhD, ассоц.профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

Askarov Bakhtiyar, PhD, Associate Professor of the Industrial Transport Departmentt, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 100027, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

Әнібекқызы Марфуға, 8D07103 «Көлік, көлік техникасы және технологиялар» мамандығы бойынша докторант, Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: marfuganibekkyzy@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6352-1298

Әнібекқызы Марфуга, докторант образовательной программе 8D07103 «Транспортная техника и организация перевозок» Казахского автомобильно-дорожного института, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: marfuganibekkyzy@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6352-1298

Anibekkyzy Marfuga, PhD student in 8D07103 «Transport, transport equipment and technologies» of the Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: marfuganibekkyzy@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6352-1298

Әскержанов Думан Аңсағанұлы, «Техникалық физика» мамандығы бойынша магистрант, «Техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасы» кафедрасы, Шәкәрім университет, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-3706-4087

Аскержанов Думан Ансаганулы, магистрант по специальности «Техническая физика», кафедра техническая физика и теплоэнергетика, Шәкәрім университет, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-3706-4087

Askerzhanov Duman Ansaganuly, Master's student in «Technical Physics», «Department of Technical Physics and Thermal Engineering», Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-3706-4087

Әлімжанов Мұрат Дуанбайұлы, техника ғылымдарының кандидаты, механика кафедрасының доценті, Механика-математика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: murat2151@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

Алимжанов Мурат Дуанбаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, Механико-математический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: murat2151@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

Alimzhanov Murat, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: murat2151@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6951-2333

Байгунусов Айдос Жомартханович, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Байгунусов Айдос Жомартханович, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Baigunussov Aidos Zhomarthanovich, Doctoral Student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Баймолданова Лазат Сарқытбекқызы, PhD, қауымд.профессоры, жаратылыстану ғылымдары және IT Жоғары мектебінің физика және технологиялар кафедрасы, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

Баймолданова Лазат Сарқытбекқызы, PhD, ассоц.профессор кафедры физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

Baimoldanova Lazat Sarqytbekkyzy, PhD, Associate Professor, Department of Physics and Technologies, School of IT and Natural Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

Байсанов Сайлаубай Омарұлы, Металлургиялық балқымалар зертханасының меңгерушісі, техника ғылымдарының докторы, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: splav_sailaubai2021@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

Байсанов Сайлаубай Омарович, доктор технических наук, руководитель лаборатории металлургических расплавов, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: splav_sailaubai2021@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

Baisanov Sailaubai Omarovich, Head of the Laboratory of Metallurgical Melts, Doctor of Technical Sciences, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: splav_sailaubai2021@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

Балтабекова Алмагуль Нурлыбековна, PhD, «Көлік техникасы және логистика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almagul_bn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0603-2463

Балтабекова Алмагуль Нурлыбековна, PhD, кафедра «Транспортная техника и логистика», Торайгыров университет, Павлодар қ., 140008, Республика Казахстан, e-mail: almagul_bn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0603-2463

Baltabekova Almagul Nurlybekovna, PhD, Department of «Transport Equipment and Logistics», Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almagul_bn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0603-2463

Басқанбаева Динара Жұмабайқызы, PhD, қауымд.профессоры, «Технологиялық машиналар және газтурбиналық қондырғылар» кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Басканбаева Динара Джумабаевна, PhD, ассоц.профессор кафедры «Технологические машины и газотурбинные установки», Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Baskanbayeva Dinara, PhD, Associate Professor of the Department of «Technological machines and gas turbine installations», Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Бедыч Татьяна Витальевна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті, Қостанай қ., 110007, Қазақстан Республикасы, e-mail: tbedych@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3642-8917

Бедыч Татьяна Витальевна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова, г. Костанай, 110007, Республика Казахстан, e-mail: tbedych@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3642-8917

Bedych Tatyana Vitalievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov, Kostanay, 110007, Republic of Kazakhstan, e-mail: tbedych@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3642-8917

Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы, PhD, профессор ассистенті, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті «Машина жасау» кафедрасы, «Астық» элеваторлық қондырғылары зауыты ЖШС, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 5112431@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Бекмырза Жумаш Айтжанович, PhD, ассистент профессора кафедры машиностроения, Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, Республика Завод элеваторного оборудования «Астык», г. Костанай, 110007, Республика Казахстан, e-mail: 5112431@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Bektyrza Zhumash, PhD, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Elevator equipment plant «Astyk» LLP, Kostanay, 110007, Republic of Kazakhstan, e-mail: 5112431@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Богомолов Алексей Витальевич, техникалық ғылымдар кандидаты, профессор, «Металлургия» кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Богомолов Алексей Витальевич, кандидат технических наук, профессор, кафедра «Металлургия», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Bogomolov Alexey, Candidate of Engineering, Professor of Metallurgy department, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Болатқызы Салтанат, экономика ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.bolatkyzy@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

Болатқызы Салтанат, кандидат экономических наук, ассоц.профессор, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: s.bolatkyzy@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

Bolatkyzy Saltanat, Candidate of Economic Sciences, associate Professor, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.bolatkyzy@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3725-6627

Букаева Амина Захаровна, PhD, қауымд.профессор, Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: amina_bukaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

Букаева Амина Захаровна, PhD, ассоц.профессор, Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, г. Актау, 130000, Республика Казахстан, e-mail: amina_bukaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

Bukayeva Amina Zakharovna, PhD, Associate Professor, Caspian university of technology and engineering named after Sh. Yessenov, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: amina_bukaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

Бухнер Петр, PhD, «Көлік техникасы» кафедрасы, Прагадағы Чехия техникалық университеті, Прага қ., 11000, Чехия Республикасы, e-mail: bouchner@lss.fd.cvut.cz, https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

Бухнер Петр, PhD, кафедра «Транспортные средства», Чешский технический университет в Праге, г. Прага, 11000, Чешская Республика, e-mail: bouchner@lss.fd.cvut.cz, https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

Bouchner Petr, PhD, Professor, Department of Vehicles, Czech Technical University in Prague, Prague, 11000, Czech Republic, e-mail: bouchner@lss.fd.cvut.cz, https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

Быков Петр Олегович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Инновациялық Еуразия университеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Быков Петр Олегович, кандидат технических наук, профессор, Факультет Инженерии, Инновационный Евразийский университет, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Bykov Petr Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Innovative Eurasian University, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Байгереев Самат Ракимгалиевич, PhD, қауымд.профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы, Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Байгереев Самат Ракимгалиевич, PhD, ассоц. профессор, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Baigereyev Samat Rakimgalievich, PhD, Associate Professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Байшугулова Шырын, PhD, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: Shyryn67@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3905-157X

Байшугулова Шырын, PhD, ст.преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: Shyryn67@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3905-157X

Baishugulova Shyryn, PhD, Senior Lecturer, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: Shyryn67@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3905-157X

Бижигитова Данакыз Айтмурзаевна, техника ғылымдарының магистрі, А. Бүркітбаев атындағы энергетика және машина жасау институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: bdanakyz@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-8164-6775

Бижигитова Данакыз Айтмурзаевна, магистр технических наук, Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: bdanakyz@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-8164-6775

Bizhigitova Danakyz Aitmurzayevna, Master of Technical Sciences, A. Burkitbayev Institute of Energy and Mechanical Engineering, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: bdanakyz@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-8164-6775

Бузауова Тоты Мейрбековна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, «Тау-кен машиналары» мамандығы, Машина жасау факультеті, Машина жасау және машина тану мамандығы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Бузауова Тоты Мейрбековна, кандидат технических наук по специальности «Горные машины», ассоц.профессор по специальности «Машиностроение и машиноведение», Машиностроительный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Buzauova Toty, Candidate of Technical Sciences in «Mining Machinery», Associate Professor in «Mechanical Engineering and Machine Science», Faculty of Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Балабаев Оюм Темиргалиевич, техника ғылымдарының кандидаты, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: balabaev.ot@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

Балабаев Оюм Темиргалиевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: balabaev.ot@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

Balabayev Oyum, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Industrial Transport Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 100027, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: balabaev.ot@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

Бобеев Абай Баханұлы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: bobeevabai@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-3378-2949

Бобеев Абай Баханович, кандидат технических наук, доцент, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: bobeevabai@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-3378-2949

Bobeev Abay Bakhanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: bobeevabai@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-3378-2949

Бейбіт Шұғыла Ғалымжанқызы, «Стандарттау және сертификаттау» мамандығы бойынша магистрант, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: beibutovva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7020-9190

Бейбит Шугыла Галымжановна, магистрант по специальности «Стандартизация и сертификация», Машиностроительный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: beibutovva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7020-9190

Beibit Shugyla Galymzhankyzy, Master's student in «Standardization and Certification», Faculty of Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: beibutovva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7020-9190

Гурьянов Георгий Александрович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Гурьянов Георгий Александрович, кандидат техничеких наук, профессор Международной школы инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Guryanov Georgiy Alexandrovich, candidate of technical sciences, professor of the International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Ғылымханов Бекболат Талғатұлы, «Химиялық үдерістер және өнеркәсіптік экология» кафедрасының докторанты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Алматы қ., 050012, Республикасы, e-mail: bbekaa23@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5554-1061

Ғылымханов Бекболат Талғатұлы, докторант кафедры «Химические процессы и промышленная экология», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: bbekaa23@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5554-1061

Gylymkhanov Bekbolat, Doctoral student, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, Satbayev University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: bbekaa23@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5554-1061

Ғабысалық Риза, PhD, қауымд.профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

Ғабысалық Риза, PhD, ассоц. профессор, Международная школа инженерии, Восточно Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

Gabdyssalyk Riza, PhD, Associate Professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

Даулетханов Ерхат Даулетханулы, магистр, «VERITAS» артықшылық орталығының ғылыми қызметкері, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: EDauletkhanov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5632-0391

Даулетханов Ерхат Даулетханулы, магистр, научный сотрудник Центра превосходства «VERITAS», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: EDauletkhanov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5632-0391

Dauletkhanov Yerkhat Dauletkhanuly, Master of Science, Researcher, Center of Excellence «VERITAS», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: EDauletkhanov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5632-0391

Досжанов Оспан Маткаримович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: ospan.doszhanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2292-8742

Досжанов Оспан Маткаримович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Алматинский технологический университет, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: ospan.doszhanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2292-8742

Doszhanov Ospan Matkarimovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Almaty Technological University, Almaty, 050061,Republic of Kazakhstan, e-mail: ospan.doszhanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2292-8742

Дудкин Михаил Васильевич, аға ғылыми қызметкер, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Дудкин Михаил Васильевич, старший научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Dudkin Mikhail Vasilyevich, Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, «Europlus Vostok» LLP. Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Данияров Нурлан Асылханович, техника ғылымдарының докторы, ЖШС «Қазақмыс корпорациясының» персонал қызметінің корпоративтік университетінің басшысы, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: nadaniyarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4476-4569

Данияров Нурлан Асылханович, руководитель Корпоративного университета Службы персонала ТОО «Корпорация Казахмыс», доктор техн. наук, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: nadaniyarov@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-4476-4569

Daniyarov Nurlan Asylkhanovich, Head of the Corporate University of Personnel Service of Kazakhmys Corporation LLP, Doctor of Technical Sciences, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: nadaniyarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4476-4569

Елемес Дарханрайыс Елемесұлы, техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік құрылысы және урбанистика» кафедрасының меңгерушісі, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: techmashkz@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5645-1481

Елемес Дарханрайыс Елемесулы, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Транспортного строительства и урбанистики», КазАДИ имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: techmashkz@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5645-1481

Yelemes Darkhanraiys Yelemesuly, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Transport Construction and Urbanistics, L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: techmashkz@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5645-1481

Елемесов Қасым Коптілеуұлы, техника ғылымының кандидаты, профессор, Энергетика және машина жасау институтының директоры, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Елемесов Касым Коптлеуевич, кандидат технических наук, профессор, директор Института энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Yelemessov Kassym, Candidate of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Елубай Мәдениет Азаматұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Жаратылыстану ғылымдары факультетінің деканы, профессор, Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, 140008 Павлодар қ., e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

Елубай Мәдениет Азаматұлы, кандидат химических наук, Декан факультета естественных наук, профессор, Торайгыров Университет; 140008 Павлодар, e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

Yelubay Madeniet, Candidate of Chemical Sciences, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Professor, Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, 140008 Pavlodar, e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

Жәнібеков Еркебұлан Сәрсенұлы, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Инженерия жоғары мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: znybekov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-1732-0047

Жәнібеков Еркебұлан Сәрсенұлы, докторант по специальности «Металлургия», Высшая школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: znybekov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-1732-0047

Zhanibekov Yerkebulan Sarsenuly, Doctoral student in «Metallurgy», School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: znybekov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-1732-0047

Жумагалиев Ерлан Уланович, техника ғылымдарың кандидаты, қауымд.профессор, аға оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасы, Актобе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумагалиев Ерлан Уланович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, ст.преподаватель кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Zhumagaliyev Yerlan Ulanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Metallurgy and Mining, K. Zhubanov Aktobe Regional University. Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жүнісова Айгүл Қайыргелдіқызы, докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001 8842-6433

Жунусова Айгуль Каиргельдиновна, докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusova.aig@mail. ru, https://orcid.org/0000 0001-8842-6433

Zhunusova Aigul Kairgeldinovna, Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001 8842-6433

Жумагалиев Еламан Русланулы, Техника ғылымдарының магистрі, кіші ғылыми қызметкер, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, М. Тынышбаев атындағы «Көлік инженериясы және логистика мектебі», Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., 050010/A25D4X5, Қазақстан Республикасы, e-mail: yelaman.marmaray@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6234-7650

Жумагалиев Еламан Русланулы, магистр технических наук, младший научный сотрудник, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, «Школа транспортной инженерии и логистики имени М.Тынышпаева», Казахский национальный аграрный исследовательский университет, г. Алматы, 050010/A25D4X5, Республика Казахстан, e-mail: yelaman.marmaray@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6234-7650

Zhumagaliev Yelaman, Master of Technical Sciences, Junior research assistant, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, «School of transport engineering and logistics» named after M. Tynyshpayev, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, 050010/A25D4X5, Republic of Kazakhstan, e-mail: yelaman.marmaray@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6234-7650

Жантлесов Ербол Жангабулулы, аға ғылыми қызметкер, «Қазақстан инжиниринг» Research & Development орталығы» ЖШС, Астана қ., 010000, Республика Казахстан, e-mail: yerbolzh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7209-5844

Жантлесов Ербол Жангабулович, ст.научный сотрудник ТОО «Research & Development центр «Казахстан инжиниринг», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: yerbolzh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7209-5844

Zhantlesov Erbol, Senior Researcher LLP «Research & Development Center «Kazakhstan Engineering», 010000, Astana, Республика Казахстан, e-mail: yerbolzh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7209-5844

Ильясов Есжан Сейтұлы, докторант, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yeszhan.ilyassov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2375-2617

Ильясов Есжан Сейтович, докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: yeszhan.ilyassov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2375-2617

Il`yasov Eszhan Sejtyly`, Doctoral student of the Kazakh National Technical Research named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic Of Kazakhstan, e-mail: yeszhan.ilyassov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2375-2617

Исабаева Манар Амангельдиевна, химия ғылымдарының кандидаты, профессор, жаратылыстану ғылымдары факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: isabaeva.manar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8119-3865

Исабаева Манар Амангельдиевна, кандидат химических наук, профессор, факультет естествознания, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: isabaeva.manar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8119-3865

Issabayeva Manar Amangeldievna, Candidate of Chemical Sciences, professor, Faculty of Natural Sciences, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, , e-mail: isabaeva.manar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8119-3865

Исагулова Диана Аристотелькызы, PhD, қауымд.профессор (доцент), Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.isagulova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

Исагулова Диана Аристотелевна, PhD, ассоц.профессор (доцент), Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: d.isagulova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

Isagulova Diana Aristotelevna, PhD, Associate Professor (docent), Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.isagulova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

Исаметова Мадина Есдаулетқызы, қауымд. профессор, техника ғылымдарының кандидаты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.issametova@satbaeyv.university, https://orcid.org/0000-0003-4630-271X

Исаметова Мадина Есдаулетовна, ассоц. профессор, кандидат технических наук, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: m.issametova@satbaeyv.university, https://orcid.org/0000-0003-4630-271X

Isametova Madina Yesdauletovna, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Kazakh National Technical Research named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic Of Kazakhstan, e-mail: m.issametova@satbaeyv.university, https://orcid.org/0000-0003-4630-271X

Искакова Динара Алтынбековна, «Машина жасау» мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: iskakovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818

Искакова Динара Алтынбековна, докторант по специальности «Машиностроение», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: iskakovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818

Iskakova Dinara Altynbekovna, PhD student in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: iskakovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818

Ищенко Александр Петрович, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының доценті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.ishchenko@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-3935-557X

Ищенко Александр Петрович, доцент кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда 100000, Республика Казахстан, e-mail: a.ishchenko@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-3935-557X

Ishchenko Alexander Petrovich, Associate Professor of the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.ishchenko@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-3935-557X

Ибраева Айшолпан Асылханқызы, PhD, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, ғылымды дамыту бөлімінің жетекші маманы Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты АҚ, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ibraeva_aa@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-2893-9173

Ибраева Айшолпан Асылхановна, PhD, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, ведущий специалист отдела развития науки АО Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: ibraeva_aa@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-2893-9173

Ibrayeva Aisholpan Asylhankyzy, PhD student at L. N. Gumilyov Eurasian National University», leading Specialist of the Department of Science Development Kazakhstan Road Research Institute» Astana, Republic of Kazakhstan, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ibraeva_aa@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-2893-9173

Исагулов Аристотель Зейноллаулы, техника ғылымдарының докторы, «Жаңа материалдар және металлургия» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

Исагулов Аристотель Зейнуллинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Новые материалы и металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

Issagulov Aristotel, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «New Materials and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

Ковалёва Татьяна Викторовна, PhD, «Жаңа материалдар және металлургия» кафедрасының оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

Ковалёва Татьяна Викторовна, PhD, преподаватель кафедры «Новые материалы и металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

Kovalyova Tatyana, PhD, Lecturer at the Department of «New Materials and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

Қажыкенова Сәуле Шарапатқызы, техника ғылымдарының докторы, «Жоғары математика» кафедрасының меңгерушісі, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sauleshka555@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6937-1577

Кажикенова Сауле Шарапатовна, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Высшая математика», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sauleshka555@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6937-1577

Kazhikenova Saule, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of «Higher Mathematics», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sauleshka555@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6937-1577

Куанышбаев Жәкен Мыңғырбайұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: lev-49-07@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3497-2206

Куанышбаев Жакен Мынгырбаевич, доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: lev-49-07@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3497-2206

Kuanyshbayev Zhaken Myngyrbayuly, Doctor of Technical Sciences, professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: lev-49-07@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3497-2206

Капский Денис Васильевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь ұлттық техникалық университеті, г. Минск, 220050, Белоруссия, e-mail: d.kapsky@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8660-8197

Капский Денис Васильевич, доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет Минск к., 220050, Беларусь, e-mail: d.kapsky@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8660-8197

Kapskiy Denis Vasilevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, 220050, Belarus, e-mail: d.kapsky@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8660-8197

Кабашев Асхат Рахимжанович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, «Көлік инжинирингі және ақпараттық технологиялар» кафедрасы, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол интитуты БМ, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: askarkabasheb@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-7097-9292

Кабашев Асхат Рахимжанович, кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедры «Транспортный инжиниринг и информационные технологии», БМ, Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: askarkabasheb@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-7097-9292

Kabashev Askat Rakhimzhanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering and Information Technologies, L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: askarkabasheb@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-7097-9292

Кабикенов Сапар Жомартұлы, техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sapargk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7412-6026

Кабикенов Сапар Жомартович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Транспортная техника и логистические системы», «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда 100000, Республика Казахстан, e-mail: sapargk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7412-6026

Kabikenov Sapar Zhomartovich, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sapargk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7412-6026

Кабылканов Султан Кайырбекович, Д. Серікбаев атындағы Шығыс-Қазақстан техникалық университетінің 8D07202–Металлургия білім бағдарламасы бойынша 3-ші курс докторанты, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1272-2065

Кабылканов Султан Кайырбекович, докторант 3 курса по образовательной программе 8D07202-Металлургия, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, младший научный сотрудник лаборатории «ферросплавы и восстановительные процессы», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1272-2065

Kabylkanov Sultan Kaiyrbekovich, 3rd year doctoral student in the educational program 8D07202-Metallurgy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Junior Researcher at the Laboratory «Ferroalloys and reduction processes», Chemical and Metallurgical Institute named after J. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1272-2065

Каменов Алмат Айтасович, PhD, аға оқытушысы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Каменов Алмат Айтасович, PhD, старший преподаватель, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Kamenov Almat, PhD, Senior Lecturer, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Канибекова Мадина Әлқуатқызы, 8D07103 «Көлік, көлік техникасы және технологиялар» мамандығы бойынша 2 жылда оқитын докторант, Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.kanibekova1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2384-0398

Канибекова Мадина Әлқуатқызы, докторант 2 года обучения по ОП 8D07103 «Транспорт, транспортная техника и технологии», Казахский автомобильно-дорожный институт, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: m.kanibekova1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2384-0398

Kanibekova Madina Alkuatkyzy, 2nd-year doctoral student of the educational program 8D07103 «Transport, Transport Equipment and Technologies», Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.kanibekova1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2384-0398

Кардасинов Саят Мамырбаевич, техника ғылымдарының кандидаты, қау.профессор, «Көлікинжинирингіжәнеақпараттықтехнологиялар» кафедрасы, Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол интитуты БМ, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: polygrafy.m@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6506-1117

Кардасинов Саят Мамырбаевич, кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедры «Транспортный инжиниринг и информационные технологии», БМ Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: polygrafy.m@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6506-1117

Kardassinov Sayat Mamyrbayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering and Information Technologies, L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: polygrafy.m@mail.ru https://orcid.org/0009-0001-6506-1117

Касенов Асылбек Жумабекович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Касенов Асылбек Жумабекович, кандидат технических наук, профессор, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001- 9552-1439

Kassenov Assylbek Zhumabekovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, Kazakh National University of Water Management and Irrigation Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000- 0001-9552-1439

Касымова Динара Бекжановна, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinara_kassymova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

Касымова Динара Бекжановна, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан,e-mail: dinara_kassymova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

Kassymova Dinara Bekzhanovna, Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinara_kassymova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

Кенжалиев Олжас Багдаулетұлы, PhD, ғылым және халықаралық байланыстар жөніндегі проректор, Жасанды интеллект технологиялары кафедрасының аға оқытушысы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101405, Қазақстан Республикасы, e-mail: andas89@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3776-9724

Кенжалиев Олжас Багдаулетович, PhD, Проректор по науке и международным связям, Старший преподователь Кафедры Технологии искусственного интеллекта, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау 101405, Республика Казахстан, e-mail: andas89@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3776-9724

Kenzhaliyev Olzhas Bagdauletovich, PhD, Vice-Rector for Science and International Relations, Senior Lecturer of the Department of Artificial Intelligence Technologies, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101405, Republic of Kazakhstan, e-mail: andas89@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3776-9724

Киселёва Галина Владимировна, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: galkisseleva@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0003-0795-4720

Киселёва Галина Владимировна, старший преподаватель кафедры «Транспортная техника и логистические системы», «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: galkisseleva@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0003-0795-4720

Kiseleva Galina Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: galkisseleva@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0003-0795-4720

Кожахметов Ернат Абилхайырович, PhD, «VERITAS» артықшылық орталығының жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: YKozhakhmetov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6778-1898

Кожахметов Ернат Абилхайырович, PhD, Руководитель Центра превосходства «VERITAS», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: YKozhakhmetov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6778-1898

Kozhakhmetov Yernat Abilkhayyrovich, PhD, Head of the Center of Excellence «VERITAS», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: YKozhakhmetov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6778-1898

Кокин Саид Болатович, ғылым қызметкері, «Қазақстан Ғылым және технологиялар институты» ЖШС, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: saidzhara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2461-2231

Кокин Саид Болатович, научный сотрудник, ТОО «Казахстанский институт науки и технологий», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: saidzhara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2461-2231

Kokin Said Bolatovich, Research Associate, Kazakhstan Institute of Science and Technology LLP, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: saidzhara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2461-2231

Коноплин Александр Юрьевич, «Жол және құрылыс машиналары» кафедрасының меңгерушісі, техникалық ғылымдар кандидаты, Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, 125319, Ресей Федерациясы, e-mail: a.konoplin@madi.ru, https://orcid.org/0009-0004-3639-5590

Коноплин Александр Юрьевич, заведующий кафедрой «Дорожные и строительные машины», кандидат технических наук, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, 125319, Российская Федерация, e-mail: a.konoplin@madi.ru, https://orcid.org/0009-0004-3639-5590

Konoplin Aleksandr Yuryevich, Head of the Department of Road and Construction Machines, Candidate of Technical Sciences, Moscow Automobile and Road State Technical University, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: a.konoplin@madi.ru, https://orcid.org/0009-0004-3639-5590

Коц Владислав Николаевич, Инжиниринг орталығының ғылыми қызметкері, «Материалдардың беткі қабатын плазмалық өңдеу технологиялары» зертханасы, Шәкәрім университет, Семей қ., 071400, e-mail: kotsvladislav1@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5312-9719

Коц Владислав Николаевич, научный сотрудник Инжинирингового центра «Плазменные технологии поверхностной обработки материалов, Шәкәрім университет, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: kotsvladislav1@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5312-9719

Kots Vladislav Nikolaevich, Researcher, Engineering Center, Laboratory of «Plasma Technologies for Surface Treatment of Materials, Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: kotsvladislav1@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5312-9719

Куандыков Алмаз Болатович, аға оқытушы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: azeka200892@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

Куандыков Алмаз Болатович, ст. преподаватель, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: azeka200892@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

Kuandykov Almaz Bolatovich, Senior Teacher, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: azeka200892@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-6075-1603

Қадірсизова Айнұр Асанқызы, «Машиналар мен жабдықтардың сандық инженериясы» мамандығының 1-курс докторанты, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.kadirsizova@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0008-6144-4816

Кадирсизова Айнур Асановна, докторант 1-го курса по ОП «Цифровая инженерия машин и оборудования», Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, г. Алматы, e-mail: a.kadirsizova@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0008-6144-4816

Kadirsizova Ainur, Doctoral Student 1-nd cours in «Digital Engineering of Machines and Equipment», Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.kadirsizova@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0008-6144-4816

Қажмуратова Айгерім Кенесовна, экономика ғылымдар кандидаты, «Бизнес технологиялары» кафедрасының аға оқытушысы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kazhmuratova.A@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

Кажмуратова Айгерим Кенесовна, кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры «Бизнес технологий», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: Kazhmuratova.A@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

Kazhmuratova Aigerim Kenesovna, Candidate of economical sciences, Senior lecturer at the department of Business Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kazhmuratova.A@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2119-4831

Қажмұхамбетов Жолдасбек Борамбайұлы, докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: josik_79@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

Кажмухамбетов Жолдасбек Борамбаевич, докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: josik_79@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

Kazhmukhambetov Zholdasbek Borambayevich, Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: josik_79@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

Қалқабаева Айжан Ерболатовна, «Көлік қызметтері» мамандығы бойынша докторант, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтпаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 870626401335-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0002-3627-7522

Калкабаева Айжан Ерболатовна, докторант по специальности «Транспортные услуги», Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: 870626401335-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0002-3627-7522

Kalkabayeva Aizhan Yerbolatovna, Doctoral Student in «Transport services», School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 870626401335-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0002-3627-7522

Қалмаганбетов Санжар Арманұлы, PhD, «Машина жасау» кафедрасының оқытушысы, Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0001-9248-4086

Калмаганбетов Санжар Арманович, PhD, преподватель кафедры «Машиностроение», Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0001-9248-4086

Kalmaganbetov Sanzhar, PhD, Lecturer of the Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0001-9248-4086

Қасенов Болат Қоңырұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының меңгерушісі болған, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: kasenov1946@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9394-0592

Касенов Булат Кунурович, доктор химических наук, профессор, был заведующим лабораторией термохимических процессов Химико-металлургического института имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: kasenov1946@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9394-0592

Kasenov Bulat Kunurovich, Doctor of chemical sciences, Professor, was the head of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: kasenov1946@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9394-0592

Куанышбеков Ерболат Ермекұлы, техника ғылымдарының магистрі Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан, e-mail: mr.ero1986@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9172-9566

Куанышбеков Ерболат Ермекович, магистр технических наук, ведущий инженер лаборатории термохимических процессов Химико-металлургического института им. Ж.Абишева, г. Караганда, 100009, Казахстан, e-mail: mr.ero1986@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9172-9566

Kuanyshbekov Erbolat Ermekovich, Master of engineering, senior researcher of the laboratory of thermochemical processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Kazakhstan, e-mail: mr.ero1986@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9172-9566

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, философия ғылымдарының докторы, доцент м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің көлік және жол факультеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: aidana_dak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Касымжанова Айдана Доненбаевна, доктор философских наук, и.о. доцента, Транспортно-дорожный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: aidana_dak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Kasymzhanova Aidana Donenbaevna, Doctor of Philosophy, acting Associate Professor, Transport and Road Faculty, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: aidana_dak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Куанышбаев Әділжан Болатұлы, магистр, аға оқытушы, «Қаржы, логистика және ақпараттық технологиялар» факультеті, Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100019, Қазақстан Республикасы, e-mail: adiljan_2011@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9577-5279

Куанышбаев Адилжан Болатович, магистр, старший преподаватель, Факультет финансов, логистики и информационных технологий, Карагандинский университет Казпотребсоюза, г. Караганда, 100019, Республика Казахстан, e-mail: adiljan_2011@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9577-5279

Kuanyshbaev Adilzhan Bolatovich, Master, Senior Lecturer, Faculty of Finance, Logistics and Information Technology, Karaganda University of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, 100019, Republic of Kazakhstan, e-mail: adiljan_2011@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9577-5279

Қоңыртаева Қолқанат Байторекқызы, магистр, оқытушы, Қазтұтынуодағы Қарағанды университетінің қаржы, логистика және ақпараттық технологиялар факультеті, Қарағанды қ., 100019, Қазақстан Республикасы, e-mail: Diamond01_kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6179-9472

Коныртаева Колканат Байторекызы, магистр, преподаватель, Факультет финансов, логистики и информационных технологий, Карагандинский университет Казпотребсоюза, г. Караганда, 100019, Республика Казахстан, e-mail: Diamond01_kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6179-9472

Konyrtaeva Kolkanat Baytorekizi, Master, Lecturer, Faculty of Finance, Logistics and Information Technology, Karaganda University of Kazpotrebsoyuz, Karaganda, 100019, Republic of Kazakhstan, e-mail: Diamond01_kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6179-9472

Кобдикова Шамсигуль Маденietовна, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Қазақстан Республикасының Ұлттық Ғылым академиясы, Алматы қ, 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: shkobdikova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9607-2823

Кобдикова Шамсигуль Маденietовна, доктор технических наук, профессор, ВНО «Национальная академия наук, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: shkobdikova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9607-2823

Kobdikova Shamsigul, Doctor of Technical Sciences, Professor, «National Academy of Sciences under the President of the Republic of Kazakhstan», 050010, Almaty Republic of Kazakhstan, e-mail: shkobdikova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9607-2823

Кисиков Мухтар Куатович полиция майоры, ҚР ІІМ Алматы облысы ПД УАП жол және техникалық инспекциясы тобының ерекше тапсырмалар жөніндегі аға инспекторы, Қонаев қ., 040800, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kissikovm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-5287-4594

Кисиков Мухтар Куатович майор полиции, старший инспектор по особым поручениям группы дорожной и технической инспекции УАП ДП Алматинской области МВД РК, г. Конаев, 040800, Республика Казахстан, e-mail: Kissikovm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-5287-4594

Kisikov Mukhtar Police Major, Senior Inspector for special assignments of the Road and Technical Inspection group of the Administrative Division of the Almaty region of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, Konaev, 040800 Republic of Kazakhstan, e-mail: Kissikovm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-5287-4594

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович, техника ғылымдарының докторы, металлургия жөніндегі сарапшы «ERG Research and Development» ЖШС, ERG Capital Projects, г. Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: altay.recenrc@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-2394-3127

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович, доктор технических наук, Эксперт по металлургии, ТОО «ERG Research and Development», ERG Capital Projects, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: altay.recenrc@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-2394-3127

Kaliakparov Altai Gindullinovich, Metallurgy Expert, ERG Research and Development LLP, Doctor of Technical Sciences, Астана, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: altay.recenrc@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-2394-3127

Капелюшин Юрий Евгеньевич, PhD, ст. научный сотрудник, «Южно-Уральский Государственный университет (НИУ)» ФМАББЖББМ, Челябинск к., 454080, Ресей Федерациясы, https://orcid.org/0000-0002-3352-1780

Капелюшин Юрий Евгеньевич, PhD, аға ғылыми қызметкер, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский Государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, 454080, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-3352-1780

Kapelyushin Yury Evgenyevich, PhD, Senior Researcher, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-3352-1780

Касымбаев Бекбосын Мыркасымович, PhD, қауымд.профессор, «Аграрлық техника және машина жасау» кафедрасы, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., 050010/A25D4X5, Қазақстан Республикасы, e-mail: bekbossyn.kassymbayev@kaznaru.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2470-6468

Касымбаев Бекбосын Мыркасымович, PhD, ассоц.профессор, кафедра «Аграрная техника и машиностроение», Казахский Национальный Аграрный Исследовательский университет, г. Алматы, 050010/A25D4X5, Республика Казахстан, e-mail: bekbossyn.kassymbayev@kaznaru.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2470-6468

Kassymbayev Bekbossyn; PhD, Associate Professor, Department «Agricultural machinery and machine building», Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, 050010/A25D4X5, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekbossyn.kassymbayev@kaznaru.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2470-6468

Камзанов Нурбол Садыканович, PhD, «Көлік инженериясы» бағыты бойынша қауымд. профессор, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Камзанов Нурбол Садыканович, PhD, ассоц. профессор направления «Транспортная инженерия»; университет Сатпаев, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Katmzanov Nurbol Sadykanovich, PhD, Associate Professor of the deportment «Transport engeenering», Satbayev university, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Қажыбаев Қанат Сайлаубайұлы, «Қазақстан инжиниринг» Research & Development орталығы» ЖШС офисінің менеджері, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.kazhibaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-8447-6779

Кажибаев Канат Сайлаубаевич, Проект менеджер ТОО «Research & Development центр «Казахстан инжиниринг», г.Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: k.kazhibaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-8447-6779

Kazhibayev Kanat, Project Manager of LLP «Research & Development Center «Kazakhstan Engineering» Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.kazhibaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-8447-6779

Қалиев Әділбек Бекболатұлы, техника ғылымдарының кандидаты, механика кафедрасының меңгерушісі, Механика-математика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: adilbekk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

Калиев Адильбек Бекбулатович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой механики, Механико-математический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: adilbekk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

Kaliyev Adilbek, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilbekk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2166-125X

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының қауымд. профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 100027, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Касымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, ассоц.профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, город Караганда, Республика Казахстан, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4683-0202

Kassymzhanova Aidana Donenbaykyzy, PhD, Associate Professor of the Industrial Transport Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 100027, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4683-0202

Косбармаков Самат Жаксибаевич, магистр, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 100027, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

Косбармаков Самат Жаксибаевич, магистр, докторант кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

Kosbarmakov Samat, Master, Doctoral Student of the Industrial Transport Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 100027, Karaganda city, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

Келисбеков Адильбек Казбекович, PhD, «ЭЖ» кафедрасының доценті, докторы, А. С. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: akelisbekov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8857-8162

Келисбеков Адильбек Казбекович, PhD, доцент кафедры ЭС, доктор Карагандинский технический университет имени А. С. Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: akelisbekov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8857-8162

Kelisbekov Adilbek Kazbekovich, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, A. S. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: akelisbekov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8857-8162

Комбаев Куат Курганович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6929-2748

Комбаев Куат Курганович, кандидат технических наук, ассоц.профессор, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6929-2748

Kombayev Kuat, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6929-2748

Қизатов Айбар Советбекұлы, «Металлургиялық инженерия» мамандығы бойынша докторант, «Veritas» артықшылық орталығының ғылыми қызметкері, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: AKizatov@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

Қизатов Айбар Советбекұлы, докторант по специальности «Металлургическая инженерия», научный сотрудник центра превосходства «Veritas», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: AKizatov@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

Kizatov Aibar Sovetbekuly, PhD student in Metallurgical Engineering, Researcher at the Center of Excellence «Veritas», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: AKizatov@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

Лопатин Владимир Юрьевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, НИТУ МИСиС, Мәскеу қ., 119049, Ресей Федерациясы, e-mail: lopatin63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

Лопатин Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, НИТУ МИСиС, г. Москва, 119049, Российская Федерация, e-mail: lopatin63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

Lopatin Vladimir Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, NUST MISIS, Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: lopatin63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

Магазов Нуртолеу Магзумбекович, «PlasmaScience» ЖШС ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: magazovn@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9941-9199

Магазов Нуртолеу Магзумбекович, Научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, e-mail: magazovn@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9941-9199

Magazov Nurtoleu Magzumbekovich, Researcher at LLP «PlasmaScience», Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: magazovn@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9941-9199

Манарбеккызы Бақытгул, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы бойынша докторант, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: baxit.85.19@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-8492-0708

Манарбеккызы Бакытгуль, докторант по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии», КазАДИ имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: baxit.85.19@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-8492-0708

Manarbekkyzy Bakytgul, Doctoral student in «Transport, Transport Equipment and Technologies», L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: baxit.85.19@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-8492-0708

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD, «Металлургия» мамандығы, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD по специальности – «Металлургия», заведующий лабораторией «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж.Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Makhambetov Yerbolat Nysanalyuly, PhD in the specialty – «Metallurgy», Head of the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Меркібаев Ерік Серікович, PhD, Металлургиялық процестер, жылутехника және арнайы материалдар технологиясы кафедрасының аға оқытушысы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, 050012, Алматы қ., e-mail: y.merkibayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

Меркибаев Ерик Серикович, PhD, ст.преподаватель кафедры Металлургических процессов, теплотехники и технологии специальных материалов, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, e-mail: y.merkibayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

Merkibayev Yerik, PhD, Senior Lecturer of the Department of Metallurgical Processes, Heat Engineering and Technology of Special Materials, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050012 Almaty, e-mail: y.merkibayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3869-6835

Молдаханов Бекболат Аскерханович, PhD, аға ғылыми қызметкер, «Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Молдаханов Бекболат Аскерханович, PhD, ст.научный сотрудник, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Moldakhanov Bekbolat Askerkhanovich, PhD, Senior Researcher, «Europlus Vostok» LLP. Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Муктанова Назерке, «PlasmaScience» ЖШС ғылыми қызметкері, Институт материаловедения и металлургии, Өскемен қ., 070018, Қазақстан Республикасы, e-mail: muktanovan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4823-6640

Муктанова Назерке, Научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, Институт материаловедения и металлургии, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, e-mail: muktanovan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4823-6640

Muktanova Nazerke, Researcher at LLP «PlasmaScience», Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: muktanovan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4823-6640

Мурзахметова Ұлбала Асқарбекқызы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Көлік инжинирингі және ақпараттық технологиялар» кафедрасы, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол интитуты БМ, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5429-023X

Мурзахметова Ульбала Аскарбековна, кандидат технических наук, профессор кафедры «Транспортный инжиниринг и информационные технологий», Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5429-023X

Murzakhmetova Ulbala Askarbekovna, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering and Information Technologies, L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5429-023X

Мусина Жанара Керейовна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор (доцент), Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https:// orcid.org/0000-0002-2233-4947

Мусина Жанара Керейовна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент), Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https:// orcid.org/0000-0002-2233-4947

Mussina Zhanara, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https:// orcid.org/0000-0002-2233-4947

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, қауымд.профессор, «Машина жасау» кафедрасы Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, ассоц.профессор кафедры «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Mustafa Azamat PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kaakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Мухаметхан Мәди Ришатұлы, «Техникалық физика» мамандығының 4-курс студенті, «VERITAS» артықшылық орталығының технигі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: muhamethan.m@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0009-9377-3398

Мухаметхан Мәди Ришатұлы, студент 4 курса специальности «Техническая физика», техник Центра превосходства «VERITAS», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: muhamethan.m@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0009-9377-3398

Mukhametkhan Madi Rishatuly, 4th-year student majoring in Technical Physics, Technician, Center of Excellence «VERITAS», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: muhamethan.m@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0009-9377-3398

Мұқанов Руслан Батырбекұлы, қауымд. профессор, энергетика және машина жасау институты, Қазақ ұлттық техникалықзерттеу университеті, Қ. И. Сәтбаева, 050013, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Муканов Руслан Батырбекович, ассоц.профессор, Институт энергетики и машиностроения, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Mukanov Ruslan Batyrbekovich, Associate Professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Мырзагалиев Айбар Асқарұлы, металлургия магистрі, «ERG Research and Development» ЖШС бас инженері, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Aibar.Myrzagaliyev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0009-1749-5154

Мырзагалиев Айбар Аскарулы, магистр металлургии, главный инженер ТОО «ERG Research and Development», г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: Aibar.Myrzagaliyev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0009-1749-5154

Myrzagaliyev Aibar Askaruly, Master of Metallurgy, Chief Engineer, ERG Research and Development LLP, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Aibar.Myrzagaliyev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0009-1749-5154

Мухамедьяров Дукат Закирович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.mukhamedyarov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-5367-7617

Мухамедьяров Дукат Закирович, кандидат технических наук, доцент, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, d.mukhamedyarov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-5367-7617

Mukhamedyarov Dukat Zakirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, d.mukhamedyarov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-5367-7617

Маякин Ерлан Разақұлы, Машина жасау білім беру бағдарламасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Erlan_mayakin@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9222-407X

Маякин Ерлан Разакович, докторант по Образовательной программе Машиностроение, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: Erlan_mayakin@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9222-407X

Mayakin Erlan Razakuly, Doctoral Student in the Educational Program Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Erlan_mayakin@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9222-407X

Нохатов Мухтар Аралбаевич, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институтының «Көлік қызметтері» мамандығының докторанты, аға оқытушы, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: totesh_@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-1581-3979

Нохатов Мухтар Аралбаевич, докторант специальности «Транспортные услуги» Казахского автомобильно-дорожного института имени Л. Б. Гончарова, старший преподаватель, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: totesh_@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-1581-3979

Nokhatov Mukhtar, Doctoral Student in «Transportation services» at the L. B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Senior Lecturer, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: totesh_@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-1581-3979

Нұғман Ерік Зейнелұлы, PhD, қауымд.профессор, Сәтбаев университетінің «Машина жасау» кафедрасының меңгерушісі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Нұғман Ерік Зейнелұлы, PhD, ассоц.профессор, заведующий кафедрой «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Nugman Yerik, PhD, Associate Professor, Head of Department Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kaakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Нұрақова Гүлім Омартайқызы, аға оқытушы, Физика және информатика кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071410, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulim.nurakova@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-9534-8899

Нұрақова Гүлім Омартайқызы, ст.преподаватель кафедры физики и информатики, Шәкәрім университет, г. Семей, 071410, Республика Казахстан, e-mail: gulim.nurakova@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-9534-8899

Nurakova Gulim Omartaikyzy, Senior Lecturer, Department of Physics and Informatics, Shakarim University, Semey, 071410, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulim.nurakova@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-9534-8899

Onuralp Yucel, PhD, профессор, «Металлургия» мамандығы, Istambul Technical University, Стамбул қ., Турция, 34000–34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yucel, PhD, профессор, специальность «Металлургия», Istambul Technical University, г. Стамбул, Турция, 34000–34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yucel, PhD, professor, specialty «Metallurgy», Istambul Technical University, Istanbul, Turkey, 34000–34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Оразбаев Галымбек Армияұлы, магистрант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: GOrazbaev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0000-5985-0200

Оразбаев Галымбек Армиянович, магистрант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: GOrazbaev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Orazbaev Galymbek Armiyanovich, Master's Student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: GOrazbaev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Орлов Алексей Сергеевич, PhD, қауымд.профессор, Ж. Әбішев атындағы Химико-металлургиялық институты «Бор» зертханасының аға ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: wolftailer@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

Орлов Алексей Сергеевич, PhD, ассоц.профессор, ст.научный сотрудник лаборатории «Бор» Химико-металлургического института имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: wolftailer@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

Orlov Aleksey Sergeyevich, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the «Boron» Laboratory at the Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: wolftailer@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

Поветкин Виталий Васильевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: vv1940_povetkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3872-3488

Поветкин Виталий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: vv1940_povetkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3872-3488

Vitaly Povetkin Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: vv1940_povetkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3872-3488

Починок Сергей Федорович, директор, ТОО «Incom Company», 140011, г. Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: info@incomcompany.kz, https://orcid.org/0009-0002-9113-4508

Починок Сергей Федорович, директор, ТОО «Incom Company», 140011, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: info@incomcompany.kz, https://orcid.org/0009-0002-9113-4508

Pochinok Sergey Fyodorovich, Director, «Incom Company» LLP, 140011, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: info@incomcompany.kz, https://orcid.org/0009-0002-9113-4508

Рабат Ондабек Жанахметұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қазақ автомобиль-жол институтының «Көлік инжинирингі және ақпараттық технологиялар», кафедрасы, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: Rabat747@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1758-6621

Рабат Ондабек Жанахметұлы, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортный инжиниринг и информационные технологий» Казахского автомобильно – дорожного института, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: Rabat747@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1758-6621

Rabat Ondabek Zhanahmetuly, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering and Information Technologies, Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: Rabat747@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1758-6621

Расол Аймолдір, техника ғылымдарының магистрі, 3-курс PhD докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: aimoldir_0692@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-2230-7319

Расол Аймольдир, магистр технических наук, докторант PhD 3 курса, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: aimoldir_0692@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-2230-7319

Rasol Aimoldir, Master of Technical Sciences, 3rd-year PhD student, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan.e-mail: aimoldir_0692@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-2230-7319

Расол Берікбол, техника ғылымдарының магистрі, оқытушы, Қарағанды машина жасау колледжі, Қарағанды, 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: berikbolrasol8@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4160-349X

Расол Берикбол, магистр технических наук, преподаватель, Карагандинский машиностроительный колледж, Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: berikbolrasol8@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4160-349X

Rasol Berikbol, Master of Technical Sciences, Lecturer, Karaganda Machine-Building College, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: berikbolrasol8@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4160-349X

Сержан Айнур Жанболатқызы, «Жаңа материалдар және металлургия» кафедрасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: ainura.kuttymuratova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-6771-5759

Сержан Айнур Жанболатовна, докторант кафедры «Новые материалы и металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: ainura.kuttymuratova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-6771-5759

Serzhan Ainur, Doctoral Student of the Department of «New Materials and Metallurgy» of Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: ainura.kuttymuratova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-6771-5759

Ракишева Аделина Аделевна, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: adelinarakisheva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7020-5672

Ракишева Аделина Аделевна, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: adelinarakisheva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7020-5672

Rakisheva Adelina Adelevna, PhD student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: adelinarakisheva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7020-5672

Рахадилов Бауыржан Корабаевич, PhD, профессор, «PlasmaScience» ЖШС бас директоры, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: rakhadilovb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Рахадилов Бауыржан Корабаевич, PhD, профессор, генеральный директор ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, e-mail: rakhadilovb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Bauyrzhan Korabayevich Rakhadilov, PhD, Professor, General Director of LLP «PlasmaScience», Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: rakhadilovb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Рожков Александр Владимирович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., көлік және жол факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: alexktpm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9408-9461

Рожков Александр Владимирович, кандидат технических наук, и.о. доцента, Транспортно-дорожный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: alexktpm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9408-9461

Rozhkov Aleksandr Vladimirovich, PhD in Engineering, Acting Associate Professor, Transport and Road Faculty, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: alexktpm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9408-9461

Ревуцкий Александр Владимирович, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: RevutskiyAV@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3321-135X

Ревуцкий Александр Владимирович, докторант по специальности «Металлургия», Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: RevutskiyAV@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3321-135X

Revutsky Alexander Vladimirovich, Doctoral Student in «Metallurgy», International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: RevutskiyAV@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3321-135X

Сырнев Борис Владимирович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: izusan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3085-3341

Сырнев Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: izusan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3085-3341

Syrnev Boris Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: izusan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3085-3341

Сағынтаева Жеңісгул Имангалиқызы, химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты термохимиялық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., 100009 Қазақстан Республикасы e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8655-356X

Сагинтаева Женисгуль Имангалиевна, кандидат химических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории термохимических процессов Химико-металлургического института имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8655-356X

Sagintaeva Zhenisgul Imangalievna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Thermochemical Processes of Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Kazakhstan, e-mail: kai_sagintaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8655-356X

Сағынтай Мұхағали Қаратайұлы, PhD, қауымд. профессор, «Машина жасау» кафедрасы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: mukhagali.sagyntay@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7946-1568

Сағынтай Мұхағали Қаратайұлы, PhD, ассоц. профессор кафедры «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: mukhagali.sagyntay@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7946-1568

Sagintai Mukhagali, PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kaakhstan, e-mail: mukhagali.sagyntay@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7946-1568

Салина Валентина Алексеевна, техника ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, Унтак жене композиттік материалдар лабораториясы, Академик Н. А. Ватолин атындағы металлургия институты РҒА УО, Екатеринбург қ., 620016, Ресей Федерациясы, e-mail: valentina_salina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

Салина Валентина Алексеевна, кандидат технических наук, ст.научный сотрудник, Лаборатория порошковых и композиционных материалов, Институт металлургии имени академика Н. А. Ватолина УО РАН, г. Екатеринбург, 620016, Российская Федерация, e-mail: valentina_salina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

Salina Valentina Alekseevna, Candidate Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Powder and Composite Materials, Institute of Metallurgy named after Academician N. A. Vatolin UO RAS, Ekaterinburg, 620016, Russian Federation, e-mail: valentina_salina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

Сапинов Руслан Викторович, PhD, қауымд. профессор, Торайғыров университет, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Сапинов Руслан Викторович, PhD, ассоц. профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Sapinov Ruslan Viktorovich, PhD, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Сатбаева Зарина Аскарбековна, PhD, профессор, аға ғылыми қызметкер, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасы, «PlasmaScience» ЖШС Шәкәрім университет, Семей қ., 071400, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: satbaeva.z@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7161-2686

Сатбаева Зарина Аскарбековна, PhD, профессор кафедры «Техническая физика и Теплоэнергетика, Шәкәрім университет, старший научный сотрудник, ТОО «PlasmaScience», г. Семей, 071400, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: satbaeva.z@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7161-2686

Satbaeva Zarina Askarbekovna, PhD, Professor of the Department of «Technical Physics and Thermal Power Engineering», Senior Researcher, «PlasmaScience» LLP, Shakarim University, Semey, 071400, Ust- Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: satbaeva.z@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7161-2686

Ситакова Алия Нуржановна, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы бойынша магистрант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aliyushenka89@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0912-9798

Ситакова Алия Нуржановна, магистрант по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: aliyushenka89@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0912-9798

Sitakova Aliya Nurzhanovna, Master's student in the specialty "Transport, Transport Engineering and Technologies", Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aliyushenka89@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0912-9798

Советбаев Раил Аянович, PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар», Шәкәрім университет, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: rsovetbayev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-3605-515X

Советбаев Раил Аянович, PhD, «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет», г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: rsovetbayev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-3605-515X

Sovetbayev Rail Ayanovich, PhD, «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: rsovetbayev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-3605-515X

Спанов Саят Сәбитұлы, докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: spanov_82@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

Спанов Саят Сабитович, докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: spanov_82@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

Spanov Sayat Sabitovich, Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: spanov_82@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

Султангазиев Руслан Бауыржанович, PhD, қауымд.профессор, «Металлургия және жаңа материалдар» кафедрасы, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды Техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: sulrus83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

Султангазиев Руслан Бауыржанович, PhD, ассоц.профессор кафедры «Металлургия и новые материалы», Факультет металлургии и новых материалов, Карагандинский Технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: sulrus83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

Sultangaziyev Ruslan Bauyrzhanovich, PhD, Associate Professor of the Department of Metallurgy and New Materials, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: sulrus83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

Сүйіндіков Мерхат Мәдениұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: suyundikovm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1352-5821

Суюндиков Мерхат Мадениевич, кандидат технических наук, профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: suyundikovm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1352-5821

Suyundikov Merkhat Madeniyevich, Candidate of Technical Sciences, professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: suyundikovm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1352-5821

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, қауымд. профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, ассоц. профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Suleimenov Ansagan Dyusembaevich, PhD, associate professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Суюнбаев Шинполат Мансуралиевич, т.ғ.д., профессор, «Темір жолды пайдалану жұмысын басқару» кафедрасының профессоры, Ташкент мемлекеттік көлік университеті, 100167, Ташкент қ., Өзбекстан Республикасы, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Суюнбаев Шинполат Мансуралиевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой железной дороги», Ташкентский государственный транспортный университет, 100167, г. Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Suyunbaev Shinpolat, Doctor of technical sciences, Professor, professor of the department «Management of operational work of the railway», Tashkent State Transport University, 100167, Tashkent, Republic of Uzbekistan, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Сәрсембаев Дінмұхамед Жақыпұлы, Ғылым және стратегиялық даму жөніндегі проректор, техн. ғыл. кандидаты, «Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университетінің «Технологиялық машиналар және құрылыс» кафедрасының доценті, Жезқазған қ., 100600, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinmukhamed.sarsembayev@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-3548-4507

Сарсембаев Динмухамед Жакупович, Проректор по науке и стратегическому развитию, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и строительство» Жезказганского университета имени О. А. Байконурова, г. Жезказган, 100600,, Республика Казахстан, e-mail: dinmukhamed.sarsembayev@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-3548-4507

Sarsembayev Dinmukhamed Zhakupovich, Vice-Rector for Science and Strategic Development, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Construction, Zhezkazgan University named after O. A. Baikonurov, Zhezkazgan, 100600, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinmukhamed.sarsembayev@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-3548-4507

Саргулжина Айнұр Әсембекқызы, «Технологиялық машиналар және құрылыс» кафедрасының аға оқытушысы, Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті, Жезқазған қ., 100600, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0009-0009-0505-5709

Саргулжина Айнур Асембековна, старший преподаватель кафедры «Технологические машины и строительство», Жезказганский университет имени О. А. Байконурова, г. Жезказган, 100600, Республика Казахстан, https://orcid.org/0009-0009-0505-5709

Sargulzhina Ainur Assembekovna, Senior Lecturer of the Department of «Technological Machines and Construction», Zhezkazgan University named after O. A. Baikonurov, Zhezkazgan, 100600, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0009-0009-0505-5709

Тлеужанова Гульнур Болатханқызы, аға оқытушы, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: GTleuzhanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0005-0032-8924

Тлеужанова Гульнур Болатханқызы, старший преподаватель, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: GTleuzhanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0005-0032-8924

Tleuzhanova Gulnur Bolatkhankyzy, Senior Lecturer, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: GTleuzhanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0005-0032-8924

Тавбай Ханкелов, техника ғылымдарының докторы, Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Ташкент қ., 100167, Өзбекстан Республикасы, e-mail: xankelovt9@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-4653-4679

Тавбай Ханкелов, доктор технических наук, Ташкентского государственного транспортного университета, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан, e-mail: xankelovt9@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-4653-4679

Tavbay Khankelov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tashkent State Transport University, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan, e-mail: xankelovt9@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-4653-4679

Титошева Қаламқас Маратқызы, «Металлургия және жаңа материалдар» кафедрасының докторанты, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды Техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: titoshevak@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-7837-8667

Титошева Қаламқас Маратқызы, докторант кафедры «Металлургия и новые материалы», Факультет металлургии и новых материалов, Карагандинский Технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: titoshevak@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-7837-8667

Titosheva Kalamkas Maratkyzy, Doctoral student in department of Metallurgy and New Materials, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: titoshevak@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-7837-8667

Ткаченко Денис Евгеньевич, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, кафедра инженері, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.tkachenko@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-9148-3612

Ткаченко Денис Евгеньевич, Инженер кафедры, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: d.tkachenko@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-9148-3612

Tkachenko Denis Evgenievich, Engineer of the department, Kazakh National Technical Research named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic Of Kazakhstan, e-mail: d.tkachenko@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-9148-3612

Толоконникова Вера Владимировна, техника ғылымдарының кандидаты, Физикалық химия және туыстас элементтер технологиясы зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия–металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: tolokon-splav@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

Толоконникова Вера Владимировна, кандидат химических наук, Руководитель лаборатории физической химии и технологии сопутствующих элементов, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: tolokon-splav@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

Tolokonnikova Vera Vladimirovna, Candidate of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of Physical Chemistry and Technology of Related Elements, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: tolokon-splav@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

Толунбеков Нұрлан Қанатбекұлы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті докторанты, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tolunbekov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7219-4199

Толунбеков Нурлан Канатбекович, докторант Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: tolunbekov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7219-4199

Tolunbekov Nurlan Kanatbekovich, Doctoral student of the Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic Of Kazakhstan, e-mail: tolunbekov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7219-4199

Тымбаева Жазира Муратбековна, экономика ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтпаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы,

Тымбаева Жазира Муратбековна, кандидат экономических наук, ассоц. профессор, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: z.tymbayeva@satbayev.university, https://

Tymbayeva Zhazira Muratbekovna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: z.tymbayeva@satbayev.university, https://

e-mail: z.tymbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7705-9874

Тавбай Ханкелов, техника ғылымдарының докторы, Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Ташкент қ., 100167, Өзбекстан Республикасы, e-mail: xankelovt9@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-4653-4679

Тайлер Иса Азаматұлы, Ауыл шаруашылығы магистрі, инженер, «Энергетика және электротехника» кафедрасы, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., 050010/A25D4X5, Қазақстан Республикасы, e-mail: phntmfrk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2334-6088

Тогусов Амангелді Құрмангажыұлы, техника ғылымдарының кандидаты, Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігінің әскери білім және ғылым департаменті, Астана қ., 010000, Республика Казахстан, e-mail: так_70@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5810-1940

Тулиева Нурсулу Болатбеккызы, «Механика және металлөңдеу» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: nursulu.libra@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6625-9545

Тореханова Марал Төреханқызы, аға оқытушы, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: MTorehanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0004-9993-4037

Уркунбай Азамат Серикказыулы, «VERITAS» артықшылық орталығының ғылыми қызметкері, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: urkunbay@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7868-2393

satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7705-9874

Тавбай Ханкелов, доктор технических наук, Ташкентского государственного транспортного университета, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан, e-mail: xankelovt9@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-4653-4679

Тайлер Иса Азаматұлы, Магистр сельского хозяйтсва, инженер, кафедра «Энергетика и электротехника», Казахский национальный аграрный исследовательский университет, г. Алматы, 050010/A25D4X5, Республика Казахстан, e-mail: phntmfrk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2334-6088

Тогусов Амангельды Курмангажинович, кандидат технических наук, Департамент военного образования и науки Министерства обороны Республики Казахстан, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: так_70@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5810-1940

Тулиева Нурсулу Болатбеккызы, докторант по образовательной программе «Механика и металлообработка», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: nursulu.libra@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6625-9545

Тореханова Марал Төреханқызы, ст.преподаватель, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: MTorehanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0004-9993-4037

Уркунбай Азамат Серикказыулы, научный сотрудник ЦП «VERITAS», Восточно-Казахстански технически университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: urkunbay@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7868-2393

Ұлмаганбетов Нұрсұлтан Асқарұлы, металлургия магистрі, «ERG Research and Development» ЖШС бас инженері, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nursultan.ulmaganbetov@erg.kz, https://orcid.org/0000-0003-4747-9381

Улмаганбетов Нурсултан Аскарович, магистр металлургии, главный инженер ТОО «ERG Research and Development» г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: nursultan.ulmaganbetov@erg.kz, https://orcid.org/0000-0003-4747-9381

Ulmaganbetov Nursultan Askarovich, Master of Metallurgy, Chief Engineer, ERG Research and Development LLP, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nursultan.ulmaganbetov@erg.kz, https://orcid.org/0000-0003-4747-9381

Уркунбай Азамат Серікқазыұлы, Ғылыми қызметкер, «Техникалық физика» мамандығы бойынша докторант, Геология және тау-кен ісі саласындағы құзыреттер мен технологиялар трансфері орталығы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: aurkunbay@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7868-2393

Уркунбай Азамат Серикказыулы, научный сотрудник, докторант по специальности «Техническая физика», Центр компетенций и трансфера технологий в области геологии и горного дела, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: aurkunbay@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7868-2393

Urkunbay Azamat Serikazyuly, Researcher, PhD Doctoral Student in Technical Physics, Center of Competence and Technology Transfer in Geology and Mining, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: aurkunbay@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7868-2393

Фуад Хошнау, Инженерия, инфрақұрылым және тұрақтылық мектебі, Технология, өнер және мәдениет факультеті, De Montfort университеті, Лестер, LE1 9BH, Ұлыбритания, e-mail: fuad.khoshnaw@dmu.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4467-1944

Фуад Хошнау, Школа инженерии, инфраструктуры и устойчивости, Факультет технологий, искусств и культуры, Университет Де Монфор, Лестер, LE1 9BH, Великобритания, e-mail: fuad.khoshnaw@dmu.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4467-1944

Fuad Khoshnaw, School of Engineering, Infrastructure and Sustainability, Faculty of Technology, Arts and Culture, De Montfort University, Leicester, LE1 9BH, United Kingdom, e-mail: fuad.khoshnaw@dmu.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4467-1944

Ходжабеков Мураджон, профессор, Мирзо Улугбек атындағы Самарқанд мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, 140147, Өзбекстан Республикасы, e-mail: uzedu@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-3771-7091

Ходжабеков Мураджон, профессор, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени Мирзо Улугбека, Самарканд, [140147], Республика Узбекистан, e-mail: uzedu@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-3771-7091

Khodjabekov Muradjon, Professor, Samarkand State University of Architecture and Civil Engineering, Samarkand, 140147, Republic of Uzbekistan, e-mail: uzedu@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-3771-7091

Хазимов Марат Жалелович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, «Энергетика және электротехника» кафедрасы, Алматы қ., 050010/A25D4X5, Қазақстан Республикасы, e-mail: mkhazimov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5448-3122

Хазимов Марат Жалелович, кандидат технических наук, профессор, Казахский Национальный Аграрный Исследовательский университет, кафедра «Энергетика и электротехника», г. Алматы, 050010/A25D4X5, Республика Казахстан, e-mail: mkhazimov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5448-3122

Khazimov Marat, Candidate of Technical Sciences, Professor, Kazakh National Agrarian Research University, Department «Energy and Electrical Engineering», Almaty, 050010/A25D4X5, Republic of Kazakhstan, e-mail: mkhazimov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5448-3122

Чакеева Қарлығаш Сайлаубаевна, техникалық ғылымдар кандидаты, қауымд.профессор, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» бағыты, Сәтпаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.chakeyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

Чакеева Карлыгаш Сайлаубаевна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, направление «Логистика», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: k.chakeyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

Chakeeva Karlygash Saylaubayevna, Candidate of technical sciences, associate Professor, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev Logistics direction, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.chakeyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1473-0744

Чукенова Эльвира Сериковна, «Машина жасау» кафедрасының докторанты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: elvira_85-11@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4371-5989

Чукенова Эльвира Сериковна, докторант кафедры «Машиностроение» университета имени Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: elvira_85-11@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4371-5989

Chukenova Elvira, PhD student of the «Mechanical Engineering», Department at Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: elvira_85-11@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4371-5989

Шалтақов Сағындық Нағашибайұлы, PhD, «Жоғары математика» кафедрасының доцентінің м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sagyndyk613@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1178

Шалтаков Сагындык Нагашибаевич, PhD, и.о. доцента кафедры Высшая математика Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sagyndyk613@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1178

Shaltakov Sagyndyk, PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Higher Mathematics», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sagyndyk613@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1178

Шеров Айбек Карибекұлы, PhD, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шеров Айбек Карибекович, PhD, ст.преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010011, Республика Казахстан.e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Sherov Aibek Karibekovich, PhD, Senior Lecturer, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шайкемелов Әділ Амандықұлы, техника ғылымдарының магистрі, докторант, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, «Астық» элеваторлық қондырғылары зауыты ЖШС, Қостанай қ., 110007, Қазақстан Республикасы, e-mail: adil_shaikemelov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0498-8338

Шайкемелов Адиль Амандыкович, магистр технических наук, докторант Костанайского регионального университета имени Ахмет Байтурсынулы, Завод элеваторного оборудования «Астык», г. Костанай, 110007, Республика Казахстан, e-mail: adil_shaikemelov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0498-8338

Shaikemelov Adil, Master of Engineering Sciences, doctoral student of Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Elevator equipment plant «Astyk» LLP, Kostanay, 110007, Republic of Kazakhstan, e-mail: adil_shaikemelov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0498-8338

Шаяхметов Ержан Ярнарович, PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасы, Шәкәрім университет, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7986-0083

Шаяхметов Ержан Ярнарович, PhD, профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7986-0083

Shayakhmetov Yerzhan Yarnarovich, PhD, Professor of the«Department of Automation and Information Technologies», Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7986-0083

Шеров Карибек Тағайұлы, «Машинажасау» мамандығы бойынша техника ғылымдарының докторы, профессор, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Шеров Карибек Тагаевич, Доктор технических наук, профессор по специальности «Машиностроение», Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Sherov Karibek Tagayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor in Mechanical Engineering, Faculty of Technology, S.Seifullin Kazakh agrotechnical research university, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Шингисов Бейбит Туменбаевич, PhD, қауымд.профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, «Машинажасаудағы робототехника және мехатроника» кафедрасының менгерушісі, Алматы қ., 050043, Қазақстан Республикасы, e-mail: beibit_tumen@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6535-4219

Шингисов Бейбит Туменбаевич, PhD, ассоц. профессор, Заведующий кафедры «Робототехники и мехатроники в машиностроении» Казахского Национального Исследовательского Технического университета имени К. Сатбаева, г. Алматы, 050043, Республика Казахстан, e-mail: beibit_tumen@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6535-4219

Shingissov Beibit Tumenbayevich, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Robotics and Mechatronics in Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050043, Republic of Kazakhstan, e-mail: beibit_tumen@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6535-4219

Янюшкин Александр Сергеевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Машина жасау факультеті. И. Н. Ульянов атындағы Чуваш мемлекеттік университеті, Чебоксары қ., 428015, Чуваш Республикасы, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

Янюшкин Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Факультет машиностроения. Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, 428015, Чувашская Республика, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

Yanushkin Alexander Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor. Faculty of Mechanical Engineering. I. N. Ulyanov, Chuvash State University, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

Юсупова Құралай Сериковна, «Көлік инженериясы» бағыты бойынша аға оқытушы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.yusupova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6043-1708

Юсупова Куралай Сериковна, ст.преподователь направления «Транспортная инженерия», университет Сатпаев, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: k.yusupova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6043-1708

Yusupova Kuralay, Senior lector of the deportment «Transport engeenering», Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.yusupova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6043-1708

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

***Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.**

*** Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц печатного текста.** *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение,

заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. *ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество** (полностью) автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках *(жирным шрифтом, по центру)*;

4 **Ученая степень, ученое звание;**

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail;**

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность *(не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий)*;

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец)*;

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования *(оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.)*. Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке *(см. образец)*;

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение / Кіріспе / Introduction** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** *(при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** *(жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре)* включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 *(см. образец)*.

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. Объем не менее 10 не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом*.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисуночные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)
В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.
Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:
- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимостьпубликации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на почту: nitk.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайгыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.
Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).
E-mai1: **nitk.tou.edu.kz.**

Наши реквизиты:

НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование –Оплата за ВУЗы – Заполняете все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Jýsan Bank» ИИК KZ57998FTB00 00003310 БИК TSESKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

С. К. Антикеева
Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.

2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.

2 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.

4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effectivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod к ecologicheskomu obrazovaniu i vospitaniu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – T. 2 – P. 11–20.

8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKиPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov к rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300-Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева
Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзыреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзыреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзыреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзыреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзыреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva
Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers

interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайгыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

Публикационная этика научных журналов «Вестник Торайгыров университета», «Краеведение», «Наука и техника Казахстана»

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайгыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегий статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

Ответственность экспертов (рецензентов)

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

Ответственность авторов

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале.В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета

номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 09.09.26 ж. жіберілді. Басуға 30.09.26 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
5,07 Mb RAM
Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4599

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
nitk.tou.edu.kz