

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 4 (2024)

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/IYNS2338>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,342

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Омарова Айгерим Рымболатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Богомоллов 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);
Кажипбаева 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 Vouchner – 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.,
Васильева О. Ю., Абшенов Х. А.**

Рабочие органы для разрушения льда на дорогах и тротуарах
с регулировкой разрушающего воздействия

Басқанбаева Д. Ж., Елемесов Қ. К., Сабирова Л. Б., Жұмәділова А. С.

Қазақстан Республикасының тау кен индустриясында
газ сығымдаудың технологиялық процестерін оңтайландыру

**Бейсембаев К. М., Абдугалиева Г. Б., Малыбаев Н. С.,
Оразбеков Д. Е., Акижанова Ж. Т.**

Расчет взаимодействия опор механизированной
крепей с шероховатой кровлей

Берг А. С., Нуржанова О. А., Жаркевич О. М., Берг А. А.

Определение прочности мрс и кран-балки
с оптимизированной геометрией

**Буйткенов Д. Б., Сахиб М., Сулюбаева Л. Г.,
Райсов Н. С., Алибекова Б. А.**

Повышение долговечности лемехов методом электрофрикционной
обработки в условиях полевых испытаний

**Ермаханова А. М., Мейірбеков М. Н.,
Байсериков Б. М., Богуспаев Н. Б.**

ҰҒА корпус элементтері үшін композиттік материалдардың
диэлектрлік шығыны мен радиомөлдірлігін зерттеу

**Мұратжанқызы Н., Қасенов Ә. Л.,
Какимов М. М., Мурсалыкова М. Т.**

Пресс жабдығына арналған қысымды өздігінен
реттеу механизмін математикалық сипаттау

Ibraim A. S., Absadykov B. N.

Posibilities of producing electric motors using 3d printers

**Канаев А. Т., Богомоллов А. В.,
Байкожаева Б. У., Молдахметова А. Е.**

Параметры плазменного упрочнения
цельнокатаных железнодорожных колес

**Касенов А. Ж., Искакова Д. А., Янюшкин А. С.,
Ткачук А. А., Қабдымали Д. Т.**

Анализ напряженно-деформированного
состояния трубной запорной арматуры

Кожгельдиев Б. Ж., Жанкелді Ә. Ж.,

Муканов Р. Б., Каражанова Д. Д.

Расчет геометрических параметров и проектирование зубчатой пары ветроэнергетической установки с применением сапр программ

Nugman Y., Turgunov Zh., Kaiyrov R., Mustafa A., Kawalek A.

Development of a metal 3D printer using a 3-upu parallel manipulator

Smailova B. K., Buzauova T. M., Bartenev I. A.,

Sarbayev D. A., Škamat J.

Planning and experimental studies of the electroslag surfacing mode on the depth of penetration of the welded teeth

Шулятьев В. Б.

Влияние лазерной резки непрерывным и импульсным излучением на механические свойства образцов из сплава системы Al-Mg-Li

МЕТАЛЛУРГИЯ

МЕТАЛЛУРГИЯ

METALLURGY

Anvarov D. M., Akramov M. B., Mirov I. O.

Change in the properties of brass laf 94-0.5-0.15 depending on from the content of modifying components

Azamatov B. N., Varbanov P. S., Sadenova M. A.,

Borisov A. A., Maratuly B.

Features of obtaining a magnetron coating on

TI-6AL-4V alloy with various copper content

Ахметова Г. Е., Панин Е. А., Кудря А. В., Туысхан К.

Кескіндерді бинаризациялаудың заманауи әдістерін талдау және сынау

Bykov P. O., Begaliev R. A., Kuandykov A. B.,

Suyundikov M. M., Siemens E.

Investigation of the influence of technological factors in the smelting of low-alloy steel on resistance to hydrogen cracking

Zhakan A., Zhunusov A., Akhmetov A., Kabytkanov S., Yucel O.

Thermodynamic modeling of the process of smelting a complex chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy

Zhakupov A.

Application features of steel products non-destructive testing

Zhakupova A.

Device for casting hollow billets

Ибраев И. К., Ибраева О. Т., Айткенов Н. Б., Мусин Д. К.

Механизм образования внутренних и поверхностных дефектов при литье и их трансформации в дефекты поверхности листа

Kambarov Y. Y., Kussainov A. Y.,

Kowalewski P., Uazyrkhanova G. K.

Microstructure and mechanical characteristics of high entropy alloy coating of AlCrCoFeNi system obtained by detonation spraying method

Рамазанов Н. М., Саркенов Б. Б.

Ферроқорытпа электр пеші жұмысының энерготехнологиялық критерийі тұрғысынан ферросилицийді балқыту

**КӨЛІК
ТРАНСПОРТ
TRANSPORT**

Зарипов Р. Ю.

Разработка мобильного комплекса для уборки водоемов

**Karbaev N. K., Menendez-Pidal I., Balgabekov T. K.,
Orazaliev B. T., Saidalin Y. N.**

About influence of revolting influences on fluctuations of automatically moving concrete amalgamator

**Мурзағалиев А. Ж., Каукаров А. К., Куанышев М. К.,
Сауханов Н. С., Жаманбаев Б. У.**

Автосервистік кәсіпорынның жұмыс бағдарламасын модельдеу

**Турдалиев А. Т., Сазамбаева Б. Т.,
Устемирова Р. С., Карпов А. П.**

Математическое моделирование фрезерного рабочего органа ковшовых экскаваторов

**Шукманов Ж. Е., Сүлейменова Г. А., Орунбеков М. Б.,
Есмаханова Л. Н., Тлемисов Б. Б.**

ПҚИРЖ-Е жүйесінде радиобайланыстың рұқсат етілген ең ұзақ болмау уақытын есептеу

**ҚҰРЫЛЫС
СТРОИТЕЛЬСТВО
CONSTRUCT**

Ульева Г. А., Меркулов В. В., Епанешникова А. А.

Разработка полимерных покрытий для защиты неметаллических материалов от воздействия коррозионных явлений

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors

Авторларға арналғал ережелер
Правила для авторов
Rules for authors

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics

МРНТИ 55.55.31

DOI

**С. Р. Байгереев¹, Г. А. Гурьянов², *А. Д. Сулейменов³,
О. Ю. Васильева⁴, Х. А. Абшенов⁵**^{1,2,4}Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск³Торайгыров Университет, Республика Казахстан, г. Павлодар⁵Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
Республика Казахстан, г. Шымкент¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7773-5457>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9319-0285>⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9426-6322>⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0173-2524>*e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru**РАБОЧИЕ ОРГАНЫ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА НА ДОРОГАХ
И ТРОТУАРАХ С РЕГУЛИРОВКОЙ РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Обледенение дорог и тротуаров является одной из актуальных проблем, влияющих на безопасность дорожного движения. В зимний период для борьбы со скользкостью на дорогах и тротуарах часто применяют механический способ удаления льда с их поверхности. Эффективным механическим способом удаления льда с дорог и тротуаров является его разрушение ударным воздействием твердой сферической поверхностью, для чего были разработаны новые рабочие органы. В результате теоретических исследований получены теоретические расчетные зависимости механико-математической модели для определения параметров рабочего органа ударного действия со сферической рабочей поверхностью для разрушения льда, учитывающие характеристики льда, позволяющие проводить инженерные расчеты и определять как на стадии разработки и проектирования, так и в процессе работы, параметры рабочего органа ударного действия со сферическими бойками и подбирать такую величину разрушающего воздействия рабочего органа на лед, при которой возможно разрушить лед заданной прочности и толщины. Разработаны несколько конструктивных решений рабочих органов для разрушения льда на дорогах с регулированием величины разрушающего воздействия на лед изменением радиуса расположения бойка относительно оси вращения рабочего органа, которые за счет возможности адаптации к условиям работы имеют высокую эффективность при разрушении льда и качество очистки дорожных покрытий. Результаты исследований позволяют

разрабатывать усовершенствованные конструкции рабочих органов с повышенной технологической и экономической эффективностью.

Ключевые слова: рабочий орган, ледоскалывающая машина, разрушение льда, безопасность движения, математическая модель.

Введение

Одной из крайне актуальных проблем для городской инфраструктуры, коммунальных и дорожных служб в зимний период является борьба с возникающим на поверхности автомобильных дорог и тротуаров обледенением, которое существенно затрудняет движение пешеходов и управление автомобилем, а иногда делает их невозможными [1,2].

В настоящее время существуют различные методы борьбы с обледенением на дорогах и тротуарах [3]. Из них к основным можно отнести химический способ (воздействие на лед химическими реагентами), механический способ, тепловой способ (температурное воздействие на лед), фрикционный способ (посыпка льда инертными фрикционными материалами).

Особого внимания заслуживает механический способ борьбы с зимней скользкостью [4; 5], заключающийся в механическом разрушении и удалении льда с поверхности дороги (тротуара) различными рабочими органами, поскольку является наиболее безвредным для экологии, эффективным по результату и длительным по времени его сохранения, не позволяет снегу скапливаться на дороге слоем большой толщины и приближает эксплуатационные характеристики дорожного покрытия к летним показателям. Недостатком механического разрушения и удаления льда существующими рабочими органами является, прежде всего, возможность повреждения покрытия дороги (тротуара), а также большие затраты энергии на разрушение льда. Поэтому не все рабочие органы для механического удаления льда в настоящее время рекомендуются к применению и зачастую используются как вынужденная мера.

Таким образом, имеется потребность в эффективном и неэнергоёмком оборудовании для очистки дорог и тротуаров ото льда в зимнее время, не повреждающем их покрытия. Для этого необходимо применение новых эффективных способов механического разрушения льда, которые отвечали бы следующим требованиям: позволяли регулировать параметры воздействия на разрушаемый лед в зависимости от его характеристик; исключали саму возможность повреждения покрытия дороги в процессе удаления льда.

Считается, что при разрушении льда на покрытиях дорог и тротуаров целесообразно применять срезающее воздействие. Однако, простой анализ различных механических воздействий показывает, что гораздо более эффективным для процесса разрушения льда, являющегося хрупким телом, может быть ударное воздействие, которое, к тому же, может создавать весьма высокие концентраций напряжений в зоне деформирования льда, что снижает работу и энергозатраты на его разрушение.

Исходя из таких предпосылок, были разработаны роторные рабочие органы ударного действия с бойками сферической формы на подвижных или гибких

связях для разрушения льда на дорожных покрытиях, которые характеризуются высокой эффективностью процесса при сравнительно небольших затратах энергии и исключают разрушение или повреждение асфальтобетонного покрытия. Основными новшеством является сферическая форма бойков.

Был разработан и запатентован способ разрушения льда на дорожных покрытиях рабочими органами с бойками сферической формы (патент РК на изобретение № 31910, 15.03.2017, бюл. № 5), особенностью которого является то, что процесс деформации и разрушения льда протекает при постоянном росте площадки контакта бойка со льдом (рисунок 1).

На первой стадии (рисунок 1, а) боек со скоростью v соударяется со льдом и начинает погружаться в него. Возникают разрушающая сила, упругая деформация льда и начинается торможение бойка. Действующая сила вызывает появление контактного давления q на площадке контакта бойка со льдом, появление и рост разрушающих напряжений s , что запускает процесс разрушения льда.

На второй стадии (рисунок 1, б) по мере внедрения сферического бойка в лед и разрушения последнего происходит рост контактной площадки a_2 сферического бойка со льдом, за счет чего величина контактного давления q бойка на лед уменьшается, что приводит к уменьшению скорости внедрения и ограничивает величину проникновения w сферического бойка в лед.

На третьей стадии (рисунок 1, в) после того как величина контактного давления q и создаваемых им напряжений s на площадке контакта бойка со льдом уменьшится до значений, меньших предела прочности льда, разрушение льда прекращается.

Четвертая стадия - скорость бойка падает до нуля, возможен его отскок от поверхности льда.

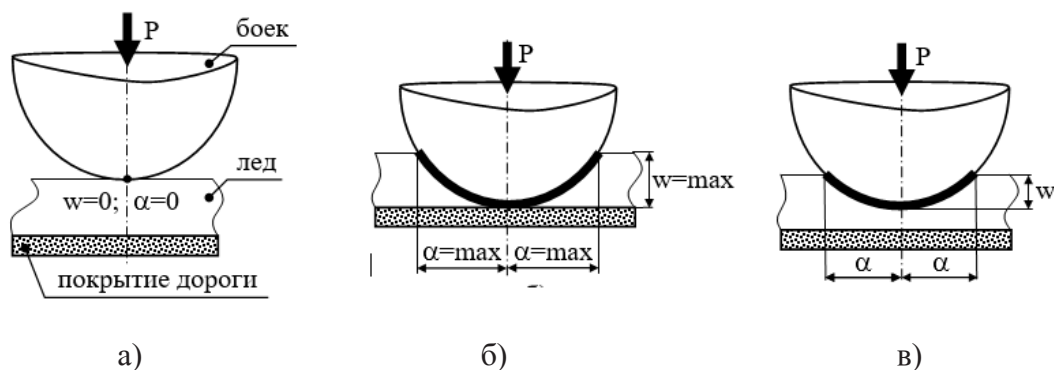


Рисунок 1 – Этапы деформации льда при внедрения сферического бойка

На рисунке 2 изображена схема варианта исполнения рабочего органа, содержащего ударники, состоящие из бойков 1 сферической формы, закрепленных на подвижных тягах 2. Рабочий орган приводится во вращательное движение приводом М. Ударники с бойками на тягах имеют возможность свободного

поворота вокруг своих осей 3. Для разрушения льда на дорожных покрытиях рабочий орган приводится во вращательное движение приводом М, вследствие чего сферические бойки 1 на тягах 2 движутся сверху - вниз и наносят удар по льду, создавая в зоне контакта разрушающие напряжения значительной величины.

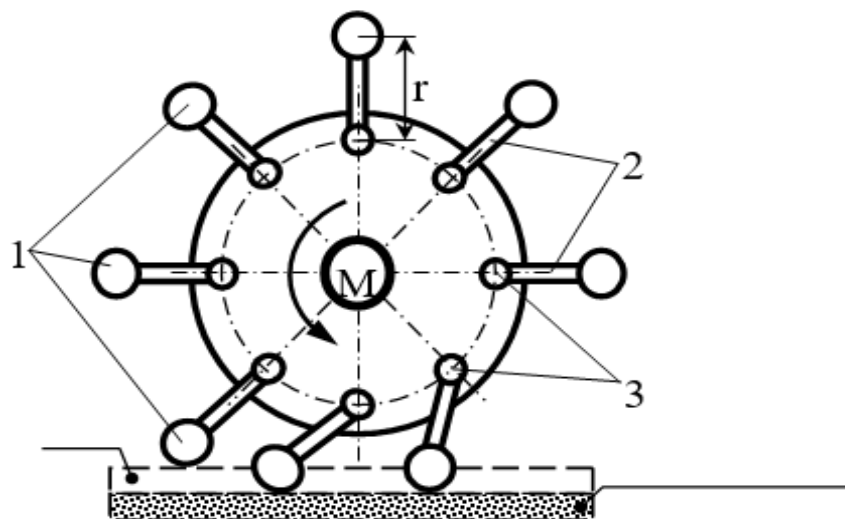
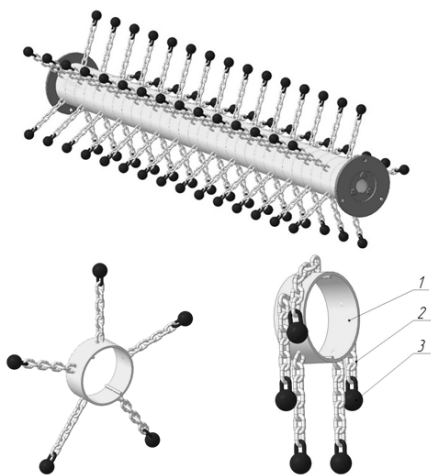


Рисунок 2 – Схема варианта исполнения устройства для реализации способа разрушения льда

Одна из возможных конструкций нового рабочего органа со сферическими бойками на гибких связях для разрушения льда на дорогах и тротуарах, а также ее основной модульный элемент - ударно-разрушающая секция (УРС), показаны на рисунке 3.

На основании таких предпосылок авторами разработаны несколько представленных ниже конструктивных решений для регулирования величины разрушающего воздействия на лед при изменении толщины слоя льда или его прочности за счет изменения радиуса r расположения бойка относительно оси вращения рабочего органа при неизменной частоте вращения рабочего органа.



1 – кольцо; 2 – цепь; 3 – сферический боек

Рисунок 3 – Рабочий орган со сферическими бойками на гибких связях для разрушения льда, составленный из ударно-разрушающих секций и ударно-разрушающая секция

Рабочий орган для разрушения льда на автодорогах по инновационному патенту РК №23189 (рисунок 4), содержит ударники 3, выполненные в виде тросов, и прикрепленные к дискам 1, установленным на приводном валу 4 с возможностью вращения вместе с приводным валом и осевого перемещения вдоль приводного вала. На тросах дополнительно могут устанавливаться бойки (на рисунке не показаны). Разрушение рабочим органом льда происходит при ударе по нему раскрученного ударника 3 в процессе его движения сверху вниз. При сдвигении боковых дисков 1, на которых крепятся ударники 3, вдоль приводного вала 4 происходит увеличение окружной скорости и кинетической энергии бойка, что повышает величину разрушающего воздействия.

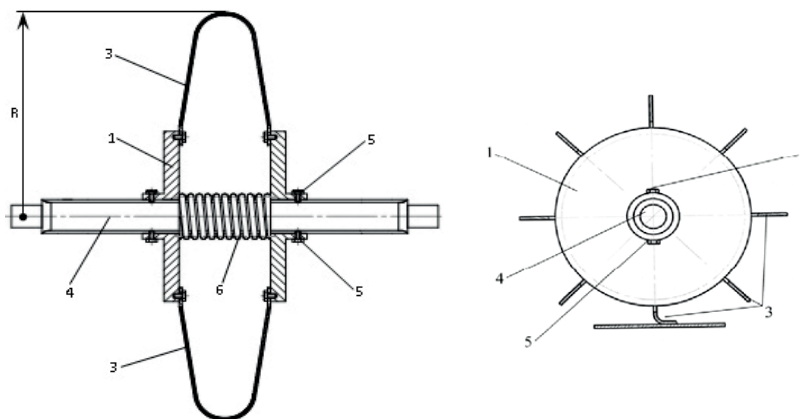


Рисунок 4 – Рабочий орган для разрушения льда на автодорогах по инновационному патенту РК №23189

Рассмотренные рабочие органы за счет возможности адаптации к условиям работы путем регулирования величины разрушающего воздействия на лед изменением радиуса расположения бойков относительно оси вращения рабочего органа имеют высокую эффективность при разрушении льда и качество очистки дорожных покрытий.

Однако более простым, быстрым и более эффективным по диапазону, шагу и плавности способом регулирования разрушающего воздействия, чем изменение радиуса расположения бойков относительно оси вращения рабочего органа, является изменение частоты вращения рабочего органа.

Как было показано выше, эффективность E разрушения льда также зависит от квадрата угловой скорости ω (или частоты вращения n) рабочего органа, как и величина его кинетической энергии.

Поэтому целесообразной будет разработка такой конструкции рабочего органа, которая, во-первых, будет иметь более высокую по сравнению со стандартным приводом частоту вращения, а, во-вторых, будет иметь возможность регулирования величины разрушающего воздействия за счет изменения частоты вращения рабочего органа.

Материалы и методы

Предлагаемая далее механико-математическая модель является одним из вариантов описания процесса ударного разрушения льда с модулем упругости E (Па), коэффициентом Пуассона μ и пределом прочности на смятие σ (Па) сферическим бойком диаметром D (м) и массой m (кг), который ударяет по льду с начальной скоростью v (м/с) и проникает в него на глубину w (м) (рисунок 5).

Механико-математическая модель [6] опирается на следующие допущения: боек имеет форму шара; лед имеет плоскую поверхность и бесконечную массу; разрушенный лед не влияет на ход разрушения; деформацией бойка пренебрегаем; при уменьшении скорости при проникновении бойка в лед отрицательное ускорение считаем постоянным.

На рисунке 5 изображена расчетная схема контактного взаимодействия сферического бойка с разрушаемым льдом.

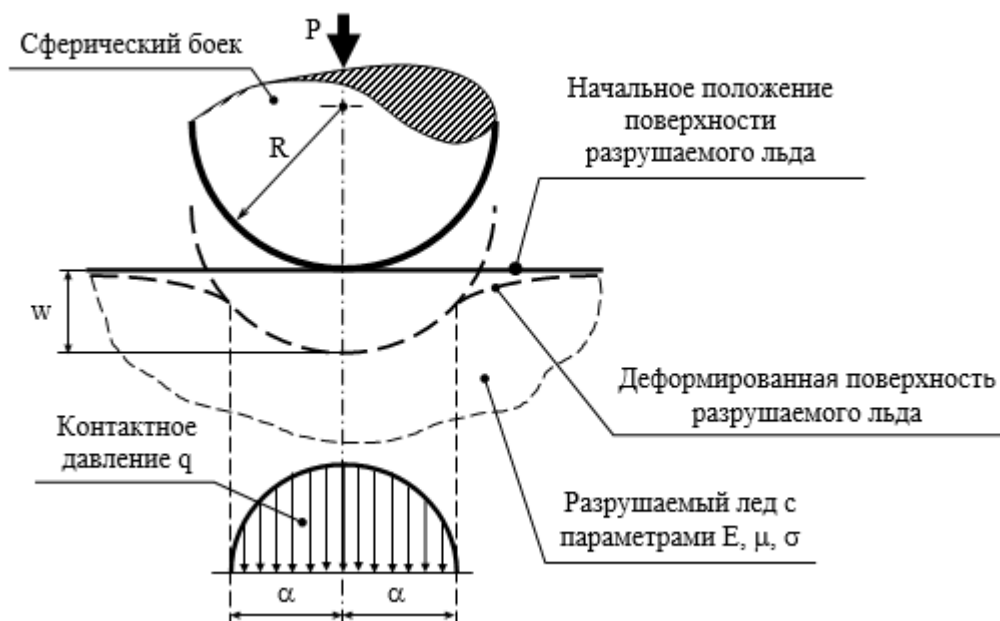


Рисунок 5 – Расчетная схема контактного взаимодействия сферического бойка с разрушаемым льдом

Рассмотрим процесс взаимодействия сферического бойка и разрушаемого ледяного покрытия как частный случай классической задачи механики о соударении двух тел [7,8], движущихся со скоростями v_1 и v_2 при условии, что одно из тел (лед) представляет собой неподвижное упругое полупространство с нулевой кривизной границы $z=0$, и имеет скорость $v_2=0$, а второе (сферический боек) массой m имеет недеформируемую сферическую поверхность радиусом R и скорость $v_1 \neq 0$.

Тогда, создаваемое в зоне контакта сферического бойка со льдом контактное давление q (Па) (рисунок 5), может быть определено по формуле [7, 8, 9, 13]:

$$q = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \alpha^2}, \text{ Па}, \quad (1)$$

где P – сила воздействия бойка на лед, Н;

α – радиус площадки контакта сферического бойка со льдом, м.

При этом сила P (Н) (рисунок 5) воздействия сферического бойка на лед, необходимая для разрушения льда, определяется по формуле [11, 12]:

$$P = m \cdot a, \text{ Н}, \quad (2)$$

где m – масса бойка, кг;

a – отрицательное ускорение при замедлении бойка после его входа в контакт со льдом, м/с^2 .

Определим отрицательное ускорение a (м/с^2) при замедлении сферического бойка от начальной скорости v до конечной скорости $v_0=0$, т.е. его полной

остановки, в процессе его прямолинейного движения при деформации льда на пути w (рисунок 5) [11]:

$$a = \frac{v - v_0}{t}, \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

откуда время деформации льда (время удара):

$$t = \frac{v - v_0}{a}, \text{ с.} \quad (4)$$

Перемещение бойка до его полной остановки, равное деформации льда или проникновению бойка в лед с учетом формулы (3):

$$w = \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{(v - v_0) \cdot t}{2}, \text{ м.} \quad (5)$$

С учетом формулы (4) и учитывая, что скорость бойка в конце деформации льда $v_0=0$:

$$w = \frac{(v - v_0)}{2} \cdot t = \frac{(v - v_0)}{2} \cdot \frac{(v - v_0)}{a} = \frac{v \cdot v}{2 \cdot a} = \frac{v^2}{2 \cdot a}, \text{ м,}$$

откуда отрицательное ускорение при замедлении:

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot w}, \text{ м/с}^2. \quad (6)$$

Тогда сила P (Н) воздействия сферического бойка на лед, необходимая для разрушения льда, после подстановки формулы (6) в (2):

$$P = m \cdot \frac{v^2}{2 \cdot w}, \text{ Н.} \quad (7)$$

Контактное давление q (Па) в зоне контакта сферического бойка со льдом, согласно формулам (1) и (7):

$$q = \frac{3 \cdot m \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot w \cdot \alpha^2}, \text{ Па.} \quad (8)$$

Поскольку лед является хрупким материалом, то его разрушение определяется максимальным растягивающим напряжением от действия контактного давления q сферического бойка, действующим в радиальном направлении на круговой границе поверхности контакта бойка и льда и определяется по формуле [7, 8, 9, 10]:

$$\sigma = \frac{q}{3} \cdot (1 - 2 \cdot \mu), \text{ Па.} \quad (9)$$

С учетом формулы (8) контактного давления:

$$\sigma = \frac{m \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot w \cdot \alpha^2} \cdot (1 - 2 \cdot \mu), \text{ Па.} \quad (10)$$

Согласно [7, 8] радиус площадки контакта сферического бойка с разрушаемым льдом определяется по формуле:

$$\alpha = \sqrt{w \cdot R}, \text{ м.} \quad (11)$$

где R – радиус контактной поверхности сферического бойка, м.

Тогда, после подстановки формулы (11) в (10) и преобразований, напряжения определяются:

$$\sigma = \frac{m \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot R} \cdot (1 - 2 \cdot \mu) = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot w^2} \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \geq [\sigma], \text{ Па,} \quad (12)$$

где D – диаметр контактной поверхности сферического бойка, м.

$[\sigma]$ – предел прочности льда, Па.

Необходимая для вычисления напряжений величина максимального проникновения бойка в лед (деформации разрушаемого льда) $w = w_{\max}$ (рисунок 5) может быть найдена на основе составления и решения дифференциального уравнения моделируемой динамической системы импульсного контактного взаимодействия сферического бойка со льдом с одной степенью свободы [7, 8, 9], описывающей движение массы бойка m со скоростью v :

$$w = \left\{ \left[0,9375 \cdot m \cdot \frac{1 - \mu^2}{E} \right]^2 \cdot \frac{2 \cdot v^4}{D} \right\}^{\frac{1}{5}}, \text{ м,} \quad (13)$$

где v – линейная скорость бойка в момент соударения со льдом, м/с;

m – масса бойка, Н;

g – ускорение свободного падения, м/с².

E – модуль упругости разрушаемого льда, Па;

μ – коэффициент Пуассона разрушаемого льда.

Из формулы (12) можно получить выражения для практического расчетного определения при проектировании или регулировании параметров работы рабочего органа для разрушения льда:

массы m сферического бойка:

$$m \geq \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot w^2 \cdot [\sigma]}{(1 - 2 \cdot \mu) \cdot v^2}, \text{ кг;} \quad (14)$$

скорости v соударения сферического бойка со льдом:

$$v \geq \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot w^2 \cdot [\sigma]}{m \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}, \text{ м/с;} \quad (15)$$

диаметра D сферического бойка:

$$D \leq \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot [\sigma]} \cdot (1 - 2 \cdot \mu), \text{ м;} \quad (16)$$

частоты n вращения рабочего органа:

$$n \geq \frac{30 \cdot v}{\pi \cdot r} = \frac{30}{\pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot w^2 \cdot [\sigma]}{m \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}, \text{ об/мин.} \quad (17)$$

Если принять из экспериментальных данных [13, 14] связь между величиной w проникновения бойка в лед и толщиной h разрушаемого льда $w=h/6$, то получим выражения для определения параметров рабочего органа в зависимости от толщины разрушаемого льда:

массы m сферического бойка:

$$m \geq \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \left(\frac{h}{6}\right)^2 \cdot [\sigma_{\text{вр}}]}{(1 - 2 \cdot \mu) \cdot v^2} = \frac{\pi \cdot D \cdot h^2 \cdot [\sigma]}{18 \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot v^2}, \text{ кг;} \quad (18)$$

скорости v соударения сферического бойка со льдом:

$$v \geq \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \left(\frac{h}{6}\right)^2 \cdot [\sigma]}{m \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot D \cdot h^2 \cdot [\sigma]}{18 \cdot m \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}, \text{ м/с;} \quad (19)$$

диаметра D сферического бойка:

$$D \leq \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{h}{6}\right)^2 \cdot [\sigma]} \cdot (1 - 2 \cdot \mu) = \frac{18 \cdot m \cdot v^2}{\pi \cdot h^2 \cdot [\sigma]} \cdot (1 - 2 \cdot \mu), \text{ м;} \quad (20)$$

частоты n вращения рабочего органа:

$$n \geq \frac{30}{\pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D \cdot h^2 \cdot [\sigma]}{18 \cdot m \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}, \text{ об/мин.} \quad (21)$$

Результаты и обсуждение

Из полученных зависимостей видно, что величина разрушающего воздействия и создаваемых во льду напряжений s зависит и может регулироваться за счет изменения массы m , диаметра D или скорости удара v сферического бойка, а полученные производные формулы позволяют подобрать рациональные значения названных параметров. Это позволяет регулировать процесс разрушения льда при изменении условий работы, обеспечивая необходимые качество и степень очистки дорожного покрытия ото льда, а также рассчитывать параметры рабочих органов при их создании и проектировании.

На основании полученных формул могут быть построены графики зависимостей, которые можно использовать для подбора массы бойка, скорости его соударения со льдом или диаметра сферической поверхности бойка в зависимости от толщины разрушаемого льда или его прочности. На рисунке 6 приведены графики зависимости скорости соударения бойка со льдом и частоты вращения рабочего органа от толщины разрушаемого льда, а на рисунке 7 - графики зависимости скорости соударения бойка со льдом и частоты вращения рабочего органа от напряжений разрушения льда.

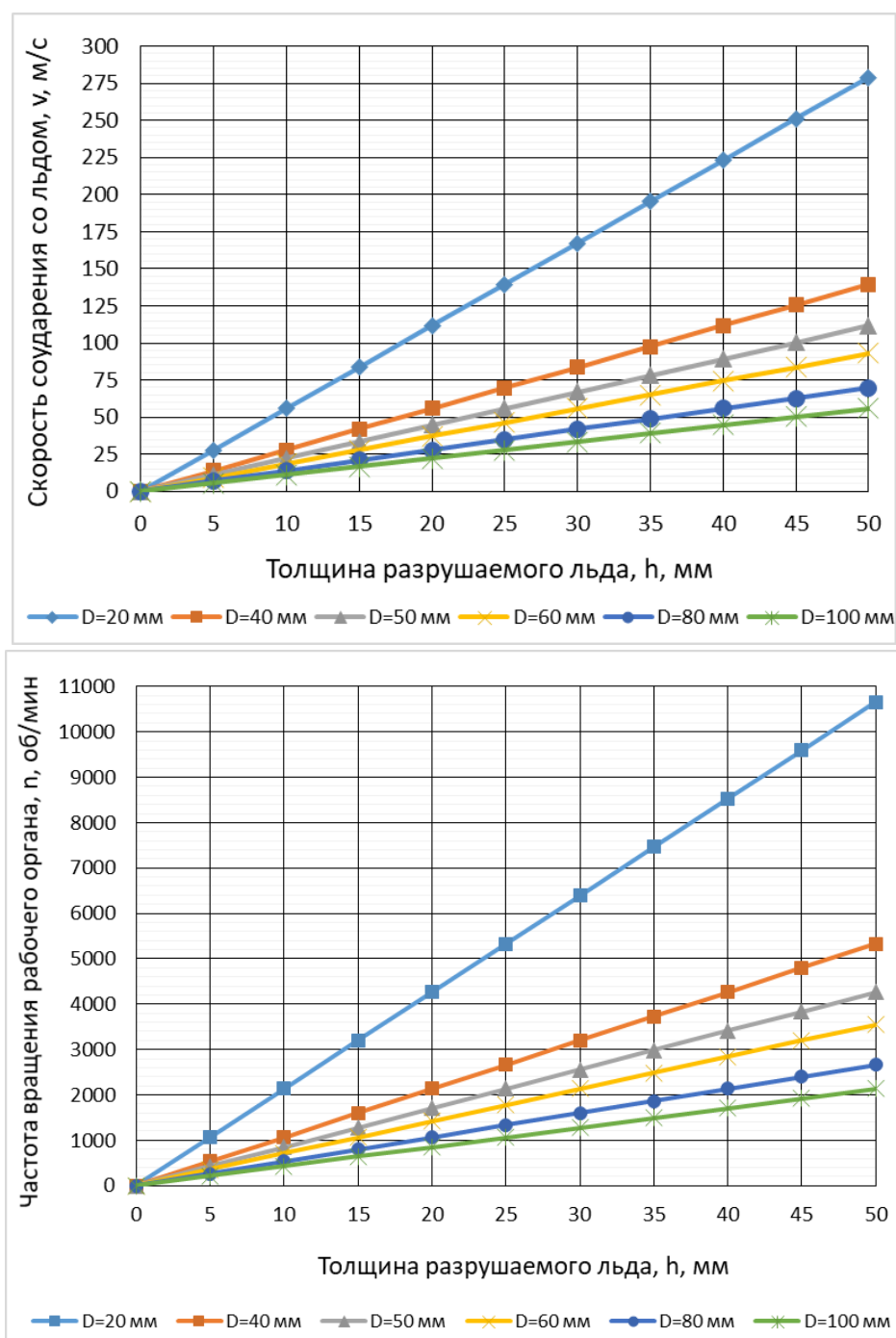


Рисунок 6 – Зависимости скорости соударения бойка со льдом и частоты вращения рабочего органа от толщины разрушаемого льда при различных размерах бойка

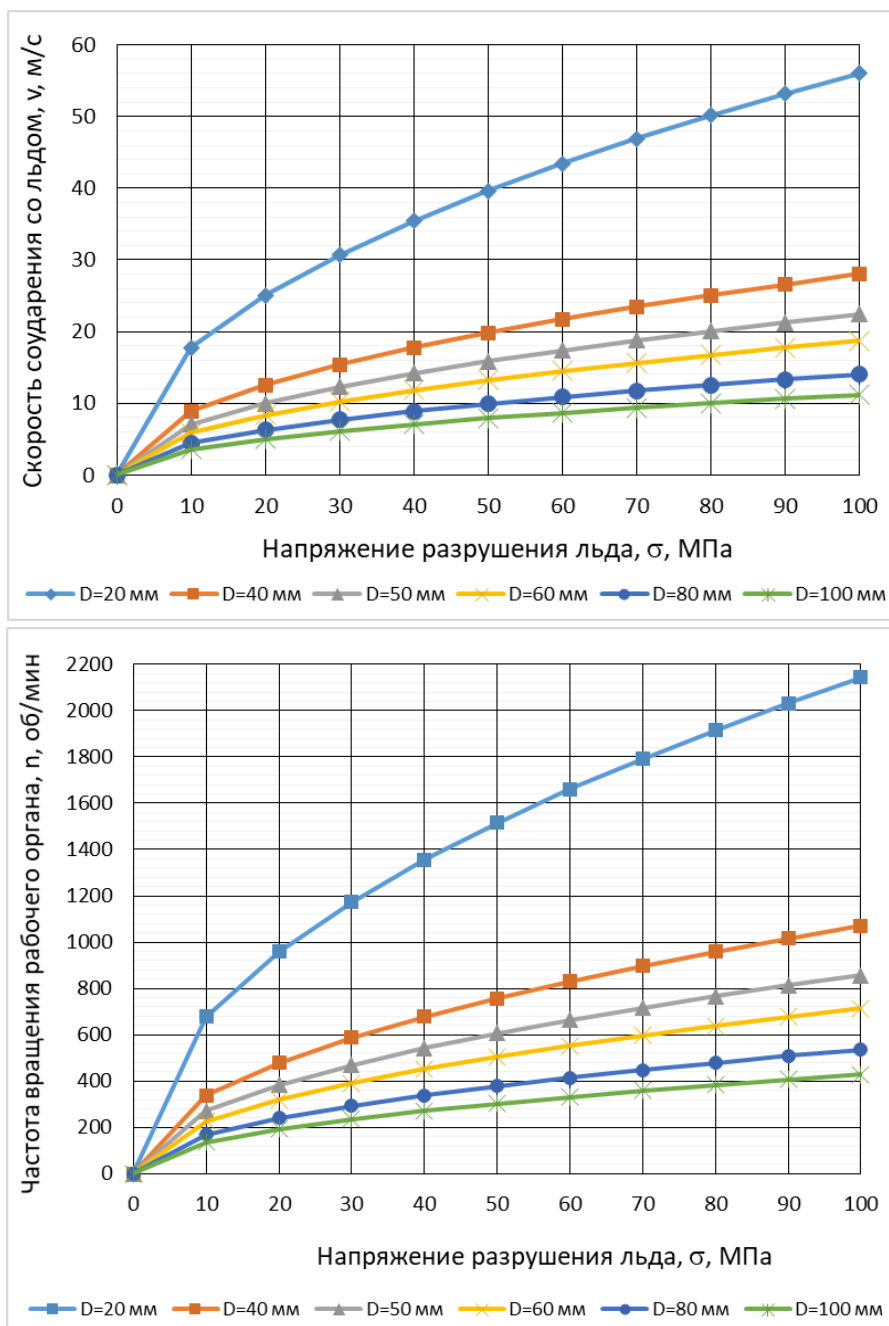


Рисунок 7 – Зависимости скорости соударения бойка со льдом и частоты вращения рабочего органа от напряжений разрушения льда при различных размерах бойка

Применение рабочего органа для разрушения льда с постоянной величиной разрушающего воздействия на лед сильно ограничивает условия его применения, поскольку при недостаточной величине разрушающего воздействия ледяное покрытие не будет разрушаться, а при избыточной - часть энергии рабочего органа,

не потраченная на разрушение льда, будет воздействовать на дорожное покрытие, тем самым разрушая его, либо просто будет истрачена впустую. Следовательно, в соответствии с теоретической механико-математической моделью, дающей возможность точного подбора параметров рабочего органа под условия работы, конструкция рабочего органа, в свою очередь, должна предусматривать возможность регулирования его разрушающего воздействия на лед в зависимости от условий работы, что значительно расширит условия и возможности его применения.

Выводы

Таким образом, авторами разработаны новые виды рабочего оборудования для борьбы с зимней скользкостью на автодорогах, отличающиеся от аналогов высокой эффективностью и возможностью регулирования параметров работы при изменении условий.

При этом можно отметить, что применение комбинированного способа регулирования величины разрушающего воздействия сочетанием изменения частоты вращения рабочего органа, радиуса расположения бойка и массы бойка, значительно расширяет диапазон регулирования величины разрушающего воздействия на лед и функциональные возможности рабочего органа.

Положительные результаты работы позволят создавать новые типы рабочего оборудования для очистки автодорог и городских территорий ото льда, имеющие улучшенные технологические и экономические показатели функционирования.

Использовать вновь разработанные рабочие органы предлагается в качестве навесных на соответствующие базовые машины, а также как сменные рабочие органы на универсальных ручных машинах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Пшембаев, М. К., Ковалев, Я. Н., Яглов, В. Н., Гиринский, В. В.** Способы борьбы с зимней скользкостью. Наука и техника. – Т. 19. – № 3. – 2020. – 230–240 с. – <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>.

2 **Козбагаров, Р. А., Камзанов, Н. С., Бегимкулова, Э. А., Каукаров, А. К.** Новые методы определения и восстановления ровности автомобильных дорог // Научный журнал «Наука и техника Казахстана». – 2022. – № 2. – С. 124–134. <https://doi.org/10.48081/FIIQ1647>.

3 **Blackburn, R. J.** Physical alternatives to chemicals for Highway Deicing. - Transp. Rea. Board Spec. Rept., 2009, N185.

4 **Воскресенский, Г. Г., Клигунов, Е. С., Сверкунова, А. А.** Исследование переходных процессов движения ножа виброскальвателя уплотненного снега // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. – № 1. – С. 30–37.

5 **Богородский, В. В., Гаврило, В. П., Недошивин, О. А.** Разрушение льда: методы и средства. – С-Пб. : Гидрометеиздат, 2003.

7 **Строганова, О. С.** Моделирование механизмов взаимодействия конструкций и сред со сложной реологией. Дисс. на соискание ученой степени

к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. – СПб., СПбГМТУ, 2015. – С. 153.

8 **Жемочкин, Б. М.** Теория упругости. – М. : Госстройиздат, 1957. – 256 с.

9 **Лебедева, Е. А.** Механика деформируемого тела: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 104 с.

10 **Кузнецов, С. А.** Механика контактного взаимодействия. Конспект лекций. Издание 2-е, исправленное и дополненное / С.А. Кузнецов. – Казань: Казан. ун-т, 2020. – 77 с.

11 **Молотников, В. Я.** Сопротивление материалов: учебное пособие для вузов / В. Я. Молотников. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 312 с.

12 **Тарг, С. М.** Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов/– 20-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2010. – 416 с.: ил..

13 **Качанов, Л. М.** Основы механики разрушения. – М. : Наука, 2004. – 310 с.

14 **Дудкин, М. В., Гурьянов, Г. А., Ким, А. И., Роговский, В. В.** Оборудование разрушения ударом льда на поверхности дорог и тротуаров: теория и эксперимент. Научное издание (монография). / Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2020. – 203 с.

15 **Guryanov, G. A., Baigereyev, S. B., Vavilov, A. V., Abdeyev, B. M., Vasilyeva, O. Y., Likunov, A. V.** The Model of Ice Destruction on a Solid Surface by Spherical Striker Impact // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol 17. – № 1. – 2023. – P. 22-32.

REFERENCES

1 **Pshembaev, M. K., Kovalev, YA. N., Yaglov, V. N., Girinskij, V. V.** Sposoby bor'by s zimnej skol'zkost'yu [Ways to combat winter slipperiness.]. Nauka i tekhnika. T. 19. – № 3. – 2020. – P. 230–240. – <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>.

2 **Kozbagarov, R. A., Kamzanov, N. S., Begimkulova, E. A., Kaukarov A.K.** Novye metody opredeleniya i vosstanovleniya rovnosti avtomobil'nyh dorog [New methods for determining and restoring the evenness of highways] // Nauchnyj zhurnal «Nauka i tekhnika Kazahstana». – 2022. – № 2. – P. 124–134. – <https://doi.org/10.48081/PIIQ1647>.

3 **Blackburn, R. J.** Physical alternatives to chemicals for Highway Deicing. – Transp. Rea. Board Spec. Rept., 2009, N 185.

4 **Voskresenskij, G. G., Kligunov, E. S., Sverkunova, A. A.** Issledovanie perekhodnyh processov dvizheniya nozha vibroskalyvatelya uplotnennogo snega [Investigation of transient processes of movement of the knife of the compacted snow vibrator] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2021. – № 1. – P. 30–37.

5 **Bogorodskij, V. V., Gavrilov, V. P., Nedoshivin, O. A.** Razrushenie l'da: metody i sredstva [Ice destruction: methods and means.]. – S-Pb. : Gidrometeoizdat, 2003.

6 **Stroganova O. S.** Modelirovanie mekhanizmov vzaimodejstviya konstrukcij i sred so slozhnoj reologiej [Modeling of mechanisms of interaction of structures and media

with complex rheology]. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n., Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj morskoy tekhnicheskij universitet. – SPb., SPbGMTU, 2015. – P. 153.

7 **Zhemochkin, B. M.** Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. – M.: Gosstrojizdat, 1957. – 256 p.

8 **Lebedeva, E. A.** Mekhanika deformiruемого tela [Mechanics of a deformable body]: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2013. 104 p.

9 **Kuznecov, S. A.** Mekhanika kontaktnogo vzaimodejstviya. Konspekt lekcij. Izdanie 2-e, ispravlennoe i dopolnennoe [Mechanics of contact interaction. Lecture notes. 2nd edition, revised and supplemented] / S. A. Kuznecov. – Kazan' : Kazan. un-t, 2020. – 77 p.

10 **Molotnikov, V. Ya.** Soprotivlenie materialov: uchebnoe posobie dllya vuzov [Resistance of materials: a textbook for universities] / V. Ya. Molotnikov. – Sankt-Peterburg : Lan', 2024. – 312 p.

11 **Targ, S. M.** Kratkij kurs teoreticheskoj mekhaniki: Ucheb. dllya vuzov [A short course in theoretical mechanics: Studies for universities] / – 20-e izd., ster. – M.: Vyssh. shk., 2010. – 416 s.: il.

12 **Kachanov, L. M.** Osnovy mekhaniki razrusheniya [Fundamentals of fracture mechanics]. - M.: Nauka, 2004. – 310 p.

13 **Dudkin, M. V., Gur'yanov, G. A., Kim, A. I., Rogovskij, V. V.** Oborudovanie razrusheniya udarom l'da na poverhnosti dorog i trotuarov: teoriya i eksperiment. Nauchnoe izdanie (monografiya) [Equipment for destruction by impact of ice on the surface of roads and sidewalks: theory and experiment. Scientific publication (monograph)]. / Ust'-Kamenogorsk: VKGTU, 2020. – 203 p.

14 **Guryanov, G. A., Baigereyev, S. B., Vavilov, A. V., Abdeyev, B. M., Vasilyeva, O. Y., Likunov, A. V.** The Model of Ice Destruction on a Solid Surface by Spherical Striker Impact // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol 17. – № 1. – 2023. – P. 22–32.

Поступило в редакцию 23.10.24.

Поступило с исправлениями 03.11.24.

Принято в печать 06.11.2024.

*С. Р. Байгереев¹, Г. А. Гурьянов², *А. Д. Сулейменов³,*

О. Ю. Васильева⁴, Х. А. Абшенов⁵

^{1,2,4}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

³Торайғыров Университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

⁵М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.

23.10.24 ж. баспаға түсті.

03.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

06.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОЛДАРДАҒЫ ЖӘНЕ ТРОТУАРЛАРДАҒЫ МҰЗДЫ БҰЗУҒА АРНАЛҒАН БҰЗУ ӘСЕРІН РЕТТЕЙТІН ЖҰМЫС ОРГАНДАРЫ

Жолдар мен тротуарлардың мұздануы жол қауіпсіздігіне әсер ететін өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Қыста жолдар мен тротуарлардағы тайғақпен күресу үшін олардың бетіндегі мұзды жоюдың механикалық әдісі жиі қолданылады. Жолдар мен тротуарлардағы мұзды жоюдың тиімді механикалық әдісі оны қатты сфералық бетпен соғу арқылы жою болып табылады, бұл үшін жаңа жұмыс органдары әзірленген. Теориялық зерттеулер нәтижесінде инженерлік есептеулерді жүргізуге мүмкіндік беретін мұздың сипаттамаларын ескере отырып, мұзды жою үшін сфералық жұмыс беті бар соққы жұмыс органының параметрлерін анықтау үшін механикалық-математикалық модельдің теориялық есептеу тәуелділіктері алынды. Әзірлеу және жобалау кезеңінде де, пайдалану кезінде де сфералық соққылармен әсер етудің жұмыс органының параметрлерін анықтайды және мұзды жоюға болатын жұмыс органының мұзға зақымдаушы әсерінің осындай мәнін таңдайды. берілген беріктік пен қалыңдықта. Жұмыс органының айналу осіне қатысты соққы берушінің орналасқан жерінің радиусын өзгерту арқылы мұзға деструктивті әсердің шамасын реттейтін жолдардағы мұзды жоюға арналған жұмыс органдары үшін бірнеше жобалық шешімдер әзірленді, бұл жұмыс жағдайларына бейімделу мүмкіндігі, мұзды жарудағы жоғары тиімділігі және жол төсемдерін тазалау сапасы. Зерттеу нәтижелері жоғары технологиялық және экономикалық тиімділігі бар жұмыс органдарының жетілдірілген конструкцияларын жасауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: жұмыс органы, мұз жарғыш машина, мұзды бұзу, қозғалыс қауіпсіздігі, математикалық модель.

**S. R. Baigereyev¹, G. A. Guryanov², *A. D. Sulemenov³,
O. Y. Vasilyeva⁴, Kh. A. Abshenov⁵**

^{1,2,4}D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

³Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁵South Kazakhstan university named after M.Auezov,
Republic of Kazakhstan, Shymkent

Received 23.10.24.

Received in revised form 03.11.24.

Accepted for publication 06.11.24.

WORKING BODIES FOR THE DESTRUCTION OF ICE ON ROADS AND SIDEWALKS WITH ADJUSTMENT OF THE DESTRUCTIVE EFFECT

Icing of roads and sidewalks is one of the urgent problems affecting road safety. In winter, a mechanical method of removing ice from the surface of roads and sidewalks is often used to combat slipperiness. An effective mechanical method of removing ice from roads and sidewalks is its destruction by impact action of a solid spherical surface, for which new working bodies have been developed. As a result of theoretical

studies, theoretical calculation dependencies of a mechanical-mathematical model were obtained for determining the parameters of a working body of impact action with a spherical working surface for destroying ice, taking into account the characteristics of ice, allowing for engineering calculations and determining both at the development and design stage and in the process of operation, the parameters of the working body of impact action with spherical strikers and selecting such a value of the destructive effect of the working body on ice, at which it is possible to destroy ice of a given strength and thickness. Several design solutions for working bodies for breaking ice on roads with regulation of the magnitude of the destructive effect on ice by changing the radius of the striker location relative to the axis of rotation of the working body have been developed, which, due to the possibility of adaptation to working conditions, have high efficiency in breaking ice and quality of cleaning road surfaces. The results of the research allow developing improved designs of working bodies with increased technological and economic efficiency.

Keywords: working body, ice-breaking machine, ice destruction, traffic safety, mathematical model.

***Д. Ж. Басқанбаева¹, Қ. К. Елемесов²,
Л. Б. Сабирова³, А. С. Жұмәділова⁴**

^{1,2,3,4}Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8231-9944>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1443-7292>

*e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ТАУ КЕН ИНДУСТРИЯСЫНДА ГАЗ СЫҒЫМДАУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Тау-кен өнеркәсібінде қолданылатын заманауи ауа компрессорлары қиын жағдайларда жұмыс істегенде жоғары қауіпсіздік маржасына ие болуы керек, бұл біркелкі емес рельеф, температураның жоғары өзгеруі, жер астында жұмыс істеу болып табылады. Ғылыми-зерттеу жұмыстары теориялық және эксперименттік зерттеулер кешені ретінде негізделген бастапқы деректерді алу, жаңа буын компрессорларын құрудың принциптері мен жолдарын іздеу мақсатында жүзеге асырылады, тау-кен өндірісінде қолданылады.

Ауа компрессорлары карьердегі терең шахталарда, сонымен қатар жер асты шахталарын таза ауамен қамтамасыз ету үшін қолданылатын негізгі әрі маңызды жабдық болып табылады. Компрессор сыртқы ауаны алып, оны қысып, сүзіп, содан кейін туннельге жібере алады. Шахталарда қолдануға арналған компрессорлық жабдықты таңдауға өте мұқият қарау керек, өйткені көптеген ықтимал қауіптер мен шектеулер бар.

Бұл жұмыста тау-кен өнеркәсібіндегі газ компрессорлық станцияның бұрандалы компрессорының құрылымын оңтайландыру құрылысына, жұмысына және мүмкіндігіне байланысты мәселелер қарастырылады.

Процестерді модельдеу және блок-схемаларды құру Mathcad, Drawio, MS Power Point және т.б. бағдарламаларын қолдана отырып жүргізілді. Негізгі гипотезалар мен қорытындылар. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде жүйені минималды энергия шығындарымен басқаруға қабілетті оңтайлы реттеуші анықталды.

Тақырыптың өзектілігі Қазақстанда және басқа да дамушы елдерде энергия үнемдеу мәселесіне ерекше көңіл бөлінетіндігімен түсіндіріледі. Бұл жалпы газ компрессорлық жабдықтың және атап айтқанда кен орындарындығы компрессорлық станциялардың тиімділігін арттыруды талап етеді. Практикалық мәні бұл жүйені минималды энергия шығындарымен басқаруға қабілетті оңтайлы реттеуші.

Кілтті сөздер: тау-кен өнеркәсібі, бұрандалы компрессор, газды сығымдау, газды қысу, энергия тиімділігі.

Кіріспе

Мұнай және газ өнеркәсібінде бұрандалы компрессорлар белсенді түрде қабылдануда. Дегенмен, газды қысу электр энергиясының айтарлықтай мөлшерін тұтынады, сондықтан ең аз қуат тұтынуды қамтамасыз ету үшін бұрандалы компрессорлардың жұмысын оңтайландыру мағынасы бар.

Оңтайлы бақылауды есептеу әдістерінің бірі энергияны басқарудың минималды мәселесі болып табылады, оның есептелуі күшейткіш компрессорлық станцияларда (ККС) жиі орын алуы мүмкін, асып кету жағдайында энергияны минималды тұтынумен жүйені басқаруға қабілетті контроллерді қамтамасыз етеді. Күшейткіш компрессорлық станциялар негізінен электр энергиясы жоқ жерлерде орналасқандықтан, электр қуатын газ құбыры арқылы өтетін газда жұмыс істейтін генераторлар өндіретіндіктен, станциялардағы энергияны тұтыну мәселесі өте маңызды [1, 94-95 б].

Жұмыстың мақсаты: бұрандалы компрессордың шығысындағы оңтайлы қысым реттегішін жасау, газды айдауға ең аз энергия шығынын қамтамасыз ету. Реттелетін айнымалылар бойынша шектеулер болған жағдайда интегралды энергияны тұтыну мағынасында оңтайландырудың қолданыстағы аналитикалық әдістерін салыстырмалы талдау.

Материалдар мен әдістері

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасының газ-өнеркәсіптік кәсіпорындары үшін газ айдау және сығымдау қуаттарын құру және дамыту бойынша ғылыми-зерттеу және жобалау жұмыстарының үлкен циклінің бірінші кезеңі болып табылады.

Бұл жұмыс барысында газ айдау станцияларының құрылымдары мен бұрандалы компрессорлық құрылғыларды жобалау бағытында жүргізілген зерттеулердің жағдайы талданған. Талдау үшін Scopus және Web of Science әлемдік жетекші деректер базалары пайдаланылды. Газды сығымдау қондырғысының негізгі құрылымдық схемасы жасалды. Процестерді модельдеу және блок-схемаларды құру MathCad, Drawio, MS PowerPoint және басқа бағдарламаларды қолдану арқылы жүзеге асырылды.

Нәтижелер және талқылау

Компрессорлар ГКС-тің «жүрегі» бола отырып, құбырдың кедергісін жеңу және тұтынушыларды үздіксіз газбен қамтамасыз ету үшін газ қысымын арттыруға жауап береді. Газ компрессорлық станцияларында компрессорлардың әртүрлі түрлері қолданылады, олардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар [2, 8-12 б].

Компрессорлық қондырғылардың ең көп тараған түрі – поршеньдік тип болып табылады, оның жұмыс істеу принципі поршеннің кері қозғалысына байланысты газды сығу. Поршеньді компрессордың жұмысы өте шулы, сығылған газды беру импульстар арқылы жүзеге асырылады, тегістеу үшін қабылдағыштар пайдаланылады, ол жоғары энергия тұтынуға ие, жоғары сығымдау жылдамдығында жүйе қызады [3, 22-34 б].

Ортадан тепкіш компрессормен газды сығу келесі жолмен жүзеге асырылады: жұмыс дөңгелегі қалақтарының айналуына байланысты газ ортасынан дөңғалақтың

шетіне қарай жылжиды және нәтижесінде газдың жылдамдығы артады және сығу жүреді, одан әрі газ жылдамдығы азаяды және газдың кинетикалық энергиясы потенциалдық энергияға өзгертін дөңгелек диффузорда қайта сығу жүреді [4].

Ортадан тепкіш компрессордың сыйымдылығы жоғары және газ беру пульсациялары жоқ, бірақ пышақтардың жоғары ықтималдығы, қалақтардың үлкен өлшемі және жоғары шу деңгейі, сонымен қатар компрессордың төмен тиімділігі бар [5, 845 б].

Қозғалтқыштың айналмалы қозғалысын поршеньдердің кері қозғалысына түрлендірудің қажеті жоқ, сонымен қатар үйкелістің төменгі коэффициенті бұрандалы компрессордың тиімділігін айтарлықтай арттырады [6, 144 б].

Бұрандалы компрессорға арнайы іргетас немесе бөлек бөлме қажет емес, бұл орнату және іске қосу шығындарын үнемдейді. Бұрандалы қондырғыға 4000–8000 сағаттан кейін қызмет көрсету керек, ал поршеньді компрессорларға әрбір 500 сағат жұмыс істегеннен кейін қызмет көрсету керек.

Тәжірибе көрсеткендей, қондырғылар 7–8 жыл бойы бұрандалы жұптарды ауыстырмай жұмыс істей алады, бұл уақыт ішінде бірдей жағдайларда қуаттылығы ұқсас 5 поршеньді компрессорларды ауыстыру қажет [7, 243-247 б].

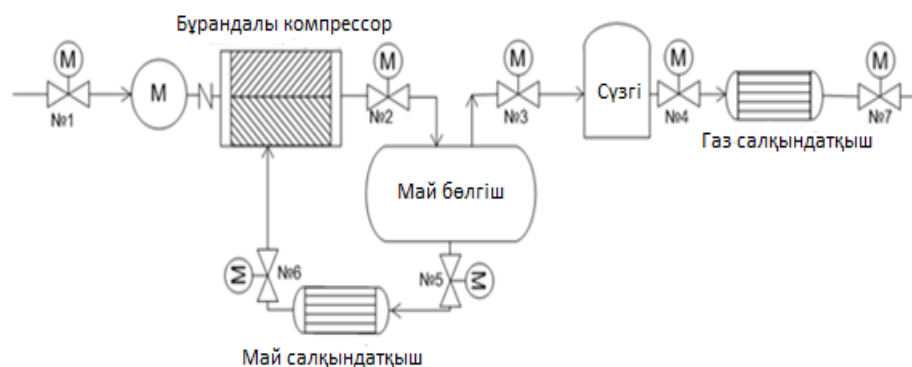
Жоғарыда келтірілген артықшылықтар мен кемшіліктерге сүйене отырып, бұрандалы компрессорлардың сенімділігі жоғары деп қорытынды жасауға болады, өйткені оның үйкеліс бөліктерінің ең аз саны бар, энергияны үнемдеу реттеу жүйесіне байланысты, жұмыстың жоғары ресурсы мен тиімділігіне ие, өйткені оларға 4000–8000 сағат жұмыс істегеннен кейін қызмет көрсетіледі.

Үлкен көлемді май сепараторының болуына байланысты жүйенің құны, оның салмағы мен өлшемдері айтарлықтай артады [8, 74 б].

Бұрандалы компрессордың көмегімен сығымдау қондырғысының схемасын кұрастыру.

Бұрандалы компрессор – электрқозғалтқышпен басқарылатын көлденең бір сатылы машина, оның конструкциясы корпустан, жетекті және жетекті роторлардан және механикалық тығыздағыштан тұрады.

Бұрандалы компрессор Қазақстан Республикасының мұнай-газ өнеркәсібінде енгізу үшін ең жақсы сипаттамаларына байланысты таңдалған, мысалы, жүктеменің кең ауқымы, жұмыс диапазоны, сондай-ақ техникалық қызмет көрсетудің төмен шығындары, сондықтан жобаны әзірлеу компрессордың осы түрін энергияны аз тұтынумен жүйеде пайдалану, өзекті болып табылады. 1-суретте бұрандалы компрессорды қолданатын ГКС әзірленген схемасы көрсетілген.



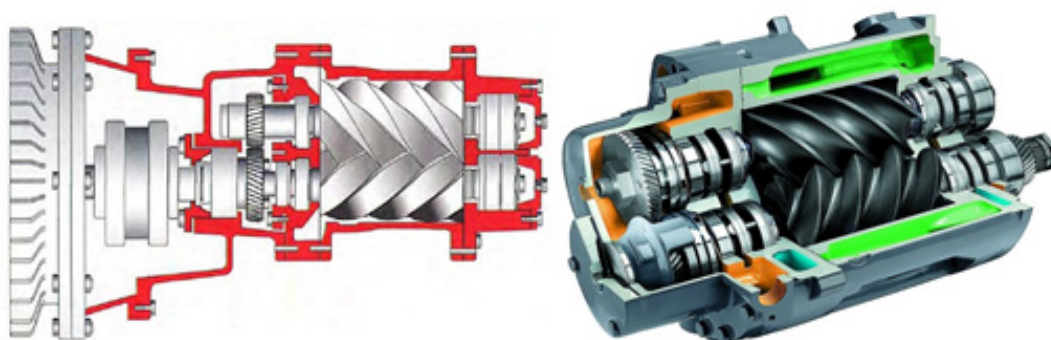
Сурет 1 – Газды сығымдау қондырғысының принципіалды сұлбасы

Бөлгіш қондырғылардан тазартылған газ бұрандалы компрессорға №1 электр клапан арқылы түседі. Жетек компрессорға муфта арқылы қосылады. Мұнай газды сығымдаудың жұмыс аймағына газды салқындататын және жанасу кезінде роторлардың майлануын, сондай-ақ олардың тығыздалуын қамтамасыз ететін №6 электр клапаны арқылы айдалады. Компрессордан №2 вентиль арқылы газ бен мұнай қоспасы мұнай сепараторына (сепаратор) түседі, онда газ мұнайдан бөлінеді, содан кейін сүзгіге түседі, онда ол қосымша мұнай тазартудан өтеді, содан кейін газ салқындатқышқа түседі, содан кейін оның тағайындалған орнына барады. Газдан бөлінген май салқындату сатысынан өтеді және бұрандалы блоктың мойынтіректерін майлау үшін бұрандалы компрессорға қайтадан айдалады. Мұнай мен газ арнайы су салқындатқышта ұсынылған температураға дейін салқындатылады [9, 212 б].

Компрессордың жұмыс қуысына май беру нәтижесінде қоректендіру коэффициенті артады, компрессордың конструкциясы жеңілдетіледі және айналу жылдамдығын азайтуға болады.

Майсыз компрессорлардан айырмашылығы, майлы компрессорларда газды сығу кезінде бөлінетін жылудың бір бөлігі мұнайға беріледі, бұл сығу процесін айтарлықтай арттырады. Дегенмен, мойынтіректерден шығатын май сорғыш газды қыздыруға көмектеседі, сондықтан машинаның қуаты төмендейді.

Ілеспе мұнай газын сығуға арналған бұрандалы компрессордың конструкциясы 1.2-суретте көрсетілген.

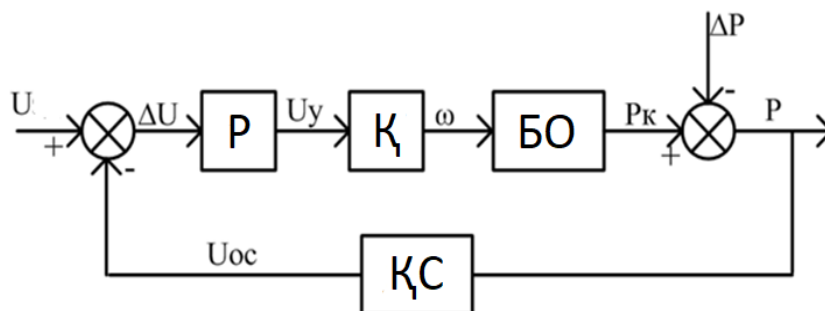


Сурет 2 – Бұрандалы компрессордың конструкциялық сұлбасы

Бұрандалы компрессор көлемді типті машина болып табылады, өйткені газды сығу процесі жабық көлемнің төмендеуіне байланысты жүреді. Компрессор диагональ бойынша орналасқан сору және шығару саптамалары бар корпустан тұрады. Бір-бірімен қиылысатын компрессордың жетек және жетек бұрандаларына арналған бұрандалы компрессордың корпусында және қақпағында цилиндрлік тесіктер жасалады, жетекші бұранданың білігі электр қозғалтқышына қосылады. Роторлардың тістері әр түрлі кірме профильдерден жасалған, жетекші бұрандада дөңес кең тістер бар, жетекті тар және ойыс болып келеді. Бұрандалардың тістері арасындағы екі жақты бүйірлік саңылауларды сақтау үшін олардың біліктерін синхрондау тісті доңғалақтар арқылы біріктіреді, бұл бұрандалардың өзара жанасу мүмкіндігін болдырмайды, жақсырақ май толтырылмаған компрессорлар үшін арналған [10, 22-34 б].

Шағын компрессорларда бұранда жұбына әсер ететін осьтік күштерді азайту үшін қажетті домалау мойынтіректері, электр қозғалтқышының жағында – тірек мойынтіректері, бұрандалы жұптан кейін – бұрыштық контактілі подшипниктер қолданылады. Сырғымалы подшипниктер үлкен компрессорларда қолданылады. Бұрандалы біліктердің тығыздағыштары ретінде сальник түріндегі металл керамикалық тығыздағыштар қолданылады.

Бұрандалы компрессордың көмегімен сығымдау қондырғысының схемасын құрастыру. ГАҚ сипаттамасына кіріспес бұрын, компрессордың шығысындағы газ қысымын бақылауды және реттеуді қамтамасыз ететін жүйені оңтайлы басқарудың функционалдық жүйесін ұсыну қажет. Жүйенің функционалдық диаграммасы 3-суретте көрсетілген.



R – реттегіш; M - қозғалтқыш; CO- басқару объектісі; PS - қысым сенсоры.
Сурет 3 – Жүйенің функционалдық диаграммасы

Осы функционалдық схема негізінде БК жүйесінің негізгі элементтерінің сипаттамалары таңдалады. Бұрандалы компрессоры бар жүйеге қойылатын техникалық талаптар БК-да өтетін техникалық процесс негізінде қалыптасады. 1-кестеде көрсетілген БК жүйесінің параметрлерін таңдау үшін Қазақстан Республикасының энергетикалық кәсіпорындарының қажеттіліктері туралы деректер негіз болды. (Қазақстан Республикасының Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің Ұлттық статистика бюросының деректері).

Кесте 1 – Бұрандалы компрессорлық жүйеге қойылатын техникалық талаптар

Сан	Параметр	Мән
1	Қоректендіру кернеуі	380 В +10%
2	Жиілік	50 Гц
3	Температура диапазоны	-15
4	Қысым бақылау диапазон, МПа	0,4 - 0,7
5	Реттеу уақыты, с артық емес	5
6	Шамадан тыс реттеу	жоқ болуы рұқсат етілген
7	Өзгеруі кезіндегі статистикалық кате, %	2

Қозғалтқышқа қойылатын техникалық талаптар электр қуатын тұтыну бойынша компрессордың негізінде қалыптасады, сонымен қатар жұмыс жағдайларын ескеру қажет, өйткені ол газды сығымдау жүйесінде қолданылады, қозғалтқыш жарылысқа төзімді болуы керек. Таңдалған бұрандалы компрессор жұмыс жағдайына қарай май толтырылған типті машина болуы керек. Ол 0,7 МПа максималды шығару қысымымен және 20–22 м³/мин өнімділікпен ілеспе мұнай газын сығуды қамтамасыз етуі керек. Компрессордың техникалық сипаттамаларына қойылатын толық талаптар 2-кестеде келтірілген.

Кесте 2 – Компрессор өнімділік талаптар

Сығыла тын газ	Сыйымдылығы	Сору қысымы, МПа	Шығару қысымы, МПа	Ротордың жылдамды ғы	Қозғалт қыш түрі	Қуат, кВт
Табиғи газ	22	0,2	0,7	3000	ЭД	200

Маймен айдалатын бұрандалы компрессордың (МАК) айналма жылдамдығы төмен (30-дан 50 м/с), сондықтан домалау мойынтіректері қолданылады. Бұл компрессорға техникалық қызмет көрсету аз және шамамен 40000 мотор сағатын құрайтын ұзақ қызмет мерзімі бар, содан кейін күрделі жөндеу қажет. Бұрандалы компрессордың жетегі ретінде AIR315M2 роторы бар асинхронды үш фазалы айнымалы ток қозғалтқышы таңдалды. Мотордың бұл түрі жарылыстан қорғалған нұсқада жасалған. Компрессор жетегі ең аз энергия тұтынуды қамтамасыз ету үшін оңтайлы реттеуді орындау қажет. Осы жұмыстың аясында келесі кезеңде мұндай есеп жүргізіледі.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен № BR24992956 «Газды сығымдау үшін инновациялық жабдықтар мен технологияларды әзірлеу және құру» тақырыбы аясында жүзеге асырылды.

Қорытынды

Бұл мақалада бұрандалы компрессордың құрылымы мен жұмыс принципі терең талданған. Бұл газды тиімді және тегіс сығу үшін қарама-қарсы бағытта айналатын екі бұрандалы роторды пайдаланатын компрессордың бір түрі. Роторлар, корпус, басқару механизмі және майлау жүйесі сияқты бұрандалы компрессордың негізгі элементтері талқыланды. Бұрандалы компрессордың поршенді компрессорлар және орталықтан тепкіш компрессорлар сияқты компрессорлардың басқа түрлерінен негізгі артықшылықтары атап өтілді. Бұрандалы компрессорлардың сығымдау коэффициенті жоғары және энергияны аз тұтынуы олардың жұмысын үнемді етеді. Бұрандалы компрессорлар біркелкі қысу процесіне байланысты төмен шу деңгейімен сипатталады. Қарапайым конструкциясына және роторлар арасындағы үйкелістің болмауына байланысты бұрандалы компрессорлар ұзақ қызмет мерзіміне ие және минималды техникалық қызмет көрсетуді қажет етеді. Бұрандалы компрессорлар қысымдар мен қуаттардың кең ауқымында жұмыс істей алады, бұл оларды әртүрлі қолданбалар үшін әмбебап етеді. Бұрандалы компрессор үшін алынған өнімділік деректері негізінде газ компрессорлық жүйесінің негізгі элементтері таңдалды. Газды сығымдау жүйесінің техникалық сипаттамалары сәйкес келуін қамтамасыз ету маңызды болды. Талдау нәтижесінде роторлы торлы асинхронды қозғалтқышты қолдану туралы шешім қабылданды. Қозғалтқыштың бұл түрі қарапайым дизайнмен, сенімділігімен және салыстырмалы түрде төмен құнымен сипатталады. Ол сондай-ақ бұрандалы компрессордың тиімді жұмыс істеуі үшін маңызды болып табылатын жоғары қуат шығысына ие.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Зубарев, А. М., Кузин, И. А., Хабибова, Н. З.** Сравнительный анализ эффективности применения винтовых компрессоров // Успехи в химии и химической технологии – Москва, 2016. – С. 94 – 95.

2 **Беззубов, А. В.** Компрессоры для добычи нефти : Справ. рабочего / А. В. Беззубов, Е. И. Бухаленко. - М. : Недра, 1987. – 207.

3 **Быков, А. В., Калнинь, И. М., Канышев, Г. А., Шнепп, В. Б., Шварц, А. И., Верный, А. Л.** Освоение холодильных винтовых компрессоров [Development of refrigeration screw compressors] // Холодильная техника: М., 1974. № 2. с. 8-12

4 **Aimbetova, I. O., Baigenzhenov, O. S., Kuzmin, A. V., Aimbetova, E. O., Abzhalov, B. S., Dagubayeva, A. T.** Development of a new energy-intensive composition vanadium electrolyte and investigation reversible charge transfer mechanisms for use high-efficiency energy storage devices // NEWS Of The National Academy Of Sciences Of The Republic Of Kazakhstan. Series Of Geology And Technical Sciences. ISSN 2224–5278, Volume 5. Number 460 (2023), 22–34 p.

5 Интернет-ресурс – официальный сайт производителя компрессорных установок. – [Электронный ресурс]. – <https://kazan.v-p-k.ru/articles/article13/>

6 **Поникаров, И. И.** Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки. М.: Альфа-М, 2006. – 606 с.

7 **Stosic, N., Smith, I., Kovacevic, A.** Screw Compressors. Mathematical Modelling and Performance Calculation. – Berlin: Springer, 2005. – 144 p.

8 **Янчик, А. Д.** Способы регулирования производительности винтового компрессора / А. Д. Янчик ; науч. рук. В. В. Бабук / Инженерно-педагогическое образование в XXI веке : материалы Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, 24–25 мая 2018 г. – Минск : БНТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 243–247.

9 **Новоселов, А. С.** «Проектирование двухступенчатого винтового компрессора», магистерская диссертация, 2020г. – 74с.

10 **Fleming, J. S., Tang, Y., Cook, G.** Twin screw compressor, Part 1: development, application and competitive position, «Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers», Vol. 212 Part C, 2015.

REFERENCES

1 **Zubarev, A. M., Kuzin, I. A., Habibova, N. Z.** Sravnitel'nyj analiz effektivnosti primeneniya vintovyh kompressorov [Comparative analysis of the efficiency of screw compressors]// Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii – Moskva, 2016. – P. 94 – 95.

2 **Bezzubov, A. V.** Kompresory dlya dobychi nefti [Compressors for oil production]: Sprav. rabochego / A. V. Bezzubov, E. I. Buhalenko. - M. : Nedra, 1987. – 207.

3 **Bykov, A. V., Kalnin, I. M., Kanyshev, G. A., Shnepp, V. B., Shvarc, A. I., Vernyj A. L.** Osvoenie holodil'nyh vintovyh kompressorov [Development of refrigeration screw compressors] // Holodil'naya tekhnika: M., 1974. № 2. s. 8-12

4 **Aimbetova, I. O., Baigenzhenov, O. S., Kuzmin, A. V., Aimbetova, E. O., Abzhalov, B. S., Dagubayeva, A. T.** Development of a new energy-intensive composition vanadium electrolyte and investigation reversible charge transfer mechanisms for use high-efficiency energy storage devices // NEWS Of The National Academy Of Sciences Of The Republic Of Kazakhstan. Series Of Geology And Technical Sciences. ISSN 2224–5278, Volume 5. Number 460. – 2023. – P. 22-34 p.

5 Internet-resurs – oficial’nyj sajt proizvoditelya kompressornyh ustanovok [Online resource – the official website of the compressor plant manufacturer](<https://kazan.v-p-k.ru/articles/article13/>)

6 **Ponikarov, I. I.** Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv i neftegazopererabotki. M.: Al’fa-M, 2006. – 606 p.

7 **Stosic, N., Smith, I., Kovacevic, A.** Screw Compressors. Mathematical Modelling and Performance Calculation. – Berlin: Springer, 2005. – 144 p.

8 **YAnchik, A. D.** Sposoby regulirovaniya proizvoditel’nosti vintovogo kompressora [Methods of regulating the performance of a screw compressor]/ A. D. YAnchik ; nauch. ruk. V. V. Babuk / Inzhenerno-pedagogicheskoe obrazovanie v XXI veke : materialy Respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh i studentov, 24–25 maya 2018 g. – Minsk : BNTU, 2018. – CH. 2. – P. 243–247.

9 **Novoselov, A. S.** Proektirovanie dvuhstupenchatogo vintovogo kompressora [Machines and apparatuses of chemical production and oil and gas processing], masterskaya dissertatsiya, 2020g. – 74 p.

10 **Fleming, J. S., Tang, Y., Cook, G.** Twin screw compressor, Part 1: development, application and competitive position, «Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers», Vol. 212 Part C, 2015.

08.11.24 ж. баспаға түсті.

09.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

19.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**Д. Д. Басканбаева, К. К. Елемесов,*

Л. Б. Сабирова, А. С. Жумадилова

Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 08.11.24

Поступило с исправлениями 09.11.24.

Принято в печать 19.11.2024.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЖАТИЯ ГАЗА В ГОРНОЙ ИНДУСТРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Современные воздушные компрессоры, используемые в горнодобывающей индустрии, должны иметь высокий запас прочности при работе в сложных условиях: это и неровный рельеф, высокие перепады температур, работа под землей. Научные исследовательские разработки, как комплекс теоретических и экспериментальных исследований, проводится с целью получения обоснованных

исходных данных, изыскания принципов и путей создания компрессоров нового поколения для используемые в горнодобывающем месторождении.

Воздушные компрессоры используются в глубоких шахтах в том числе и для подачи чистого воздуха, поскольку в шахте его может не хватать. Компрессор может забирать наружный воздух, сжимать и фильтровать его, а затем подавать в туннель. Необходимо очень тщательно подходить к выбору компрессорного оборудования для использования в шахтах, поскольку существует множество потенциальных рисков и ограничений.

Базовая проблема, ее актуальность – в данной работе рассматриваются вопросы, связанные с устройством, работой и возможностью оптимизация конструкции винтового компрессора газоконпрессорной станции в горнодобывающей индустрии.

Моделирование процессов и построение блок-схем велось с использованием программ MathCad, Drawio, MS PowerPoint и др.

В результате проведенной работы определены оптимальный регулятор, способный управлять системой с минимальными затратами энергии.

Актуальность темы объясняется тем, что в Казахстане и других развивающихся странах уделяется особое внимания вопросу энергосбережения. Это требует повышения эффективности работы газоконпрессорного оборудования в целом и компрессорных станции в частности. Практическим значением является оптимальный регулятор, способный управлять системой с минимальными затратами энергии.

Ключевые слова: горнодобывающая индустрия, винтовой компрессор, сжатие газа, компримирование, энергоэффективность.

***D. D. Baskanbayeva, K. K. Yelemessov,**

L. B. Sabirova, A. S. Zhumadilova

Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 08.11.24.

Received in revised form 09.11.24.

Accepted for publication 19.11.24.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF GAS COMPRESSION IN THE MINING INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Modern air compressors used in the mining industry have a high margin of safety when operating in difficult conditions: This includes uneven terrain, high temperature differences and work underground. Scientific research, complex of theoretical and experimental studies, is carried out in order to obtain sound initial data, to find principles and ways to create a new generation of compressors for use in a mining field.

Air compressors are used in deep mines, including supplying clean air, since there may not be enough air in the mine. The compressor can take in outside air, compress and filter it, then feed it into the tunnel. It is necessary to choose

compressor equipment for use in mines very carefully; there are many potential risks and limitations.

The basic problem, its relevance – in this paper, the issues related to the device, operation and the possibility of optimizing the design of a screw compressor, gas compressor station in the mining industry are considered.

The modeling of processes and the construction of flowcharts were carried out using programs MathCad, Drawio, MS PP. A simplified mathematical model of a screw compressor is obtained.

Of the work carried out, the optimal regulator capable of controlling the system with minimal energy consumption has been determined.

The relevance of the topic is explained by the fact that in Kazakhstan and other developing countries special attention is paid to the issue of energy conservation. This requires an increase in the efficiency of gas compressor equipment in general and compressor stations in particular. The practical value is an optimal regulator capable of controlling the system with minimal energy consumption.

Keywords: mining industry, screw compressor, gas compression, compression, energy efficiency.

***К. М. Бейсембаев, Г. Б. Абдугалиева, Н. С. Малыбаев,
Д. Е. Оразбеков, Ж. Т. Акижанова**

Карагандинский технический университет имени Абылжаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0954-2936>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3469-3901>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-7400>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1699-0676>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7873-8847>

*e-mail: kakim08@mail.ru

РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПОР МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ С ШЕРОХОВАТОЙ КРОВЛЕЙ

Секция крепи – программно-управляемый робот. Его нагруженность – идентификационный критерий для маневрирования машины и обеспечения устойчивости забоя. Нагруженность как распределение давлений по поверхности его опор и шарниров рычагов, создает напряженно-деформированное состояние системы. Её параметры определяются видом сдвижения кровли. Исследованы особенности расчета давлений на опоры робота в зависимости от расположения шероховатостей от обработки забоя комбайном и распределенных по нормальному закону. Величины давлений зависят от параметров опор и расстояния до забоя. Учтено повышение взаимодействия торцевые части с шероховатостями кровли, вызывающих их износ и затупление. Предложены новые элементы к системе расчета нагрузок с применением технологии динамического программирования MS Adams. Показано: трехзональная схема опорных элементов для объемного взаимодействия может вырождаться в двухзональную. Моделирование связей опор и с породами шарнирами Translational joint, Culindrical joint, Parallel joint позволило учесть реальное взаимодействие с шероховатой кровлей в отличие от схем со сплошным контактом. Разработанная методика позволяет учесть и момент, когда опора робота входит в зону свежего обнажения, а перекрытие нагружено уже отделившимся и смещающимся блоком кровли.

Ключевые слова: уравнения, динамика, нагруженность, опора, робот.

Введение

Современная крепь имеет 24 датчика определяющих нагруженность её элементов и возможности программного управления при движении. При этом обеспечивается маневрирование секций для разворотов забоя при обходе геологических нарушений и переходах на новый участок [1-3]. Это позволяет вовлечь в добычу сложнзалегавшие запасы минералов, которые для угля не менее

добытых. Вывалы пород из кровли и отжим угля с груди забоя, усиливающиеся при встрече с геологическими нарушениями, создают опасность персоналу и приводят к остановке работ. Управление этим зависит от особенностей формирования нагрузки на крепь. Установлено, что на неё влияют особенности шероховатости поверхности кровли, параметры опорного козырька и перекрытия секции. Шероховатости поверхности кровли состоят из впадин и выступов от неравномерной обработки забоя шнеком комбайна и накрадывающихся на них вывалов из кровли. Нагруженность определяется распределением давления по поверхности контакта опор с породами, что создает реакции в шарнирах рычажной системы крепи и напряжённо-деформированное состояние деталей (НДС), определяющее зоны, максимальных деформаций и износа. Комплексное воздействие на кровлю опор и сдвигения пород на кинематическую систему секции достаточно неизученное. И связано с тем, что кроме знания о распределениях давлений в зонах взаимодействия, нагруженность металлоконструкции сильно зависит от кинематики соединения рычагов. Т.е. конструкция крепи существенно влияет на напряжения в деталях. И в частности, на лемнискатный механизм, связывающий ограждение и основание секции. Управление секцией как роботом, определяется программным обеспечением крепи и важным её элементом является возможность идентификации состояния забоя, управляемого опорами. Передвижка на забой секции крепи для улучшения состояния забоя может производиться и при сохранении частичного распора гидростоек, когда нагруженной остаётся вся металлоконструкция секции. В зависимости от особенностей НДС, программно может приниматься решение о виде передвижки секций: последовательно одна за другой, одновременной в шахматном порядке без сохранения распора и при его частичном сохранении.

Материалы и методы

Основаны на системном анализе взаимодействия, выборе и обосновании способов, учитывающих статическое и динамическое смещение пород на секцию. Многообразие системы определяют использование метода линеаризации уравнений динамики, который широко представлен в MS Adams, но нуждается в тщательном выборе схем нагружения и области использования моделей, поскольку в пакете используется лагранжиан теории Эйлера – Лагранжа, который должен иметь производные второго порядка с механикой без разрывов. Расчетная схема включает пласт, забой над которым зависит порода непосредственной кровли (НК). Её поддерживают опоры и перекрытие секции. Распор гидростоек достигает 1800 кН и в зоне торца опор происходит сдвиг, вызывающий трещины, направленные вверх. Они возникают и в зоне опорного давления. Слои ОК нагружены относительно равномерно, поэтому их разрушение происходит от изгиба в зоне, где горизонтальные нормальные напряжения достигают максимума (рисунок 1). Если пласт у забоя трещиноват в результате действия опорного давления, то он проседает, и изгибная трещина возникает в глубине забоя. Она направлена от верхнего контура ОК вниз к пласти. Затем она переходит и на НК. Возникший блок из НК и ОК (БНО) может иметь форму прямоугольной обратной

трапеции. Он нагружает перекрытие робота и наклоняется в сторону почвы выработанного пространства. Эти процессы и определяют НДС и особенности работы робота. Так за опорой НК, из – за сильной трещиноватости, обрушается сразу. Порода же, залегающие выше слоев ОК вплоть до земной поверхности (КЗП) плавно (без разрушения) опускаются на обрушенные породы (ОП). Эти факторы позволяет создавать программы отслеживания процессов сдвижения и обрушения кровли при движении забоя [2, 4]. БНО же после формирования, является основным в формировании нагрузок на секции крепи. И это будет продолжаться до тех пор, пока секция не выедет за пределы длины БНО и начнется формирование следующего БНО, (рисунок 2).

Результаты и обсуждение

Распределение нагрузки от крепи на кровлю зависит от условий взаимодействия опоры с кровлей и определяется, по вероятностной оценке, [5, 6]. Шахтные эксперименты позволили рассмотреть новые схемы. Ранее в [7] была описана схема расчета взаимодействия кровли и перекрытий для условий, когда их встреча происходит в случайно расположенной зоне и вероятность такой встречи одинакова для возможных участков. Но нами было установлено, что она допустима при $K_n \geq 0,3$, где K_n - (отношение нарушенной площади кровли к общей). При целостной же кровле, характерной для современных лав имеют место другие закономерности. Для крепи «Глиник» - схема взаимодействия с кровлей включает перекрытие и консольную опору с гидропатроном. Она может взаимодействовать в зонах с расстоянием от забоя кратным захвату комбайна. Установлено, что длина козырька для крепей типа ОКП 70 должна быть не менее 1100 мм, при одинаковой его забойной и завальной части. Если это не выполнимо и длина забойной части больше, то её поддерживают гидропатроном. Это объясняется тем, шаг выступа или впадины шероховатости равен 0.5 м – захвату комбайна, и от шарнира опоры сзади и спереди они должны располагаться по одному. Установлено, что зонах контакта действуют силы реакции и для расчета их значений применяют уравнения равновесия. Схемы расчета исходят из равной вероятности распределения этих зон по длине, но могут иметься преимущественные зоны (ОЗ), из-за выступов и впадин от шнека, рисунок 1. Высота h_v и угол наклона γ поверхностей выступов определяются не менее чем 9 случайными факторами (наклоном на забой комбайна, неточностью установки рукояти и корпуса комбайна, неравномерными нагрузками на шнек от сопротивления резанию и подачи, поперечными и продольными смещениями рештаков вывалами пород, и др.) поэтому распределение параметров шероховатости имеет нормальный закон. Для всех типов перекрытий и козырьков выявлено явное повышение количества ОЗ на их концах [8]. Причина этого в том, что концы с большей скоростью проворачиваются после возникновения первичного случайного контакта, что и предопределяет их более вероятную встречу с кровлей. Шахтные наблюдения показывают, что отклонение ширины неподдерживаемой полосы кровли от проектной в сторону увеличения вызывает вывалообразование и остановку работ. Причины повышения этого параметра показаны на рисунке 1. К ним относятся неподвижка конвейера к забою δ_{HKB} из-

за не полной погрузки угля, «ступенек» в почве и дугообразности самого забоя. $\delta_{нкв}$ определяется подвижностью межрештачных связей рештаков и возможности удержания става от смещения. Поэтому в новых конструкциях создается связь между ставом конвейера и основаниями секций крепи, за счет гидродомкратов. Но это не относится к схемам, когда имеется погрузчик на комбайне. Так в США имеются разработки с захватом комбайна на гусеничном ходу до 1, 5 м, а погрузчиком уголь грузится на ленточный поворотный конвейер. Следующей причиной является угловое смещение комбайна на забой из-за смещения его центра тяжести к пласту:

$$\delta_{\alpha} = K \cdot m_{пл} = m \cdot \sin \alpha; \tag{1}$$

$$K = K_1 \cdot K_2 \tag{2}$$

где K-коэффициент пропорциональности;

m - вынимаемая мощность пласта.

K_1 связан с эксцентриситетом центра тяжести комбайна относительно продольной оси конвейера и характеристиками почвы пласта, K_2 зависит от технологии работ, так для лавы, работающей по простиранию $K_2 = 1$, по восстанию $K_2 < 1$, по падению $K_2 > 1$. Введен и параметр δ_t который зависит от технологии работ. Так, для почвоуступной выемки полоса не поддерживаемой кровли увеличивается на ширину захвата b, а для прямолинейного забоя $\delta_t = 0$. Отжим угля, создает зазор δ_o . Имеется и случайный по величине зазор $\delta_{вв}$, зависящий от особенностей взаимодействия козырьков с кровлей, ($0 > \delta_{вв} > L$), где L- расстояние от забойного торца до шарнира козырька. Включен и зазор, вызываемый прочими причинами $\delta_{п}$ и номинальный зазор между козырьком и грудью забоя $\delta_{п}$

$$\delta_{нк} = K \cdot m + \delta_t + \delta_{вв} + \delta_{п} + \delta_o + \delta_{нкв} + \delta_{п} \tag{3}$$

δ_o - принимают на основе экспериментальных данных или на основе расчетных методов. Параметр $\delta_{нк}$ зависит и от культуры обслуживания. $\delta_{п}$ учитывает и отставание крепи, которое происходит во всех забоях и уменьшить его можно для роботов. Если режим передвижки будет таков, что консольные козырьки упрутся в выступы над шарнирами (преимущественные зоны контакта) тогда возникают обширные обнажения до 1,2 м, занимающие до 30 % длины лавы. Изменить это можно подпором козырек гидропатроном с разрушением встречающихся выступов торцом козырька. Особенности расчетов была приведены в [8], рисунок 2. Вероятности взаимодействия для i-го участка:

$$P_i = \frac{2A^2(i - k)}{2(L - x_0)(x_0 - A \cdot k) + [x_0 + A(1 + n)]nA} , \tag{4}$$

P_i рассчитывается при k -м начальной ОЗ, которая происходит случайно и возможна на любом участке козырька. Затем P_i берут как среднюю из всех возможных случаев. Для случая: $AK \leq x_0$ и $i > K$;

$P_i = 0$. Начальные ОЗ, происходящие случайно должны быть учтены для всех случаев. При $AK > x_0$ формула такова:

$$P = \frac{2A^2[K - i + 1]}{x_0(2AK - x_0 + A)} \quad (5)$$

Формулы рассчитаны из условия разбиения опорной поверхности на равные интервалы. Возможные ОЗ легко имитировать на ПК. Это по рисунку 2 производится расчетом значений при $i=1$ вероятностей взаимодействия участков для всех K от 1 до L/A . При этом учитываем, что для $KA < x_0$ и $i < K$ вероятности нулевые. Далее задается $K=2$, затем $K=3$ и т.д. и рассчитывается среднее. Учтем, что рассмотрены односторонние не равновероятные ОЗ, при этом начальные ОЗ равновероятны.

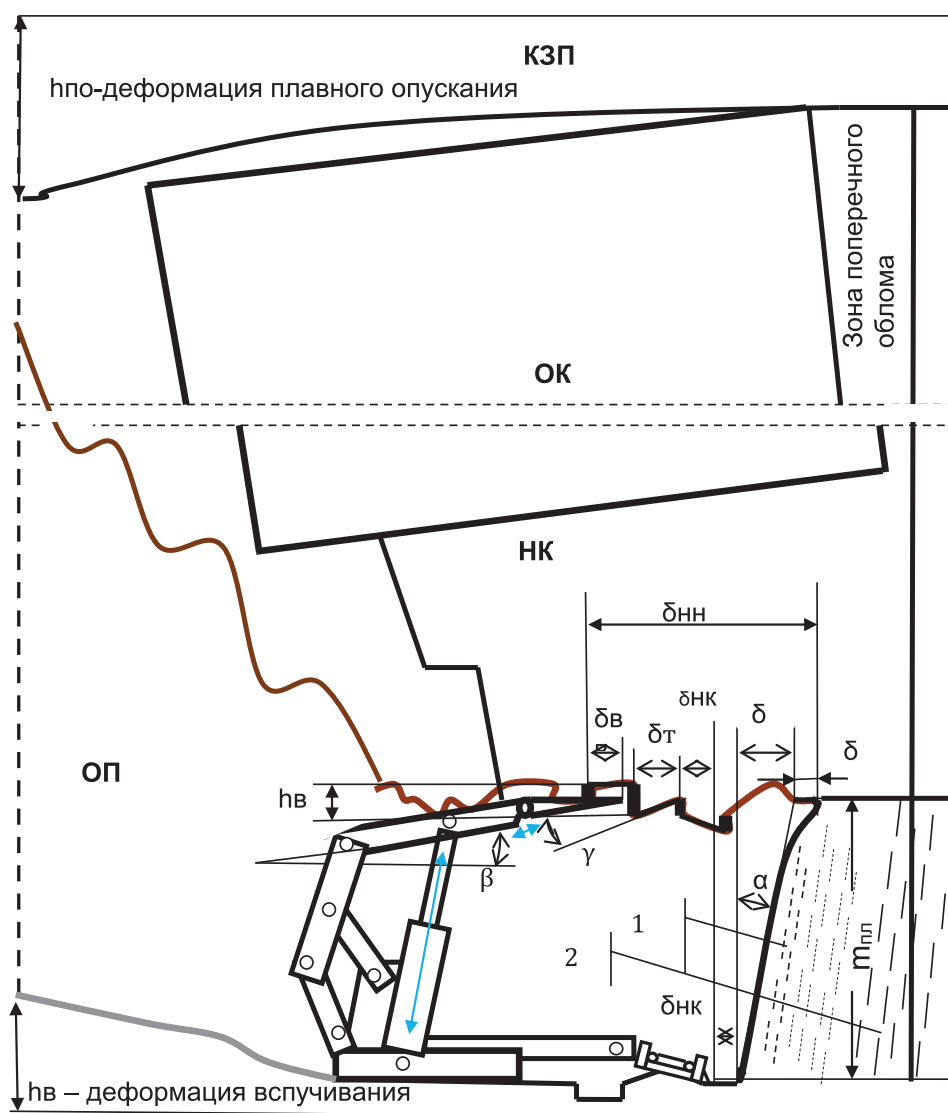


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения параметров шероховатости и нагруженности секции робота

Учет не равновероятного взаимодействия повышает количество ОЗ на торцах опорных элементов, и вызывает их затупление, что подтверждено экспериментами. Это учтено в (1). Передний торец при передвижке разрушает угольную пачку, оставляемую перед ним при неустойчивой кровле. Он выполняется заостренным, и поэтому его необходимо упрочнять, либо снабжать сменным наконечником.

В плоском решении опорных зон две, а в объемном 3.

Это существенно изменяет схемы расчета взаимодействия крепи с кровлей. Наша методика позволяет определить длину призабойной и неподкрепленной зон. С учетом схемы на рисунке 1 можно определить момент отделения блока непосредственной и основной кровли и рассчитать нагрузки на ОЗ опор с кровлей

исходя из кинематической схемы крепи, имеющей лемнискатный механизм, при заданном распоре и сопротивлении гидростойки. Применением Adams технологии связи опоры с кровлей в указанных зонах удастся смоделировать восприятие нагрузки от отделившегося блока БОН, который в ОЗ может скользить по опоре с заданными коэффициентами статического и динамического трения и полностью воссоздать особенности нагружения секции крепи, что расширяет возможности метода [9]. ОЗ и проскальзывание задаются с применением системы шарниров типа Translational joint, Cylindrical joint и Parallel joint в режиме inline [10]. Их расположение может учитывать и особенности несимметричного нагружения секции.

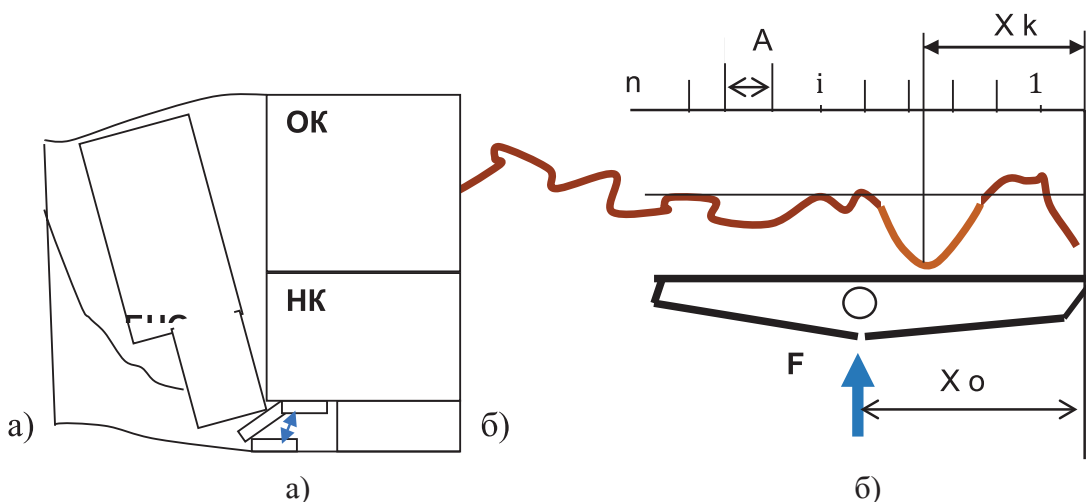


Рисунок 2 – К расчету взаимодействия на торцах опор

Для реализации трехзональной схемы связь с перекрытием должна быть на основе центрального шарового шарнира, или поворотных по краям. В последнем случае может возникнуть асимметрия нагрузки на секцию. Её уменьшение достигается увеличением зазоров между отверстиями и пальцами – осями, что также имеет и недостатки: усилится износ их поверхностей. Учет асимметрии возможен применением Adams технологии, рисунок 3. В частности, можно моделировать случай, когда взаимодействие придется только на одну из сторон крепи, где следует и установить связывающие с кровлей шарниры.

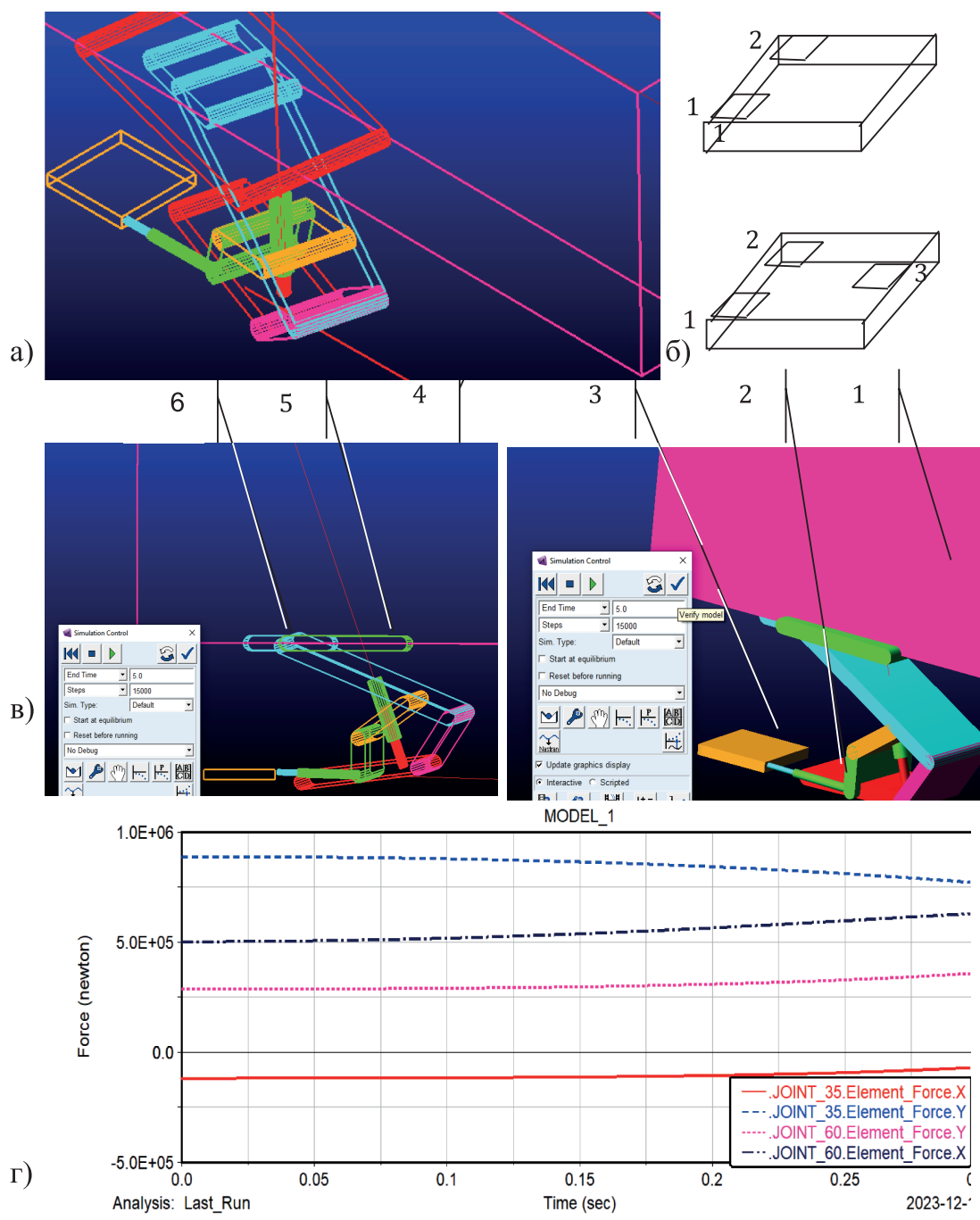


Рисунок 3 – К расчету нагруженности секции робота при движении с разворотом

- а) 1- слои пород, 2, 3 – домкрат и рештак, 4 – гидроопора, 5- вставка для вращательной связи кровли с опорой; б) асимметричная схема нагружения кровли; в) поступательная связь вставки с опорой;
- г) графики реакций в центральных шарнирах опоры 35 и верхнего рычага 60

Связь с кровлей может быть осуществлена через группу шарниров комбинированных или плоскостных с возможностью проскальзывания опоры и основания по трем осям, что позволяет осуществить имитацию маневрирования робота при камерной выемке. Его перемещение происходит подтягиванием к конвейеру (представлен один рештак). Скольжение достигнуто размещением вставки между опорой и породой. Имеем связи между слоем и вставкой и вставкой с опорой, основанием и почвой шарнирами Parallel joint в режиме inline по оси секции. Осуществлены подтягивание и разворот робота. Для полного цикла разворота забоя, на 180° далее следует зафиксировать секцию и передвинуть конвейер с поворотом на угол α , после чего вновь подтянуть секцию. Циклы будут повторяться до тех пор, пока не будет достигнут нужный угол. Передвижка осуществлена при смещении слоя пород 1, нагружающего опору. Представлены графики усилий по осям в шарнирах опоры 35 и лемнискатном механизме верхнего рычага 60. Схема приводит к некоторым наклонам основания, что принципиально не сказывается на величинах реакций. Для оптимизации схемы вес вставки должен быть минимальным. Применены комбинации и простых шарниров: вставка связана с породой Translational joint или Cylindrical joint, с применением вращательного вертикального шарнира, а вставка с опорой как в первой схеме, рисунок 4. В этом случае получили полную аналогию движения без наклона основания, позиция а), величины усилий близки г). Понятен и скачок скорости движения робота в начальный момент, за счет срыва из неподвижного состояния. В обоих случаях не смотря на нагрузку опор, усилие передвижки робота в 400 кН оказалось достаточным. В первом случае нагруженность секции происходила от двух слоев, а во втором - одного, но усилие на гидростойку определялась в 1500 кН, чем достигалась имитация срабатывания предохранительного клапана, поэтому практически нагрузка на опору – козырек практически не менялась. Затем усилие срабатывания клапана было уменьшено в 2 раза, как и ожидалось усилие в шарнире 35 пропорционально снизилось. Прямолинейное движение секции достигается и без вставки, позиция в), графики усилий и скорости д). Во всех схемах принципиальных отличий в усилиях не зафиксированно, хотя при повороте линейная скорость выше прямолинейного движения, что вполне логично.

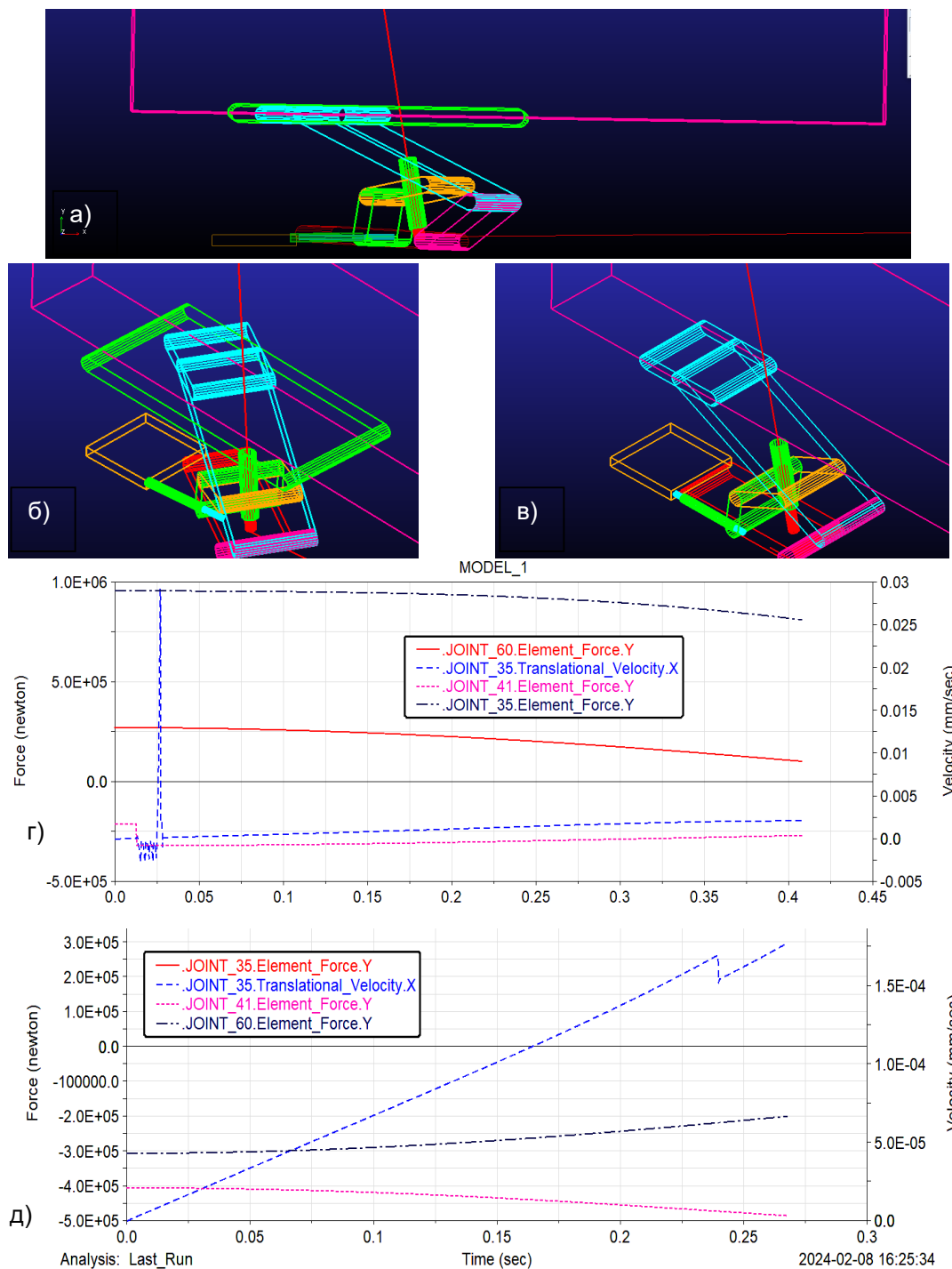


Рисунок 4 – Маневрирование по схеме 2
 а) вид сбоку, б) вид в плане, в) график нагруженности

Выводы

Шероховатость кровли изменяет взаимодействие с опорными элементами, перемещающегося робота. Разработаны связи опор с кровлей и получены динамические модели движения робота при смещающейся кровле и секции под нагрузкой гидростоек при прямолинейном движении и маневрировании, уточнены сложный случаи при резко не симметричном нагружении секции за счет применения поступательных шарниров, связывающих опорный элемент секции с почвой и смещающимся блоком пород. Получено выражение расчета

длины полосы кровли для современных типов крепи, учтено повышение контактируемости торцов опор, приводящее к их износу. Показано, что величина усилия до 400 кН достаточна для перемещения робота при частичном и полном распоре гидростойки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жетесова, Г. С., Бейсембаев, К. М., Малыбаев, Н. С., Юрченко, В. В., Шманов М. Н.** Разработка базовой технологии выемки ископаемого с поворотом конвейера на 90° // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. № 8. – С. 37–49.

2 **Говорухин, Ю. М., Риб, С. В.** Моделирование численными методами процессов обрушения пород кровли // Горный журнал. – 2019. – № 4. С. 23–26.

3 **Ройтер, М., Крах, М., Кислинг, У., Векслер, Ю.** Эффективность работы механизированных очистных забоев с системой управления марко «Цифровая шахта» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 2. № 1. С. 176–181.

4 **Talli, A. L., Kotturshettar, B. B.** Forward Kinematic Analysis, Simulation & Workspace Tracing of Anthropomorphic Robot Manipulator by Using MSC// ADAMS. – 2015. – V. 4. – № 1. – P. 18462–18468.

5 **Матвеев, В. А., Матвеев, А. В.** Метод расчета напряжений в кровле очистного забоя // <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-napryazheniy-v-krovle-ochistnogo-zaboya/viewer>. – 2012. С. 45–49.

6 **Pango Mahalingam, Chandramouli Padmanabhan.** Planar multi-body dynamics of a tracked Vehicle using Imaginary Wheel model for tracks // Defence Science Journal. – 2017. – V. 67. – № 4, July. – P. 460–464.

7 **Дубовский, Ю. П., Потапенко, В. А.** Испытание поддерживающего элемента оградительно-поддерживающей крепи для неустойчивой кровли // Уголь. – 1984. – № 6, С. 30–34.

8 **Бейсембаев, К. М., Жетесов, С. С., Шманов, М. Н.** Геомеханические основы расчёта параметров разработки угля в нестационарных системах, монография. // Караганда. – Изд-во КарГТУ. – 2010. – 207 с.

9 **Gaofeng Song, Yoginder Chugh, Jiachen Wang.** A numerical modelling study of longwall face stability in mining thick coal seams in China // Int. J. of Mining and Mineral Engineering . – 2017. – Vol.8. – № 1. – С. 35–55.

10 **Ashok, K. J., Partha, P. R.** Modeling and Simulation of SCORA-ER14 Robot in ADAMS Platform// International Journal of Engineering and Technical Research. – 2014. – V. 2. – July. – С. 105–109.

REFERENCES

1 **Zhetesova, G. S., Bejsembaev, K. M., Maly`baev, N. S., Yurchenko, V. V., Shmanov, M. N.** Razrabotka bazovoj texnologii vy`emki isko-paemogo s povorotom konvejera na 90° [Development of the basic technology of excavation of the excavated with a 90° rotation of the conveyor] // Izvestiya Tomskogo poli-texnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. – 2018. – T. 329. № 8. – P. 37–49.

2 **Govoruxin, Yu. M., Rib, S. V.** Modelirovanie chislenny`mi meto-dami processov obrusheniya porod krovli [Modeling by numerical methods of roof rock collapse processes] // Gornyj zhurnal. – 2019. – № 4. P. 23 – 26.

3 **Rojter, M., Krax, M., Kisling, U., Veksler, Yu.** E`ffektivnost` raboty` mexanizirovanny`x ochistny`x zaboev s sistemoy upravleniya marko «Cifrovaya shaxta» [The efficiency of mechanized treatment faces with the control system of marko "Digital mine"] // Fundamental`ny`e i prikladny`e vo-prosy` gornyx nauk. – 2014. – T. 2. – № 1. – P. 176–181.

4 **Talli, A. L., Kotturshettar, B. B.** Forward Kinematic Analysis, Simulation & Workspace Tracing of Anthropomorphic Robot Manipulator by Using MSC// ADAMS. – 2015. – V. 4. – № 1. – P. 18462–18468.

5 **Matveev, V. A., Matveev, A. V.** Metod rascheta napryazhenij v krovle ochistnogo zaboya//<https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-napryazheniy-v-krovle-ochistnogo-zaboya/viewer>. – 2012. – P.45–49.

6 **Iango Mahalingam, Chandramouli Padmanabhan.** Planar multi-body dynamics of a tracked Vehicle using Imaginary Wheel model for tracks // Defence Science Journal. – 2017. – V. 67. – № 4, July. – P. 460–464.

7 **Dubovskij, Yu. P., Potapenko, V. A.** Ispy`tanie podderzhivayu-shhego e`lementa ograditel`no-podderzhivayushhej krepki dlya neustojchivoj krovli [Testing of a supporting element of a protective and supporting sup-port for an unstable roof] // Ugol` – 1984. – № 6, P. 30–34.

8 **Bejsembaev, K. M., Zhetesov, S. S., Shmanov, M. N.** Geomechaniche-skie osnovy` raschyota parametrov razrabotki uglya v nestacionarnyx sistemax, monografiya [Geomechanical foundations for calculating coal mining parameters in non-stationary systems, monograph]. Karaganda 2010, izd-vo KarGTU, P. 207.

9 **Gaofeng Song, Yoginder Chugh, Jiachen Wang.** A numerical modelling study of longwall face stability in mining thick coal seams in China // Int. J. of Mining and Mineral Engineering . – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 35–55.

10 **Ashok, K. J., Partha, P. R.** Modeling and Simulation of SCORA-ER14 Robot in ADAMS Platform// International Journal of Engineering and Technical Research. – 2014. – V. 2. – July. – P. 105–109.

Поступило в редакцию 18.04.24.

Поступило с исправлениями 29.09.24.

Принято в печать 01.10.2024.

***К. М. Бейсембаев, Г. Б. Абдугалиева, Н. С. Малыбаев,**

Д. Е. Оразбеков, Ж. Т. Акижанова

Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

18.04.24 ж. баспаға түсті.

29.09.24 ж. түзетулерімен түсті.

01.10.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

МЕХАНИКАЛАНДЫРЫЛҒАН ТІРЕКТЕРДІҢ ӨРЕСКЕЛ КРОВЛЯМЕН ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІН ЕСЕПТЕУ

Бекіту секциясі - бағдарламалық басқарылатын робот. Оның жүктемесі – машинаны маневрлеуге және кенжардың тұрақтылығын қамтамасыз етуге арналған сәйкестендіру критерийі. Жүктеме оның тіректері мен рычаг буындарының бетіне қысымның таралуы ретінде жүйенің кернеулі деформацияланған күйін анықтайды. Оның параметрлері кровлядың жылжу түрімен де анықталады. Робот тіректеріне қысымды есептеу ерекшеліктері комбайнмен кенжарды өңдеуден және қалыпты заңға сәйкес бөлінуден кедір-бұдырлардың орналасуына байланысты зерттелді. Қысым шамалары тіректердің параметрлеріне және кенжарға дейінгі қашықтыққа байланысты. Олардың ұштарының кровляның кедір-бұдырларымен өзара әрекеттесуінің жоғарылауы ескеріледі, сондықтан олар тозады және күңгірттенуіледі. MS Adams пакетін динамикалық бағдарламалау технологиясын қолдана отырып, жүктемелерді есептеу жүйесіне жаңа элементтер ұсынылды. Көрсетілген: көлемдік өзара әрекеттесуге арналған тірек элементтерінің үш аймақтық схемасы екі аймаққа айналуы мүмкін. Translational joint, Cylindrical joint, Parallel joint буындарымен тіректер мен жыныстармен байланыстарды модельдеу қатты контактілі схемаларға қарағанда өрескел кровлямен нақты өзара әрекеттесуді ескеруге мүмкіндік береді. Әзірленген әдіс роботтың тірегі жаңа әсер ету аймағына енетін сәтті ескеруге мүмкіндік береді, ал еден қазірдің өзінде бөлінген және жылжымалы шатыр блогымен жүктелген.

Кілтті сөздер: теңдеулер, динамика, жүктеме, тірек, робот.

***К. М. Beisembaev, G. B. Abdugalieva, N. S. Malybaev,**

D. E. Orazbekov, Zh. T. Akizhanova

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda

Received 18.04.24.

Received in revised form 29.09.24.

Accepted for publication 01.10.24.

**CALCULATION OF INTERACTION OF MECHANIZED
SUPPORT LEGS WITH ROUGH ROOFS**

A section of the support is a program-controlled robot. Its load is an identification criterion for maneuvering the machine and ensuring the stability of the face. The load as a distribution of pressures on the surface of its supports and arm joints determines the stress-strain state of the system. Its parameters are also determined by the type of roof shear. The peculiarities of the calculation of pressures on the robot's supports depending on the location of roughnesses from the processing of the face by a combine harvester and distributed according to the normal law have been studied. The values of pressures depend on the parameters of the supports and the distance to the bottom-hole. Increased interaction of their end parts with roof roughnesses causing their wear and blunting is taken into account. New elements to the system of load calculation with the use of dynamic programming technology of MS Adams package are proposed. It is shown: a three-zone scheme of support elements for volume interaction can degenerate into a two-zone scheme. Modeling of connections of supports and with rocks by Translational joint, Cylindrical joint, Parallel joint allowed to take into account real interaction with rough roof in contrast to schemes with continuous contact. The developed method allows to take into account the moment when the robot support enters the zone of fresh outcrop, and the slab is loaded by the already separated and shifting roof block.

Keywords: equations, dynamics, loading, support, robot.

***А. С. Берг¹, О. А. Нуржанова², О. М. Жаркевич³, А. А. Берг⁴**

^{1,2,3,4}Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda,
Republic of Kazakhstan, Karaganda

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0528-640X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0984-9284>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4249-4710>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8907-1803>

*e-mail: kibeko_1995@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ МРС И КРАН-БАЛКИ С ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Актуальность исследования обусловлена растущими требованиями к точности и качеству обработки деталей в машиностроении и строительстве. Статья посвящена изучению возможности применения метода конечных элементов (МКЭ) для оптимизации конструкций металлорежущих станков и строительного оборудования, в частности, кран-балок.

В работе проведены расчеты методом конечных элементов для различных геометрий станин кран-балок и станин металлорежущих станков. Проведен анализ деформации, напряжения и частоты собственных колебаний конструкций. Результаты показали, что применение МКЭ позволяет оценить прочность и жесткость конструкций, выявить зоны повышенных напряжений и оптимизировать геометрию для повышения их несущей способности. Особое внимание уделено использованию новых материалов и конструктивных решений. Так, было рассмотрено применение полимербетона в качестве материала для изготовления станин металлорежущих станков, а также использование ребер жесткости с переменным шагом для повышения прочности и жесткости конструкций.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения МКЭ для оптимизации конструкций станков и строительного оборудования. Разработанные на основе МКЭ модели позволяют повысить точность и надежность работы оборудования, снизить материалоемкость и затраты на производство.

Ключевые слова: МКЭ, оптимизация конструкций, МРС, кран-балки, полимербетон, прочность, жесткость.

Введение

Быстрое развитие машиностроения и строительства в Казахстане ставит все более высокие требования к качеству и точности производимой продукции, особенно к длинномерным цилиндрическим деталям. Точность обработки напрямую зависит от состояния станка: его жесткости, виброустойчивости и

прогиба. Станина, основание и опоры станка испытывают при работе значительные нагрузки.

В строительной отрасли также актуальна проблема крупногабаритного оборудования. Оно должно быть прочным, надежным и безопасным, что требует использования новых материалов и технологий. Типичный пример такого оборудования – кран-балка, несущая балка которой подвергается наибольшей нагрузке.

С растущими требованиями к точности и надежности в машиностроении и строительстве Казахстана, актуальной становится задача применения новых материалов и технологий для изготовления несущих систем станков и строительного оборудования, таких как кран-балки и станина МРС. Использование полимербетона в станкостроении и строительстве открывает широкие перспективы для создания более эффективных, долговечных и экологически чистых конструкций. Применение композиционных материалов является актуальной задачей, которая позволит достичь повышения точности и жесткости конструкций, снизить вибрации и шум, увеличить срок службы оборудования.

Материалы и методы

Метод конечных элементов (МКЭ) широко применяется для анализа конструкций в станкостроении и строительстве, позволяя получить точные модели деформаций. Однако, несмотря на свою эффективность, МКЭ в текущем виде не дает конструктору четких рекомендаций по улучшению конструкции, а поиск оптимального варианта ограничивается возможностями инженера. [1; 2, с. 41; 3].

Моделирование методом конечных элементов позволяет получить довольно точную картину того, как будет деформироваться конструкция под нагрузкой [4, с. 12]. Однако, несмотря на эту точность, МКЭ в основном используется для анализа существующей конструкции, а не для ее оптимизации. Он не дает конструктору четких рекомендаций о том, как изменить конструкцию, чтобы она стала лучше [5, с. 14]. Лучшая конструкция выбирается на основе просчета МКЭ нескольких возможных вариантов. Текущий подход к оптимизации конструкций с помощью МКЭ имеет существенное ограничение: он зависит от человеческого фактора. В реальности существует огромное количество возможных комбинаций параметров, которые инженер просто не успевает проверить. Таким образом, найденное решение может быть хорошим, но не обязательно самым лучшим из всех возможных.

Новые подходы в проектировании станков основаны на использовании передовых технологий, таких как сочетание МКЭ и методов оптимизации, что открывает новые возможности для создания более совершенных конструкций [1, 6, 7].

Основные габаритные размеры металлорежущего станка и строительного оборудования задаются на этапе технического задания. Основываясь на данных, полученных при моделировании методом конечных элементов, конструктор определяет оптимальные размеры несущих элементов станка или строительных конструкций. Для этого он применяет как современные методы компьютерного

моделирования, так и традиционные расчеты по сопротивлению материалов, чтобы гарантировать прочность и жесткость конструкции, необходимые для достижения заданной точности и производительности обработки. [8].

В ходе выполнения исследований на первом этапе был рассмотрен статический анализ математической модели корпусов станин кран – балки методом конечных элементов инструментом BETA CAE System, ABAQUS.

При проектировании станин MPC и кран – балок в строительстве была использована модель оптимизации конструкций, основанная на методе Дэвидона – Флетчера – Пауэлла, где основа ограничений g это качество конструкции станины, кран – балки (прогиб), а целевой функцией является масса станины, кран – балки. Данный метод позволил найти наиболее эффективное решение с точки зрения прочности, жесткости и массы конструкции.

Цель исследования состояла в оптимизации геометрии станка для повышения его точности и производительности. Первая модель (рисунок 1), имеющая стандартную геометрию, была подвергнута статическому и динамическому анализу с наложением сил тяжести, были получены следующие результаты: деформация по оси Z (прогиб модели) равная 5,54 мм (рисунок 2), а также внутренние напряжения по Von Mises, в месте максимального прогиба, равные 61,10 Мпа (рисунок 3). Результаты показали значительные деформации и напряжения в конструкции, что может негативно сказаться на качестве обработки.

Частотный анализ стандартной геометрии из стали (рисунок 4) показал что при частоте колебаний 1,9 Гц в следствие чего возникает деформация равная 1,61 мм.

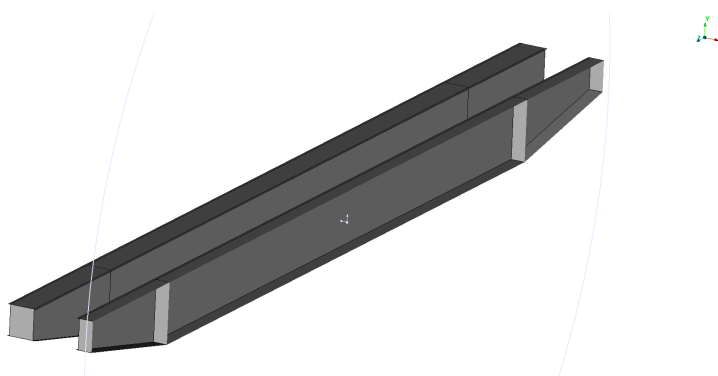


Рисунок 1 – Стандартная геометрия кран-балки из стали

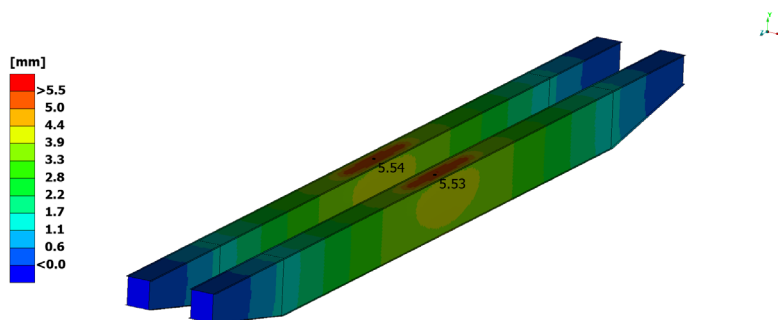


Рисунок 2 – Полученный продольный прогиб кран-балки из стали

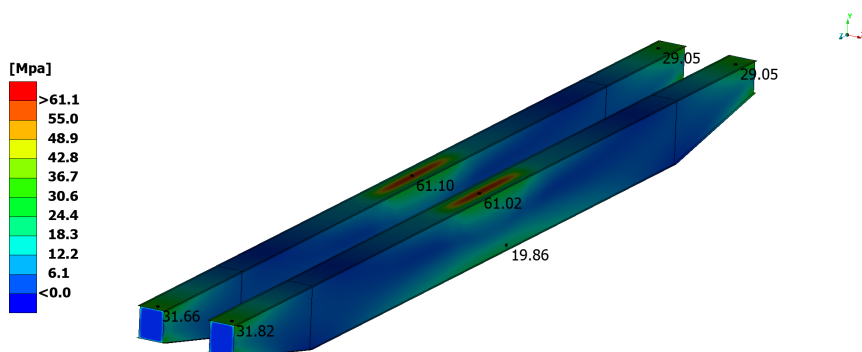


Рисунок 3 – Напряжения по Von Mises, в месте максимального прогиба при наложении статической нагрузки

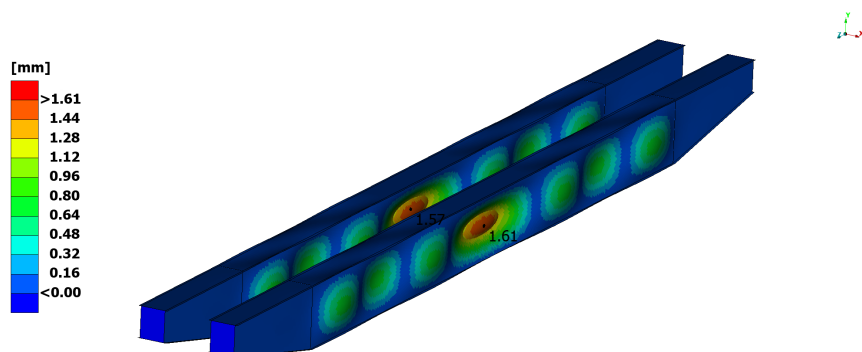


Рисунок 4 – Частотный анализ стандартной геометрии из стали

Следующая модель станка из полимербетона с новой геометрией (геометрия X), статического анализа данной модели при наложении сил тяжести показал: максимальная деформация по оси Z (прогиб модели) равная 6,81 мм (рисунок 6), внутренние напряжения по Von Mises, в месте максимального прогиба равные 44,27 МПа (максимальное напряжение в местах крепления каретки – держателя с грузом) (рисунок 7).

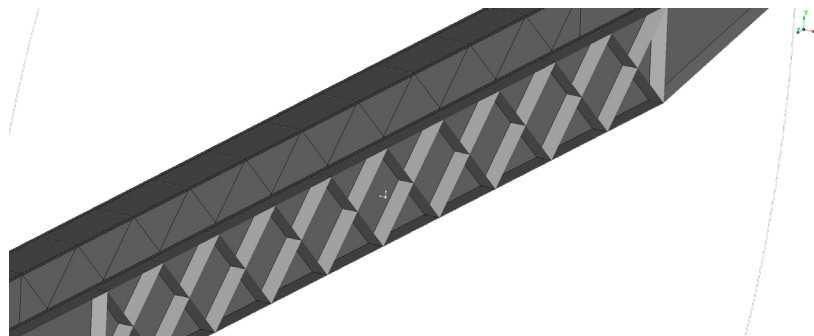


Рисунок 5 – Геометрия кран-балки из стали с геометрией X

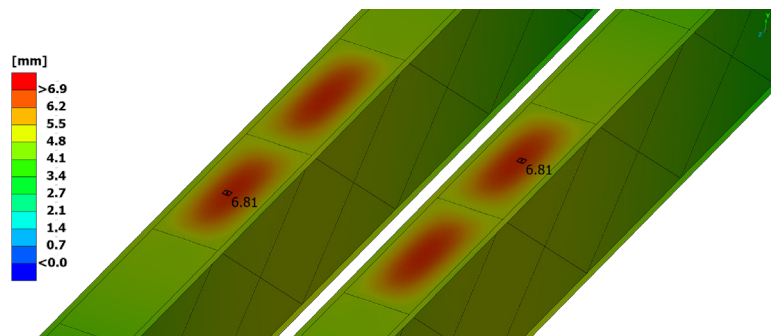


Рисунок 6 – Максимальная деформация по оси Z кран-балки с геометрией X

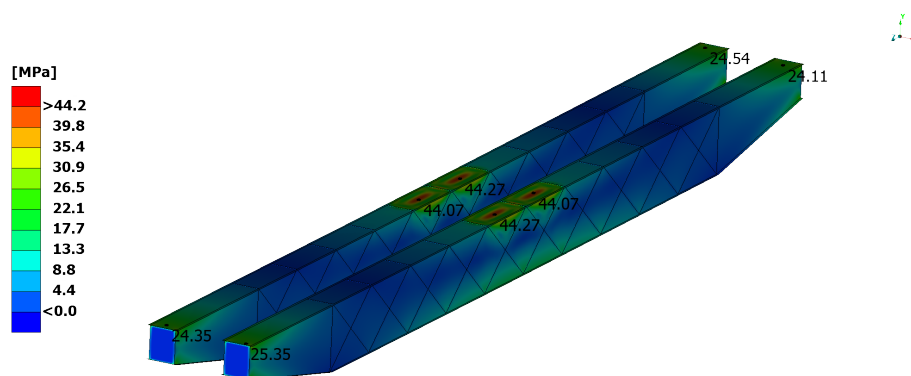


Рисунок 7 – Внутренние напряжения по Von Mises кран-балки с геометрией X

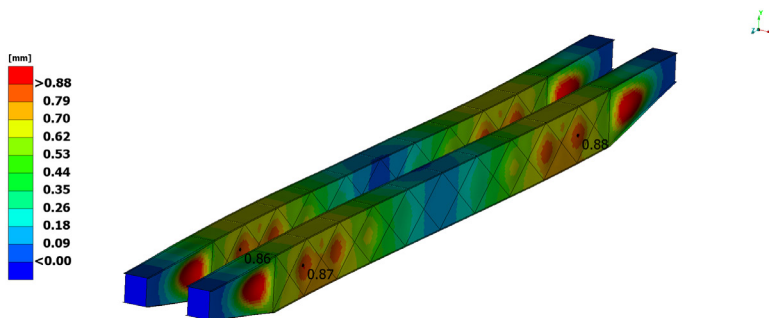


Рисунок 8 – Внутренние напряжения по Von Mises кран-балки с геометрией X

Частотный анализ модели с X образной геометрией показал, что при частоте колебаний равной 1,7 Гц, максимальная деформация в конструкции равна 0,88 мм.

Модель с геометрией V (рисунок 9), выполненная из полимербетона, продемонстрировала наименьшую деформацию по оси Z, равную 3,49 мм (рисунок 10). Максимальные напряжения по критерию Von Mises составили 47,22 Мпа (рисунок 11) и были зафиксированы в зоне максимального прогиба.

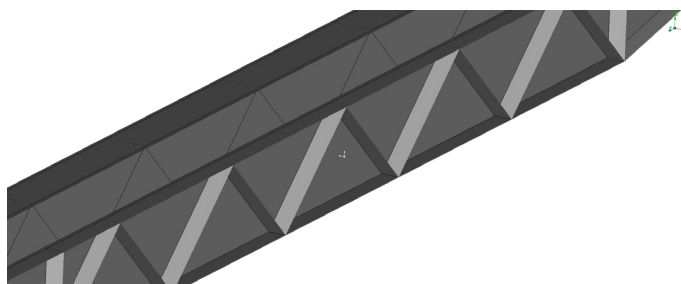


Рисунок 9 – Геометрия кран-балки из стали с геометрией V

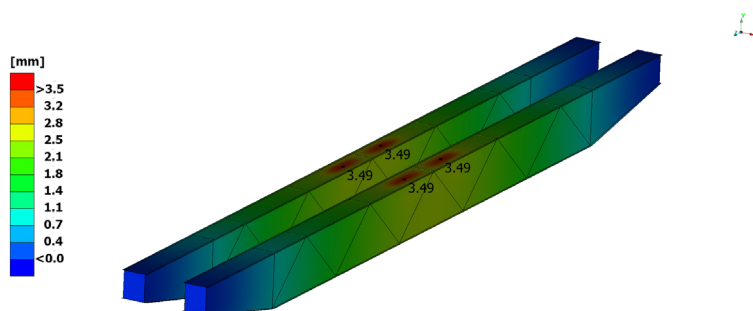


Рисунок 10 – Максимальная деформация по оси Z кран-балки с геометрией X

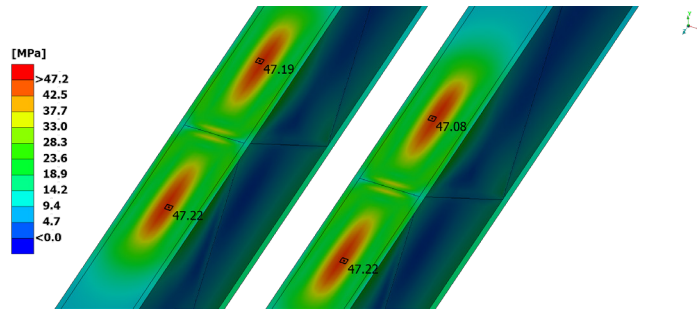


Рисунок 11 - Внутренние напряжения по Von Mises кран-балки с геометрией V

Также был произведен частотный анализ кран – балки с геометрией V, который показал, что при частоте колебаний 2,0 Гц в следствие чего возникает деформация равная 2,58 мм (рисунок 12).

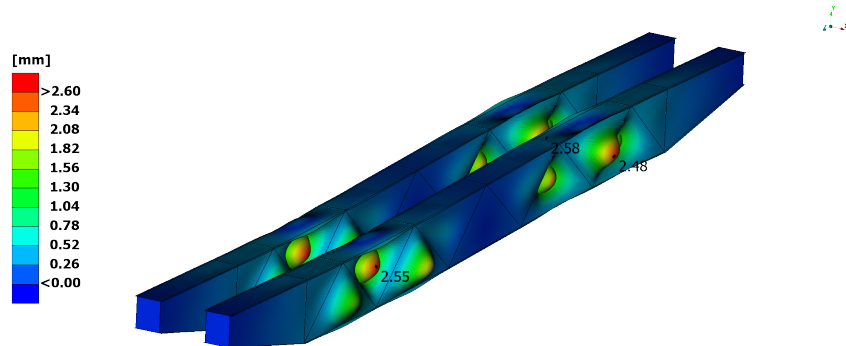


Рисунок 12 – Частотный анализ кран-балки

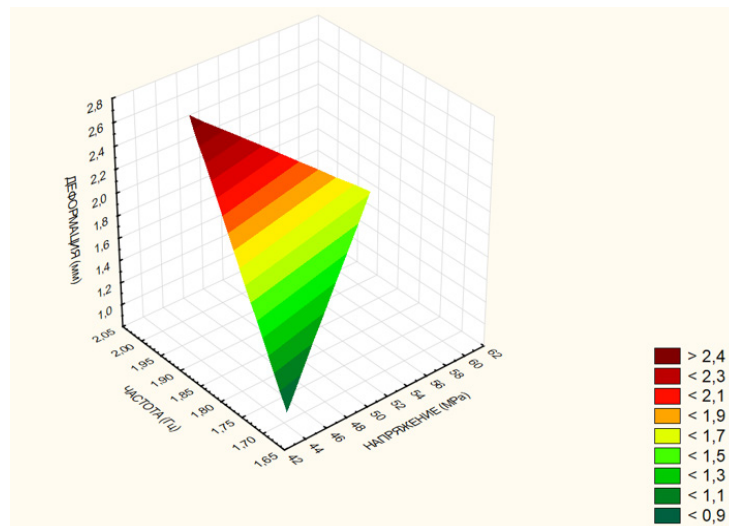


Рисунок 13 – График частот и деформаций для трех геометрий кран – балки

На рисунке 13 представлен график частот и деформаций для трех геометрий кран – балки, где наглядно видно, что наименьшая деформация (зеленый цвет) и частота колебаний возникли в кран – балке с геометрией X, как следствие увеличена жесткость и уменьшен прогиб конструкции.

На втором этапе исследования был рассмотрен статический анализ математической модели корпусов станин MPC методом конечных элементов инструментом VETA CAE System, ABAQUS.

Модель станка выполнена из полимербетона и оснащена станиной со сложной геометрией. Применение спиральных ребер жесткости с переменным шагом позволило эффективно распределять нагрузки и снизить концентрацию напряжений. Дополнительное усиление конструкции было достигнуто за счет использования полых труб. Особое внимание было уделено оптимизации конструкции опор балки, что позволило снизить напряжения в зоне сопряжения с тумбами, которые возникали в этих местах при угле равном 90°.

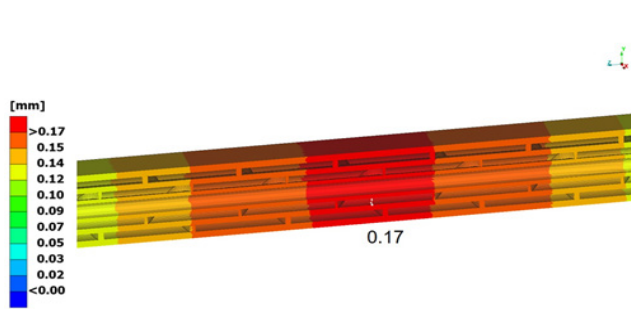


Рисунок 14 – Полученный продольный прогиб в станине из полимербетона с оптимизированной геометрией с применением ребер жесткости с переменным шагом при наложении статической нагрузки

Анализ напряженно-деформированного состояния модели показал, что при силе резания 12,4 кН прогиб составил всего 0,17 мм (рисунок 14), максимальные напряжения возникают в зоне контакта инструмента с заготовкой (4,74 МПа) и в опорах балки (2,65-3,72 МПа). Применение ребер жесткости с переменным шагом позволило снизить концентрацию напряжений в этих зонах и обеспечить более равномерное распределение нагрузок по всей длине станины. Среднее значение напряжений в конструкции составило 3,62 Мпа (рисунок 15).

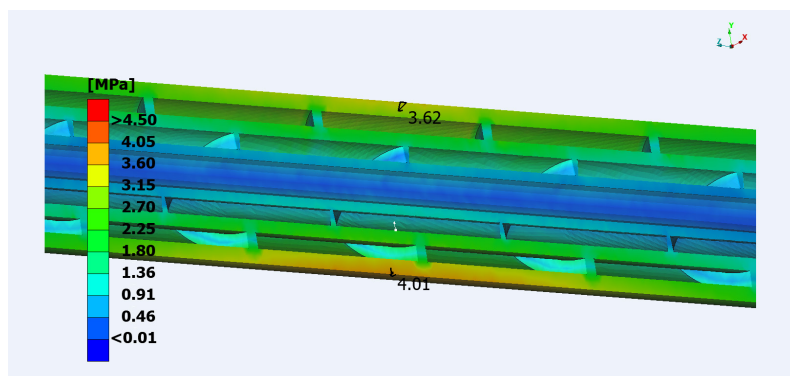


Рисунок 15 – Локальная геометрия станка с применением ребер жесткости с переменным шагом

В ходе проведения модального анализа корпусов станин металлорежущего станка из полимербетона и серого чугуна [9, 10] были определены следующие результаты (таблица 1):

Таблица 1 – Результаты модального анализа [9,10]

Форма вибрации	Частота в чугунной станине, Гц	Частота в станине из полимербетона, Гц
F1 – F5	188,6 – 512,1	196,5 – 472,9
F6 – F10	511,0 – 902,1	631,8 – 979,0
F11 – F15	1016 – 1198,1	988,7 – 1266,2
F16 – F20	1258 – 1437,8	1336 – 1648,8

Из таблицы 1 видно, что произошло повышение свободных частот собственных колебаний и увеличение динамической жесткости корпуса, изготовленного из полимербетона.

Проведенный статический анализ показал [9, 10], что в корпусе, изготовленном из полимербетона, как напряжение, так и смещение были значительно меньше, чем для конструкции из традиционного чугунного литья. Для чугунного корпуса напряжение составляло 22,52 МПа, а смещение – 5 мкм, тогда как для конструкции из полимербетона напряжение составляло 4,26 МПа, а деформация – 3 мкм при тех же условиях нагрузки.

По проведенным ранее исследованиям [9, 10] видно, что применение данной оптимизации положительно влияет на прочность и жесткость конструкции МРС. Проведенный статический анализ станины металлорежущего станка показал, что оптимизация конструкции станины за счет использования ребер жесткости и изменения соединений позволила снизить внутренние напряжения и повысить прочность всей конструкции.

Информация о финансировании (при наличии)

Статья подготовлена в рамках реализации гранта НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» для молодых ученых, соглашение № 3 от 07.06.2024.

Выводы

В результате проведенного исследования было установлено, что метод конечных элементов является мощным инструментом для анализа и оптимизации конструкций станков:

Сравнение различных геометрических вариантов станин показало, что варьирование формы и размеров элементов позволяет существенно повысить жесткость конструкций, уменьшить прогиб (0,17 мм) и снизить уровень напряжений.

Применение полимербетона, в сочетании с оптимизированной геометрией, открывает новые возможности для создания легких, прочных и долговечных конструкций. Наименьшая деформация (0,88 мм), возникающая в кран – балки при частоте колебаний (1,7 Гц) возникают в конструкции из полимербетона с геометрией X. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых станков и оборудования в различных областях промышленности, что позволит повысить их точность, надежность и производительность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Берг, А. С.** Исследование и разработка технологического оснащения для обработки длинномерных цилиндрических поверхностей: диссертация на соискание степени PhD: 8D07101 – «Машиностроение». – М., 2024. – 152 с.

2 **Yurchenko, V., Berg, A., Berg, A.** Complex Automation of Machine Building Design and Production with Software the Basing of Parts on CNC Machines // Тр. КарГУ. – 2021. – № 1. – С. 41–44.

3 **Атапин, В. Г.** Рациональное проектирование стойки тяжелого многоцелевого станка // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2015. – № 1 (66). – С. 42–50.

4 **Pakhmutov, V. A., Shaldybin, A. Ya.** Using the finite element method for structural analysis of basic parts heavy machinery // STIN - Russian Engineering Research. – 1992. – Issue 2. – P. 11–13.

5 **Haug, E. J., Choi, K. K., Komkov, V.** Design sensitivity analysis of structural systems: Mathematics in Science and Engineering. – Orlando: Academic Press, 1986. – Vol. 177. – 381 p.

6 **Lull, B.** Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinengestellen // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol. 26, Issue 1. – P. 10–13.

7 **Roscher, A.** Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeugmaschinengestellen mit hilfe der methode der finiten elemente // Maschinenbautechnik. – 1978. – Vol. 27, Issue 4. – P. 156–160.

8 **Yoshimura, M., Takeuchi, Y., Hitomi, K.** Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy, and productivity // Journal of Mechanical Design. – 1984. – Vol. 106, Issue 4. – P. 531–537.

9 **Zhetessova, G., Nikonova, T., Gierz, Ł., Yurchenko, V., Zharkevich, O., Berg, A. S., Kalinin, A. A.** Comparative Analysis of the Dynamic Strength Properties of the Long Guides of Intelligent Machines for a New Method of the Thermal Spraying of Polymer Concrete. Applied Sciences (Switzerland), 2022. – Vol. 12. – Iss. 20. – № 10376. – <https://doi.org/10.3390/app122010376>.

10 **Nikonova, T., Gierz, Ł., Berg, A. et al.** Comparative analysis of strength fatigue properties and abrasive wear resistance for a new composition of polymer concrete coated with metal alloy powders // Coating (MDPI). – 2023. – Vol. 13, Issue 8. – P. 586-1-586-18.

REFERENCES

1 **Berg, A. S.** Issledovanie i razrabotka texnologicheskogo osnashheniya dlya obrabotki dlinnomerny'x cilindricheskix poverxnostej [Research and development of technological equipment for machining of long cylindrical surfaces]: dissertaciya na soiskanie stepeni PhD: 8D07101 – «Mashinostroenie». – M., 2024. – 152 p.

2 **Yurchenko, V., Berg, A., Berg, A.** Complex Automation of Machine Building Design and Production with Software the Basing of Parts on CNC Machines // Тр. КапТУ. – 2021. – № 1. – С. 41–44.

3 **Atapin, V. G.** Racional`noe proektirovanie stojki tyazhelogo mnogocelevego stanka [Rational design of a heavy multi-purpose machine tool stand] // Obrabotka metallov: texnologiya, oborudovanie, instrumenty. – 2015. – №1(66). – P. 42–50.

4 **Pakhmutov, V. A., Shaldybin, A. Ya.** Using the finite element method for structural analysis of basic parts heavy machinery // STIN - Russian Engineering Research. – 1992. – Issue 2. – P. 11–13.

5 **Haug, E. J., Choi, K. K., Komkov, V.** Design sensitivity analysis of structural systems: Mathematics in Science and Engineering. – Orlando: Academic Press, 1986. – Vol. 177. – 381 p.

6 **Lull, B.** Statische und dynamische berechnung von werkzeugmaschinenstellen // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol. 26, Issue 1. – P. 10–13.

7 **Roscher, A.** Berechnung der dynamischen eigenschaften von werkzeugmaschinenstellen mit hilfe der methode der finiten elemente // Maschinenbautechnik. – 1978. – Vol. 27, Issue 4. – P. 156–160.

8 **Yoshimura, M., Takeuchi, Y., Hitomi, K.** Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy, and productivity // Journal of Mechanical Design. – 1984. – Vol. 106, Issue 4. – P. 531–537.

9 **Zhetessova, G., Nikonova, T., Gierz, Ł., Yurchenko, V., Zharkevich, O., Berg, A. S., Kalinin, A. A.** Comparative Analysis of the Dynamic Strength Properties of the Long Guides of Intelligent Machines for a New Method of the Thermal Spraying

of Polymer Concrete. Applied Sciences (Switzerland), 2022. – Vol. 12. – Iss.20. – № 10376. – <https://doi.org/10.3390/app122010376>.

10 Nikonova, T., Gierz, Ł., Berg, A. et al. Comparative analysis of strength fatigue properties and abrasive wear resistance for a new composition of polymer concrete coated with metal alloy powders // Coating (MDPI). – 2023. – Vol. 13, Issue 8. – P. 586-1-586-18.

Поступило в редакцию 08.11.24

Поступило с исправлениями 12.11.24.

Принято в печать 19.11.2024.

***А. С. Берг, О. А. Нуржанова, О. М. Жаркевич, А. А. Берг**

Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ.
08.11.24 ж. баспаға түсті.

12.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

19.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ОҢТАЙЛАНДЫРЫЛҒАН ГЕОМЕТРИЯСЫ МКБ МЕН КРАН СӘУЛЕСІНІҢ БЕРІКТІГІН АНЫҚТАУ

Зерттеудің өзектілігі машина жасау мен Құрылыстағы бөлшектерді өңдеудің дәлдігі мен сапасына қойылатын талаптардың артуына байланысты. Мақала металл кесетін станоктар мен құрылыс жабдықтарының, атап айтқанда кран арқалықтарының конструкцияларын оңтайландыру үшін соңғы элементтер әдісін (СЭӘ) қолдану мүмкіндігін зерттеуге арналған.

Жұмыста кран арқалықтарының және металл кесетін станоктардың төсектерінің әртүрлі геометриялары үшін соңғы элементтер әдісімен есептеулер жүргізілді. Конструкциялардың меншікті тербелістерінің деформациясы, кернеуі және жиілігі талданды. Нәтижелер СЭӘ қолдану құрылымдардың беріктігі мен қаттылығын бағалауға, жоғары кернеу аймақтарын анықтауға және олардың көтергіштігін арттыру үшін геометрияны оңтайландыруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Жаңа материалдар мен сындарлы шешімдерді қолдануға ерекше назар аударылады. Сонымен, полимербетонды металл кесетін станоктардың төсектерін жасау үшін материал ретінде қолдану, сондай-ақ құрылымдардың беріктігі мен қаттылығын арттыру үшін ауыспалы қадаммен қаттылық қабырғаларын пайдалану қарастырылды.

Алынған нәтижелер станоктар мен құрылыс жабдықтарының конструкцияларын оңтайландыру үшін СЭӘ қолдану тиімділігін растайды. СЭӘ негізінде жасалған модельдер жабдықтың дәлдігі мен сенімділігін арттыруға, материалды тұтынуды және өндіріс шығындарын азайтуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: СЭӘ, конструкцияларды оңтайландыру, МКБ, кран-арқалықтар, полимербетон, беріктік, қаттылық.

**A. S. Berg, O. A. Nurzhanova, O. M. Zharkevich, A. A. Berg*

Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda,
Republic of Kazakhstan, Karaganda

Received 08.11.24.

Received in revised form 12.11.24.

Accepted for publication 19.11.24.

DETERMINATION OF STRENGTH OF A METAL-CUTTING MACHINE AND A CRAN-BEAM WITH OPTIMIZED GEOMETRY

The relevance of the study is due to the growing requirements to the accuracy and quality of machining parts in mechanical engineering and construction. The article is devoted to the study of the possibility of using the finite element method (FEM) to optimize the design of metal-cutting machines and construction equipment, in particular, crane girders.

In the paper the calculations by the finite element method are carried out for different geometries of crane girder beds and beds of metal-cutting machine tools. The deformation, stress and natural vibration frequencies of the structures were analyzed. The results show that the application of FEM allows to evaluate the strength and stiffness of structures, to identify the zones of increased stresses and to optimize the geometry to increase their load-bearing capacity. Special attention was paid to the use of new materials and design solutions. For example, the use of polymer concrete as a material for the manufacture of machine tool beds was considered, as well as the use of stiffening ribs with variable pitch to increase the strength and stiffness of structures.

The obtained results confirm the efficiency of FEM application for optimization of machine tool and construction equipment structures. The models developed on the basis of FEM allow to increase accuracy and reliability of equipment operation, reduce material intensity and production costs.

Keywords: FEM, optimization of structures, metal-cutting machine, crane girders, polymer concrete, strength, stiffness.

**Д. Б. Буйткенов¹, М. Сахиб², Л. Г. Сулюбаева³,
*Н. С. Райсов⁴, Б. А. Алибекова⁵**

^{1,3,4,5}Восточно - Казахстанский Университет имени С. Аманжолова,

Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

²Общество Фраунгофера по продвижению прикладных исследований,
Германия, г. Мюнхен.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0239-5849>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0630-5978>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1698-957X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>

*e-mail: nurmakhanbetraisov@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕМЕХОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Данная работа посвящена изучению влияния электрофрикционной обработки на параметры лемеха при проведении полевых испытаний. В данной работе полевые испытания проводились на поле площадью 100 Га с почвой горный каштан с наличием большого количества горных пород и кристаллических образований, типичные для горных районов Восточного Казахстана. После проведения полевых испытаний были исследованы потеря массы для заводских серийных лемехов с наплавкой сормайтотом и лемехов после электрофрикционного упрочнения (ЭФУ) поверх сормайтотом в равных количествах по 4 шт. Были получены изображения поперечного сечения при помощи СЭМ, а также данные линейного ЭДС анализа. На рисунках отчетливо видно зональности в микроструктуре. Результаты проведения полевых испытаний показали, что лемеха после ЭФУ на 14 % менее склонны к износу по потере массы, чем их заводские аналоги. Также для визуального сравнения все 8 лемехов до и после полевых испытаний были отсканированы на 3D сканере, для сравнения объемов износа. По результатам 3D сканирования, обработанные методом ЭФУ лемеха в среднем на 10 % меньше теряли исходный объем по сравнению с заводскими. Также по результатам 3D сканирования, основываясь на моделях лемеха были сделаны выводы о механизме износа лемеха при вспашке. Больше всего подвержена износу носовая часть лемеха, а именно кончик кромки лезвия (острие лемеха), который берет на себя всю нагрузку при вспахивании почвы. Более плотная структура полученная комбинированным методом способствует улучшению коррозионной стойкости лемехов. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что электрофрикционная обработка является хорошим средством для

увеличения износостойкости лемехов, и может служить в качестве метода, дополняющего и улучшающего обработку наплавкой сормайттом.

Ключевые слова: электрофрикционное упрочнение, полевые испытания, лемешная сталь, объем износа, потеря массы.

Введение

Согласно исследованиям современная агротехническая отрасль часто сталкивается с проблемой абразивного износа рабочих органов почвообрабатывающих машин. Особенно износу подвержены лмехи плугов, стрельчатые лапы культиваторов, долото лемеха и т.д. [1].

В данной статье объектом исследования являются лемеха плуга, которые являются основной деталью выполняющий процесс вспашки, также пригодность лемеха определяет работоспособность всего корпуса подвесных плугов. В настоящее время серийные плуги оборудуют лемехами двух типов: цельными долотообразными или составными с накладным долотом [2;3]. Цельные долотообразные лемеха имеют гладкую, без выступов лицевую поверхность. Поэтому плуги, оснащенные цельными лемехами, имеют на 2-5% меньшее тяговое сопротивление по сравнению с плугами, оснащенными лемехами с накладным долотом [4]. Тем самым использование цельного долотообразного лемеха способствует снижению траты дизельного топлива. Так же у цельного лемеха дешевле себестоимость, в связи с этим фермеры занимающиеся точечным земледелием все чаще выбирают цельные лемеха нежели составные лемеха. Но при этом время эксплуатации лемехов относительно невелик, в связи с этим есть множество методов применяемых для упрочнения режущей кромки, которая является основной рабочей частью лемеха [5;6]. К таким методам упрочнения могут относиться наплавка сормайттом, электродуговая наплавка спеченным электродом, электрофрикционное упрочнение. В своей работе автор Белкин А.Г. исследует влияния наплавки сормайттом на лемеха плуга [7]. В работе указаны существенные недостатки метода наплавки сормайттом, такие как высокая трудоемкость процесса ввиду технологических особенностей из-за того, что после наплавки необходим отжиг с последующей закалкой и отпуском. Для получения чистого сплава сормайт наплавку ведут в два-три слоя, что в свою очередь тоже приводит к увеличению трудозатрат при производстве лемехов с наплавкой сормайттом. Что делает этот метод не подходящим для фермеров возделывающих малые поля.

Метод электродуговой наплавки спеченным электродом был изучен авторами Кончин В.М. и др. В данной работе сравниваются методы наплавки сормайта, как наиболее популярного метода упрочнения лемехов на производствах, а также метода электродуговой наплавки спеченным электродом из электроэрозионной шихты, в качестве аналога вышеупомянутому методу [8]. Авторы нашли оптимальный режим наплавки, также указали схему проведения процесса, были определены твердости по шкале Роквелла и Бриннеля. В данной работе отсутствуют результаты полевых испытаний, и соответственно нет данных о значениях износостойкости, потери массы и изменении линейных параметров.

В настоящей работе в качестве метода обработки кромки лезвия лемеха было использовано электрофрикционное упрочнение (ЭФУ) поверх наплавки из материала «Сормайт -1» [9]. Так же проведены полевые испытания обработанных лемехов и заводских с наплавкой из сормайта. Электрофрикционные технологии обладает высокой энергетической плотностью. Управление процессом образования плазмы осуществляется путем создания и прерывания электрического контакта между упрочняемой поверхностью и электродом, погруженным в охлаждающую жидкость. При перемещении электронов от катода к аноду происходят множественные столкновения, что приводит к резкому повышению температуры и тока проводимости. С увеличением расстояния между электродами и охлаждением плазмы жидкостью ее проводимость снижается, и контакт прерывается. Энергия, поступающая в дугу, рассеивается через теплоноситель, конвекцию и излучение. Проходящий электрический ток вызывает одновременное плавление электрода и поверхности изделия, легирование и быстрое охлаждение [10]. Режим проведения испытаний указан в наших предыдущих публикациях [10;11], также описано влияние ЭФУ на структуру лемехов, а также влияние обработки на механические характеристики лемеха такие как: твердость по шкале Виккерса, устойчивость к абразивному износу в лабораторных условиях, так же приведены результаты трибологических исследований.

Целью данной работы является определение влияния комбинирования ЭФУ и метода индукционной наплавки материала «Сормайт - 1» на увеличение стойкости к абразивному износу в условиях полевых испытаний.

Материалы и методы

В данной работе использовался долотообразный лемех плуга ПЛЖ-31-702 с ребром жесткости «Алмаз РЗЗ». Данный лемех часто используется в культивации почвы в Восточно- Казахстанском регионе, который изготавливают чаще всего из специальной лемешной стали марки Л-53 [12]. Стандартные размеры лемехов марки Алмаз РЗЗ: длина от кончика лемеха до противоположного края L= 555 мм, толщина по верхней кромке – 10 мм, толщина по ребру жесткости – 14 мм. Сталь Л-53 имеет следующий химический состав [13] (Таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав лемешной стали Л-53

Марка стали	Углерод %	Марганец %	Кремний %	Сера %	Фосфор %
Л 53	0,47-0,59	0,5-0,8	0,15-0,4	0,05	0,05

Упрочнение лемехов производилось на установке для ЭФУ. Конструктивно данная установка имеет корпус, в котором содержит источник электрического питания, шпиндельный узел, привод вращения шпинделя и закрепленный на его конце электрод, блок управления, электрический вход, а также узел обрабатываемых деталей, токопроводы [10]. Установка так же оснащена держателем, приспособленным для крепления лемехов и стрелчатых лап культиваторов, держатель расположен на координатном столике, который позволяет двигать установленные детали (образцы) по осям X. У. Источником

электрической энергии служит сварочный источник постоянного тока модели ZX-5 1000. Так же у данной установки предусмотрена ванна с охлаждающей жидкостью с возможностью подключения ее к системе канализации для слива отработанной охлаждающей жидкости. Диск вращает двигатель от фрезерного станка со скоростью 120 оборотов в минуту [11].

Модификация лемехов производилась путем обработки их при помощи технологии электрофрикционного упрочнения. В качестве анода, а также упрочняющей поверхности использовался чугунный диск из серого чугуна, края которого были сточены (сверху вниз) под углом в 15 градусов для более удобной обработки лезвия лемеха. Материалом катода служит непосредственно сам образец. В результате искрового разряда между электродом-анодом и деталью-катодом происходит преимущественное разрушение материала электрода и перенос продуктов эрозии на поверхность образца (детали). Высокая температура в зоне разряда (500–1100 °С и кратковременность его действия (10–2000 мкс) способствуют протеканию металлургических процессов на поверхности детали, диффузии элементов материала электрода вглубь поверхностного слоя детали. Многократное воздействие на обрабатываемую деталь искровыми разрядами приводит к изменению рельефа поверхности, а также состава, структуры и свойств ее поверхностного слоя. Так же быстрое охлаждение в водной среде приводит к закалке стали [14]. За счет управления электрическими режимами достигается получение поверхностных слоев измененной структуры толщиной от нескольких микрометров до 1 мм и более, а также изменение рельефа поверхности и его размерных параметров. Варьирование электродными материалами способствует приданию обработанной поверхности необходимых эксплуатационных свойств — износо-, жаро-, коррозионной стойкости и др. [15;16;17].

Морфологию поверхностей и поперечные сечения покрытий исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 4 (Tescan, Чехия), оснащенного насадкой для электронного зонда для локального микро - анализа: энергодисперсионным спектрометром (EDS). Микрофотографии были получены с использованием СЭМ как в режиме вторичных электронов (SE).

Полевые испытания

Для проведения полевых испытаний было выбрано поле площадью 100 га, интенсивность изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин зависит от механического состава и влажности почвы, а также наличия в ней каменистых включений [18]. Для более лучшего понимания механизмов прохождения процесса абразивного износа, были взяты пробы грунта. Пробы грунта брались в пяти местах по два раза с четырех краев поля и по центру поля, глубина взятия пробы составляет 30 см. Пробы грунта были направлены в ТОО «Восточно-Казахстанская сельскохозяйственная опытная станция», для получения значений рН грунта, плотности, влажности почвы.

Полевые испытания проводились согласно ГОСТ 20915-2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний».

Были проделаны работы по дистанционному сбору данных с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА), а именно дистанционное зондирование поля и измерение площади поля. Данные съемки с дрона представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Аэрофотосъемка поля с указанием площади поля

Для проведения полевых испытаний 4 долотообразных лемехов обработанных при помощи технологии ЭФУ поверх сорняков и 4 заводских серийных лемехов с наплавкой сорняков (которые рассмотрены в этой статье как «без обработки») были установлены на плуги колесного трактора К-744 Р1, лемеха чередовались (один с обработкой, один без, и так далее). Трактор обрабатывал поле методом высокоскоростной вспашки. Скорость трактора более 7 км/час. Промежуточные результаты замеров геометрических размеров и масс были взяты после вспашки 50 Га, конечные же результаты были взяты при вспашке еще 50 Га, таким образом было вспахано поле общей площадью в 100 Га. Лемеха были пронумерованы: например с ЭФУ – № 1 лемех 111, № 2 лемех 222, № 3 лемех 333, № 4 лемех 444, а также без обработки № 5 лемех 555, № 6 лемех 666, № 7 лемех 777 и № 8 лемех 888. Номера лемехов были высечены на самих лемехах при помощи штампов. Установка лемехов и вспашка поля ТОО «Восточно-Казахстанская сельскохозяйственная опытная станция» представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – (а) установка лемехов на подвесные плуги
(б) процесс высокоскоростной вспашки поля

Оценка результатов полевых испытаний.

Оценка стойкости к абразивному износу комбинированной обработки ЭФУ с индукционной наплавкой лемеха в условиях полевых испытаний была осуществлена при помощи 3D сканирования, с применением которого были получены результаты изменений геометрических параметров лемехов после вспашки 100 Га. Для создания моделей был использован ручной 3D сканер марки ZG RigelScan PlusP. Были получены сканы лемехов до и после обработки. На основе полученных 3D моделей были исследованы изменения в объемах лемехов, а также некоторых геометрических параметров лемехов: длина от кончика острия до противоположного конца лемеха (А), высота лемеха от верхней кромки до острия лемеха (С), расстояние от кончика острия до первого крепежного отверстия (В). Пример данных геометрических параметров представлены на рисунке 3. Результаты параметров А, В, С были получены для всех лемехов, было произведено сравнение между двумя группами.

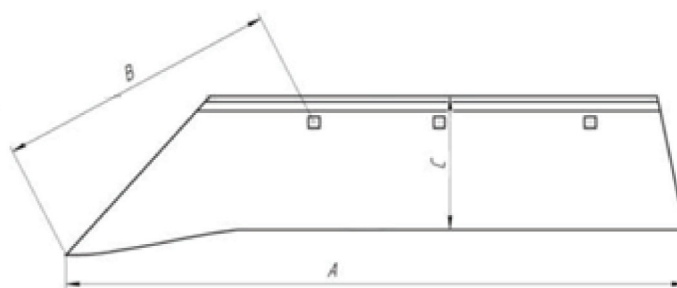


Рисунок 3 – Схема для измерения геометрических параметров лемеха

Согласно методике проведения анализа полевых испытаний лемеха для оценки эффективности параметров ЭФУ были проведены сравнение массы лемехов до и после полевых испытаний. Анализ масс проводился на технических весах марки Gibertini модели Cent-2 с максимальной массой измеряемого образца в 10,200 гр. Точность измерения весов составляет 0,1 гр.

Исследование коррозии проводилось с использованием теста потенциодинамической поляризации. Скорость сканирования составляла 0,5 мВ/с с диапазоном сканирования от $-0,8$ В до $+0,8$ В в растворе 3,5% NaCl. Полученные результаты измерений зависимости тока от потенциала были использованы для построения поляризационной кривой, которая обычно предоставляет информацию о потенциале коррозии, коррозионном токе и поведении пассивации.

Результаты и обсуждение

4 лемеха из стали Л-53 были обработаны методом ЭФУ поверх наплавки из сормаита. Лемеха до и после обработки ЭФУ представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 - Вид лемехов до и после ЭФУ (слева лемеха с наплавкой сормайта, справа лемеха с комбинированный обработкой ЭФУ поверх наплавки из сормайта).

На рисунке 5а представлены локальные изменения микроструктуры стали Л53, возникающие при комбинировании индукционной наплавки с последующей электрофрикционной обработкой. Визуализируется общее строение материала, где выделяются три основные зоны что характерно для ЭФУ. Нижний слой соответствует подложке, характеризующейся перлитно-ферритной структурой стали в исходном состоянии. Следующим идет слой покрытия, сформированный методом индукционной наплавки с использованием материала Сормайт-1. Верхний упрочненный слой сформировался в результате ЭФУ.

Данные линейного ЭДС анализа подтверждают наличие трех зон рисунок 5б. Как указано выше нижний слой состоит из исходной ферритно-перлитной структуры характерной для стали Л-53. А средний слой, расположенный на глубине от 200 до 600 мкм, отличается высоким содержанием хрома, это объясняется тем что сормайт состоит на 25% из хрома. Верхний слой же представляет собой упрочненный слой толщиной 52 мкм.

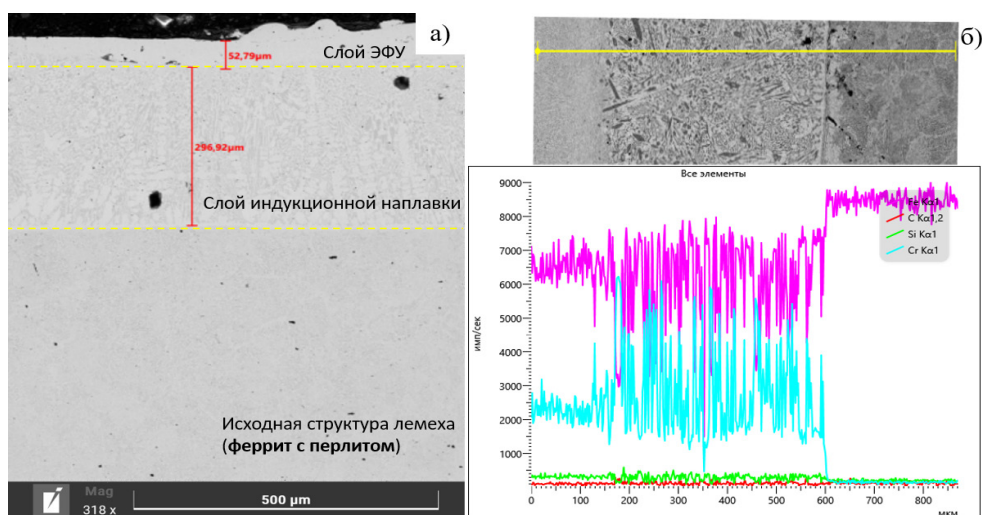


Рисунок 5 – а) РЭМ изображения поперечного сечения стали Л53 после ЭФУ б) ЭДС анализ по линии лемеха после ЭФУ

Перед началом полевых испытаний, как указано в предыдущей главе данной статьи были проведены замеры грунта. Замеры проводились при 23-25 °C выше нуля, при влажности воздуха в 50-56 %, По результатам замеров пробы грунта рН почвы составил 6,32 (ГОСТ 26423-85), влажность почвы 18,2 %, а также массовая доля плотного остатка водной вытяжки 0,2 %. Данные параметры являются оптимальными для проведения вспашки поля, а значит, дадут максимально точно воссозданные условия при полевых испытаниях.

Значения измерения массы после проведения полевых испытаний представлены в виде графика потери массы на рисунке 6.

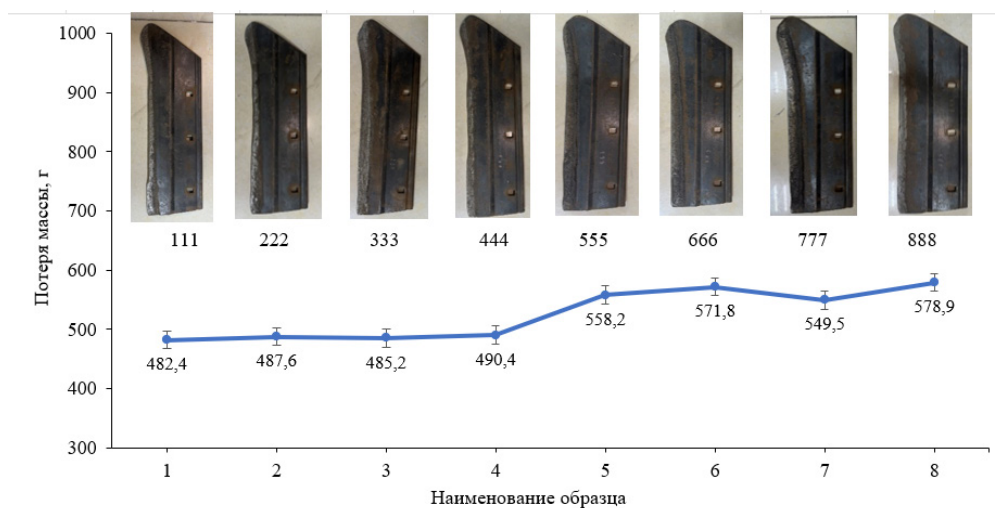


Рисунок 6 – График потери массы лемехов до и после обработки

Обработанные методом ЭФУ – №1 лемех 111, №2 лемех 222, №3 лемех 333, №4 лемех 444, а также без обработки №5 лемех 555, №6 лемех 666, №7 лемех 777 и №8 лемех 888.

По данному графику видно, что благодаря ЭФУ кромки в среднем потеря массы лемехов после обработки снизилась на 14%. Данный факт объясняется прохождением двух физических процессов при обработке, а именно насыщение стали углеродом и термическая точечная закалка. Широко известно, что добавление определенного количества углерода может привести к образованию карбидных фаз, которые повышают прочность и твердость материала. А также, быстрый нагрев с последующим быстрым охлаждению соответствует режиму проведения закалки. Который в комплексе способствует повышению стойкости стали к абразивному износу.

Также были оценены изменения геометрических параметров после полевых испытаний согласно схеме на рисунке 3. Длина от кончика острия до противоположного конца лемеха (А), высота лемеха от верхней кромки до острия лемеха (С), расстояние от кончика острия до первого крепежного отверстия (В). Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение геометрических контрольных параметров после 100 га для лемеха с ЭФУ

Номер лемеха с ЭФУ	Потеря длины измеряемых геометрических параметров, см					
	А		В		С	
	Исх. длина 55,5 см		Исх. длина 25,5		Исх. длина 11,9	
	Рез-ы изм.	Лин- ый износ	Рез-ы изм.	Лин-ый износ	Рез-ы изм.	Лин-ый износ
111	50,7	4,8	19,8	5,7	11,6	0,3
222	51,1	4,4	20,4	5,1	11,7	0,2
333	50,8	4,7	19,8	5,7	11,5	0,4
444	50,6	4,9	20,5	5,0	11,8	0,3
Среднее значение потери	4,7		5,4		0,3	

Таблица 2.1 – Изменение геометрических контрольных параметров после 100 га для заводских лемехов

Номер лемеха до ЭФУ	Потеря длины измеряемых геометрических параметров, см					
	A		B		C	
	Исх. длина 55,5 см		Исх. длина 25,5		Исх. длина 11,9	
	Резул-ы изм.	Лин-ый износ	Резул-ы изм.	Лин-ый износ	Резул-ы изм.	Лин-ый износ
555	49,9	5,6	19,2	6,3	11,4	0,5
666	50,3	5,2	19,5	6,0	11,6	0,3
777	50,0	5,5	19,3	6,2	11,3	0,6
888	48,9	6,6	18,5	7,0	11,2	0,7
Среднее значение потери	5,7		6,3		0,5	

По данным таблицы 2 и 2.1 определено, что уменьшение геометрических параметров лемеха после обработки ЭФУ ниже, чем для серийных лемехов с наплавкой сормайта, а именно для параметра А – 17%, В – 15%, С - 40%. Помимо данных о износе лемехов данная таблица дает представление о характере и закономерностях износа лемехов при вспашке полей. Основная рабочая часть лемеха, которая изнашивается интенсивнее других частей является носовой частью лемеха. Это мы можем заметить по снижению параметров А и В.

После измерения геометрических параметров, для лучшего и более детального понимания характера абразивного износа, лемеха были осканированы на ручном 3D сканере рисунок 7. Полученные модели были внесены в ПО для расчета объема износа и визуального сравнения при наложении изображения лемеха до и после полевых испытаний друг на друга.

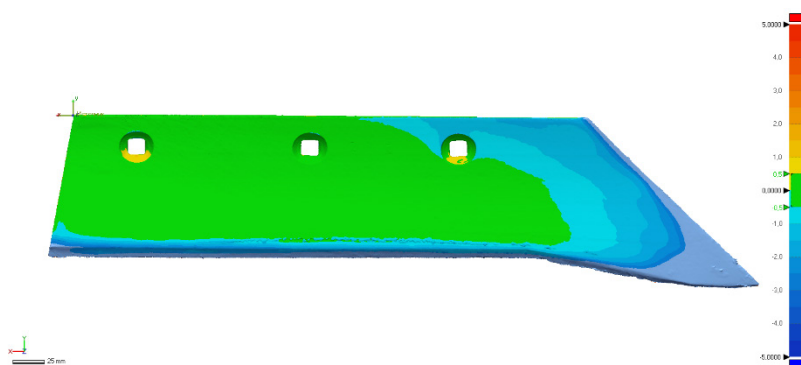


Рисунок 7 – 3D скан лемеха в анложении до и после полевых испытаний

Таблица 3 – Значения объема износа лемехов до и после полевых испытаний

Наименование детали для испытания		Объем лемеха в полевых испытаниях, см ³		Объем износа, см ³	Средний объем износа, см ³
		До	После		
Лемех после ЭФУ	111	525,9	467,6	58,3	58,3±9,7
	222	539,8	474,1	65,6	
	333	539,2	500,7	38,4	
	444	533,6	462,9	70,6	
Серийный лемех с наплавкой сормайта	555	538,1	459,1	79,0	62,7±8,3
	666	522,5	470,0	52,5	
	777	533,8	483,5	50,3	
	888	524,2	455,27	68,9	

По результатам 3Д сканирования выявлено, что объем износа у лемехов, обработанных при помощи технологии ЭФУ на 8-10 % меньше, чем у заводских аналогов.

Данные, представленные в таблице 4 и на потенциодинамическом графике, свидетельствуют о значительном различии в коррозионной стойкости различных типов обработки. В таблице показаны ключевые параметры, такие как плотность тока коррозии (I_{corr}) и скорость коррозии (С.Р.), которые отражают поведение материалов при коррозионных испытаниях. Покрытие, полученное методом индукционной наплавки с последующей электрофрикционной обработкой (ИН+ЭФТ), демонстрирует наилучшие показатели: его значение I_{corr} составляет 0,63123, а скорость коррозии – 0,00302415, что значительно ниже по сравнению с индукционной наплавкой. На графике потенциодинамических кривых рисунок 8 можно заметить, что кривая обработки методом ИН, показывает хорошие результаты, хотя их стойкость к коррозии всё же уступает комбинированному покрытию ИН+ЭФТ. Такая комбинация обработок, судя по всему, создаёт более плотную и защищённую от воздействия агрессивных сред поверхность, что предотвращает образование микротрещин и задержку влаги, существенно замедляя процесс коррозии. В целом, комбинированное покрытие ИН+ЭФТ демонстрирует наилучшую коррозионную стойкость среди всех изученных вариантов, что делает его наиболее перспективным для использования в условиях, требующих защиты от агрессивных сред.

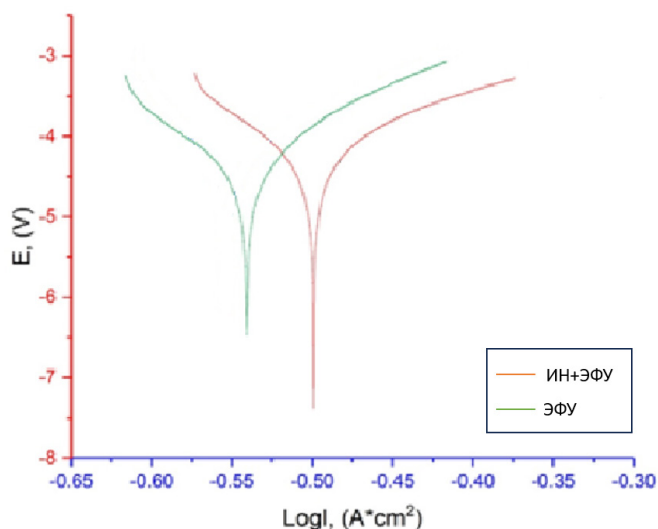


Рисунок 8 – Потенциодинамические кривые различных типов наплавленных покрытий

Таблица 4 – Результаты коррозионных испытаний

	ИН	ИН+ЭФУ
A (cm ²)	0.785	0.785
I кор. (A)	0.65645	0.63123
i кор. (A/cm ²)	0.83624204	0.80411465
Скорость коррозии (мм/а)	0.00314498	0.00302415

Заключение

Таким образом, согласно полученным результатам настоящей статьи были сделаны следующие основные выводы и заключения:

Технология ЭФУ позволяет получить лемеха с улучшенными характеристиками за счет протекания процессов закалки и легирования стали углеродом. Данные процессы способствуют улучшению ниже перечисленных параметров лемеха;

Линейный ЭДС анализ и СЭМ показали наличие трех зон: исходная зона, зона наплавки сормайтотом, упрочненная зона;

Согласно результатам полевых испытаний лемехов с наплавкой сормайтота и обработанных методом электрофрикционной обработки, потеря массы после вспашки 100 Га поля показали, что лемеха обработанные ЭФУ показали на 14% меньше потери массы;

По результатам линейных измерений выявлено, что лемеха после ЭФУ менее склонны к изменению геометрии из-за абразивного износа, а именно для параметра А – 17 %, В – 25 %, С - 40 % процентов ниже;

Также были вычислены объемы износа на 3D моделях. Программное обеспечение САД-программы показало, что сериные лемеха теряют в среднем на 10 % больше объема;

Результаты коррозионного теста показали, что благодаря плотной структуре комбинированная обработка показала улучшенные значения коррозионной устойчивости.

В заключении метод ЭФУ рекомендован как аналог метода наплавки сормайт, для упрочнения лемехов и увеличения эксплуатационного ресурса, что согласовывается с данными проведенных исследований после полевых испытаний.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992879).

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992879).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Шкурин, И. Г., Анненков, Д. А., Грызин, П. Н., Шманев, Н. Д., Козлова, А. Н.** Технологии восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин [Электронный ресурс] // Научный журнал молодых ученых. – 2016. – № 2 (7).

2 **Ксеневиц, И. П., Варламов, Г. П., Колчин, Н. Н.** Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Сельскохозяйственные машины и оборудование [Текст] // Машиностроение, Т. IV-16. – 2002. – 720 с.

3 **Лобачевский, Я. П., Панов, А. И., Панов, И. М.** Перспективные направления совершенствования конструкций лемешно-отвальных плугов [Текст] // Тракторы и сельхозмашины. – 2000. – № 5. – С. 8–12.

4 **Миронов, Д. А., Лискин, И. В., Сидоров, С. А.** Влияние геометрических параметров долота на тяговые характеристики и ресурс лемехов отечественных плугов [Текст] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 6. – С. 25–29.

5 **Лискин, И. В., Миронов, Д. А., Панов, А. И., Горбачев, И. В.** Лемеха с накладным долотом для плугов общего назначения [Электронный ресурс] // Сельский механизатор. – 2016. – № 11. – С. 14–15.

6 **Ерохин, М. Н., Новиков, В. С.** О совершенствовании конструктивных параметров рабочих органов плуга [Электронный ресурс] // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». – 2005. – № 1. – С. 25–31.

7 **Белик, А. Г.** Применение сплава сормайт для износостойкой наплавки (Обзор) [Электронный ресурс] // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2014. – № 4. – С. 89–94.

8 **Кончин, В. А., Серникова, О. С., Серебровский, В. И.** Упрочнение лемеха плуга электродуговой наплавкой спеченным электродом из электроэрозионной шихты [Электронный ресурс] // Современные проблемы и направления развития агроинженерии в России: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Курск, 28 октября 2022 года. – Курск: Курская

государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова, 2022. – С. 93–97.

9 **Sagdoldina, Z., Tyurin, Y., Berdimuratov, N., Stepanova, O., Magazov, N., Baizhan, D.** Electrofrictional Hardening of the 40Kh and 65G Steels [Электронный ресурс] // Coatings. – 2023. – Vol. 13. – P. 1820. – <https://doi.org/10.3390/coatings13111820>.

10 **Berdimuratov, N. E., Kambarov, Y. Y., Maulet, M., Bolatov, S. D., Sagdoldina, Z. B., Baizhan, D.** Electrofriction treatment of plow shares [Электронный ресурс] // Bulletin of the Karaganda University «Physics Series». – 2024. – Vol. 11329(1). – P. 66-72.

11 **Тюрин, Ю., Сағдолдина, Ж., Қамбаров, Е., Мағазов, Н.** Исследование твердости стали 65Г после электрофрикционной обработки [Электронный ресурс] // Вестник ВКТУ. – 2023. – № 3.

12 **Ложкин, К. И., Добриков, В. А.** Восстановление и упрочнение лемеха плуга [Текст] // Теория и практика современной науки: материалы XVII Международной научно-практической конференции, Москва, 08–09 апреля 2015 года. – Москва: Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований». – 2015. – С. 61–65. – EDN TQFVNP.

13 **Дудник, В. В.** Оценка структуры упрочненного слоя лезвия лемехов [Электронный ресурс] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 3, № 5 (51). – С. 20–23.

14 **Иванов, В. И., Гитлевич, А. Е., Костюков, А. Ю., Коневцов, Л. А., Величко, С. А.** Основы универсальности и эффективности электроискрового легирования и перспективы его развития [Текст] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, № 2–2. – С. 641–646.

15 **Верхотуров, А. Д.** Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей [Текст] // Владивосток: Дальнаука. – 1992. – 180 с.

16 **Гитлевич, А. Е.** Электроискровое легирование металлических поверхностей [Текст] // Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.

17 **Бурумкулов, Ф. Х.** Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) [Текст] // Саранск: Красный Октябрь. – 2003. – 504 с.

18 **Бартенев, И. М., Поздняков, Е. В.** Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин [Электронный ресурс] // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3 (11). – С. 114–123.

REFERENCES

1 **Shkurin, I. G., Annenkov, D. A., Gryzin, P. N., Shmanev, N. D., Kozlova, A. N.** Tehnologii vosstanovleniya i uprochneniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushih mashin [Technologies of restoration and hardening of soil tillage machine working elements] [Elektronnyj resurs] // Nauchnyj zhurnal molodyh uchenyh. – 2016. – № 2 (7).

2 **Ksenevich, I. P., Varlamov, G. P., Kolchin, N. N.** Mashinostroenie. E`nciklopediya v soroka tomax. Sel`skoxozyajstvenny`e mashiny` i oborudovanie. [Mashinostroenie. Encyclopaedia in forty volumeP. Agricultural machinery and equipment] [Text]. – Mashinostroenie, T. IV-16. – 2002. – 720 P.

3 **Lobachevskij, Ya. P., Panov, A. I., Panov, I. M.** Perspektivny`e napravleniya sovershenstvovaniya konstrukcij lemeshno-otval`ny`x plugov. [Perspective directions of improvement of designs of mouldboard ploughs] [Text]. – Traktory` i sel`xozmashiny`. – 2000. – № 5. – P. 8–12.

4 **Mironov, D. A., Liskin, I. V., Sidorov, S. A.** Vliyanie geometricheskix parametrov dolota na tyagovy`e karakteristiki i resurs lemexov otechestvenny`x plugov. – [Influence of geometrical parameters of a bit on traction characteristics and resource of ploughshares of domestic ploughs] [Text]. – Sel`skoxozyajstvenny`e mashiny` i texnologii. – 2015. – № 6. – P. 25–29.

5 **Liskin, I. V., Mironov, D. A., Panov, A. I., Gorbachev, I. V.** Lemexa s nakladny`m dolotom dlya plugov obshhego naznacheniya. – [Bars with an overhead chisel for general purpose ploughs] [Electronic resource]. – Sel`skij mexanizator. – 2016. – № 11. – P. 14–15.

6 **Eroxin, M. N., Novikov, V. P.** O sovershenstvovanii konstruktivny`x parametrov rabochix organov pluga. – [On improving the design parameters of plough working bodies] [Electronic resource]. – Vestnik FGOU VPO «MGAU imeni V. P. Goryachkina». – 2005. – № 1. – P. 25-31.

7 **Belik, A. G.** Primenenie splava sormajt dlya iznosostojkoj naplavki (Obzor). – [Application of Sormite alloy for wear-resistant surfacing (Review)] [Electronic resource]. – Zbirnik naukovix prac` Naczional`nogo universitetu korablebuduvannya. – 2014. – № 4. – P. 89–94.

8 **Konchin, V. A., Sernikova, O. S., Serebrovskij, V. I.** Uprochnenie lemexa pluga e`lektrodugovoj naplavkoj spechenny`m e`lektrodom iz e`lektroe`rrozionnoj shixty`. – [Strengthening of ploughshare ploughshare by electric arc cladding with sintered electrode from electro-erosion charge]. – Sovremenny`e problemy` i napravleniya razvitiya agroinzhenierii v Rossii: sbornik nauchny`x statej 2-j Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii, Kursk, 28 oktyabrya 2022 goda. – [Text]. – Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya sel`skoxozyajstvennaya akademiya imeni I.I. Ivanova, 2022. – P. 93–97.

9 **Sagdoldina, Z., Tyurin, Y., Berdimuratov, N., Stepanova, O., Magazov, N., Baizhan, D.** Electrofrictional Hardening of the 40Kh and 65G SteelP. – [Electrofrictional Hardening of the 40Kh and 65G Steels] [Electronic resource]. – Coating P. – 2023. – Vol. 13. – P. 1820. – <https://doi.org/10.3390/coatings13111820>.

10 **Berdimuratov, N. E., Kambarov, Y. Y., Maulet, M., Bolatov, S. D., Sagdoldina, Z. B., Baizhan, D.** Electrofriction treatment of plow shareP. – [Electrofriction treatment of plow shares] [Electronic resource]. – Bulletin of the Karaganda University “Physics Series”. – 2024. – Vol. 11329(1). – P. 66–72. – <https://rep.ksu.kz/handle/data/18849>

11 **Tyurin, Yu., Sagdoldina, Zh., Kambarov, E., Magazov, N.** Issledovanie tverdosti stali 65G posle e`lektrofrikcionnoj obrabotki. – [Investigation of hardness of

65G steel after electrofriction treatment]. – [Electronic resource]. – Vestnik VKTU. – 2023. – № 3.

12 **Lozhkin, K. I., Dobrikov, V. A.** Vosstanovlenie i uprochnenie lemexa pluga. – [Restoration and hardening of ploughshare]. – Teoriya i praktika sovremennoj nauki: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Moskva, 08–09 aprelya 2015 goda. – [Text]. – Moskva: Nauchno-informacionnyj izdatel'skij centr «Institut strategicheskix issledovanij». – 2015. – P. 61–65. – EDN TQFVNP.

13 **Dudnik, V. V.** Ocenka struktury uprochnennogo sloya lezviya lemexov. – [Estimation of the structure of the hardened layer of the ploughshare blade] [Electronic resource]. – Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyx texnologij. – 2011. – T. 3, № 5 (51). – P. 20–23.

14 **Ivanov, V. I., Gitlevich, A. E., Kostyukov, A. Yu., Konevczov, L. A., Velichko, S. A.** Osnovy universal'nosti i effektivnosti elektroiskrovogo legirovaniya i perspektivy ego razvitiya. – [Fundamentals of universality and efficiency of electrospark alloying and prospects of its development] [Text]. – Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. – 2018. – T. 9, № 2–2. – P. 641–646.

15 **Verxoturov, A. D.** Fiziko-ximicheskie osnovy processa elektroiskrovogo legirovaniya metallichesnix poverxnostej. – [Physico-chemical bases of the process of electrospark alloying of metal surfaces] [Text]. – Vladivostok: Dal'nauka. – 1992. – 180 P.

16 **Gitlevich, A. E.** Elektroiskrovoe legirovanie metallichesnix poverxnostej. – [Electrospark alloying of metal surfaces] [Electronic resource]. – Kishinev: Shtiintza, 1985. – 196 P.

17 **Burumkulov, F. X.** Elektroiskrovye texnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalej mashin i instrumentov (teoriya i praktika). – [Electrospark technologies of restoration and hardening of machine parts and tools (theory and practice)] [Text]. – Saransk: Krasnyj Oktyabr'. – 2003. – 504 P.

18 **Bartenev, I. M., Pozdnyakov, E. V.** Iznashivayushhaya sposobnost' pochv i ee vliyanie na dolgovechnost' rabochix organov pochvoobrabatyvayushhix mashin. – [Wear ability of soils and its influence on durability of working bodies of soil-working machines] [Electronic resource]. – Lesotexnicheskij zhurnal. – 2013. – № 3 (11). – P. 114–123.

Поступило в редакцию 25.10.24

Поступило с исправлениями 29.10.24.

Принято в печать 25.11.2024.

*Д. Б. Буйткенов¹, М. Сахиб², Л. Г. Сулюбаева¹, *Н. С. Райсов¹, Б. А. Алибекова¹*

¹С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

²Фраунгофер керамикалық технологиялар және

жүйелер институты ИКТS, Германия, Мюнхен қ.

25.10.24 ж. баспаға түсті.

29.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

25.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ДАЛАЛЫҚ СЫНАҚТАР ЖАҒДАЙЫНДА ЭЛЕКТРОФРИКЦИЯЛЫҚ ӨҢДЕУ ӘДІСІМЕН ЛЕМЕХТЕРДІҢ БЕРІКТІГІН АРТТЫРУ

Бұл жұмыс электрофрикциялық өңдеудің лемех параметрлеріне далалық сынақтар кезінде әсерін зерттеуге арналған. Далалық сынақтар ауданы 100 гектарды құрайтын тау жастан топырақты алқапта жүргізілді, онда тау жыныстарымен кристалдық түзілістер көп кездеседі, бұл Шығыс Қазақстанның таулы аймақтарына тән жағдай. Сынақ нәтижесінде зауыттық стандартты сормайтпен қапталған лемехтер мен электрофрикциялық нығайтудан (ЭФН) кейінгі лемехтерден (әрқайсысынан 4 дана) масса жоғалтуы зерттелді. СЭМ әдісімен алынған көлденең қималардың суреттері мен сызықтық ЭДС талдау мәліметтері көрсетілген суреттерден үш аймақтың пайда болғаны анық көрінеді. Далалық сынақтар нәтижесі электрофрикциялық өңдеуден өткен лемехтердің зауыттық үлгілермен салыстырғанда массасының жоғалтуына 14% аз бейім екенін көрсетті. Сондай-ақ, барлық 8 лемехтер (далалық сынаққа дейін және кейін) 3D сканерлеу арқылы сканерленіп, тозу көлемін салыстыру үшін пайдаланылды. 3D сканерлеу нәтижелері бойынша ЭФН әдісімен өңделген лемехтер бастапқы көлемнің жоғалуын зауыттық үлгілермен салыстырғанда орташа есеппен 10%-ға азайтты. 3D сканерлеу нәтижелеріне сүйене отырып, лемехтердің тозу механизмі туралы қорытынды жасалды: лемехтің ең тозуға ұшырайтын бөлігі – жиегінің ұшы (лемех ұштары), өйткені топырақты жыртқанда барлық жүктеме осы бөлікке түседі. Комбинацияланған әдіспен алынған тығыз құрылым лемехтердің коррозияға төзімділігін жақсартады. Зерттеулер нәтижесі бойынша электрофрикциялық өңдеу лемехтердің тозуға төзімділігін арттырудың тиімді әдісі екені және сормайтпен қаптау әдісін толықтыратын әрі жақсартатын әдіс ретінде қолдануға болатыны туралы қорытынды жасалды.

Кілтті сөздер: электрофрикциялық қатайту, лемех болаты, далалық сынау, тозу көлемі, массаның жоғалуы.

D. B. Buitkenov¹, M. Sahib², L. G. Sulyubayeva¹, *N. P. Raisov¹, B. A. Alibekova¹

¹East Kazakhstan University named after P. Amanzholov

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

²Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS Germany, Munich.

Received 25.10.24.

Received in revised form 29.10.24.

Accepted for publication 25.11.24.

IMPROVING THE DURABILITY OF PLOUGHSHARES BY ELECTROFRICTION TREATMENT UNDER FIELD TEST CONDITIONS

This work is devoted to the study of the influence of electrofriction treatment on plowshares parameters during field tests. In this work field tests were carried out on a field of 100 ha with the soil mountain chestnut with the presence of a large number of rocks and crystalline formations, typical for the mountainous regions of East Kazakhstan. After carrying out the tests, the mass loss for factory serial plowshares with sormite cladding and plowshares after electrofriction hardening (EFH) over sormite in equal quantities of 4 pcs. were investigated. SEM cross-sectional images and linear EDS analysis data were obtained and three zones were clearly visible in the figures. The results of field tests showed that the plowshares after EFH are 14% less prone to wear by weight loss than their factory counterparts. For visual comparison, all 8 plowshares before and after the field tests were scanned on a 3D scanner to compare the amount of wear. According to the results of 3D scanning, the EFH-treated plowshares on average lost 10 % less initial volume compared to the factory ones. Also, according to the results of 3D scanning, based on the models of plowshares were made conclusions about the mechanism of wear of the plowshares during plowing. The most subject to wear is the nose part of the plowshare, namely the tip of the blade edge (plowshare tip), which takes on all the load when plowing the soil. More dense structure obtained by the combined method contributes to the improvement of corrosion resistance of shares. According to the results of the conducted research, it can be concluded that electrofriction treatment is a good means to increase the wear resistance of blades, and can serve as a method that complements and improves the treatment by surfacing with sormite.

Keywords: electrofriction hardening, share steel, field tests, wear volume, weight loss.

**А. М. Ермаханова¹, *М. Н. Мейірбеков²,
Б. М. Байсериков³, Н. Б. Богуспаев⁴**

^{1,2,3}«Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы қ.;

²Қ.И. Сәтпаев атындағы ҚазҰТУ Сәтпаев университеті, Алматы қ.;

⁴«Алматы технологиялық институты» ЖШС, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2145-5122>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-9114>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-3147>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3558-6359>

*e-mail: muhammed_91@mail.ru

ҰҒА КОРПУС ЭЛЕМЕНТТЕРІ ҮШІН КОМПОЗИТТІК МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ДИЭЛЕКТРЛІК ШЫҒЫНЫ МЕН РАДИОМӨЛДІРЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҒА) соңғы жылдары экономика, қорғаныс және ғылыми зерттеулерді қоса алғанда, әртүрлі салаларда бірегей мүмкіндіктері мен әртүрлі қолданбалары үшін кең танымалдылыққа ие болды. Дегенмен, олардың функционалдығы ұшу автономиясы және жердегі станциямен байланыс сияқты бірқатар факторлармен шектеледі. Осы аспектілерді жақсартудың негізгі шешімдерінің бірі - ҰҒА конструкцияларында радиомөлдір материалдарды пайдалану. Төмен диэлектрлік және жоғары радиомөлдірлігі бар полимерлі композиттер заманауи телекоммуникациялық технологияларда шешуші рөл атқарады, бұл сигналдың жоғары жылдамдығын және құрылғылардың жоғары интеграциясын қамтамасыз етеді. Алайда, қажетті сипаттамалары бар осындай диэлектрлік полимерлі композиттерді құру терең талдау мен эксперименттерді қажет ететін күрделі міндет болып табылады. Бұл жұмыста арамидті-эпоксидті композит, шыны талшық, көміртекті пластик және жоғары тығыздықтағы ультра жоғары молекулалық полиэтилен сияқты әртүрлі композиттік материалдардың диэлектрлік жоғалуы мен радиолық мөлдірлігін зерттеудің салыстырмалы нәтижелері келтірілген.

Бұл жұмыста эксперименттер көрсеткендей, бұл материалдардың өткізгіштік пайызы әр түрлі: көміртекті пластик (КП) тек 2,45% құрайды, ал арамид-эпоксидті композит (АЕК) 79,43 %, өте жоғары молекулалы тығыздығы жоғары полиэтилен (ЖМЖТП) 80,16 %, ал шыны талшық (ШТ) 78,88 % көрсетеді. КП-тегі диэлектрлік шығынның тангенс бұрышы басқа композиттерге қарағанда едәуір жоғары, бұл оның тиімділігінің төмендігін көрсетеді. Сонымен қатар, ЖМЖТП тангенс бұрышының ең кіші мәндерін көрсетеді, ал АЭК және шыны талшықтар тұрақты және төмен диэлектрлік шығынға ие, бұл оларды жоғары жиілікті құрылғылар мен байланыс жүйелерінде қолдануға перспективалы етеді.

Кілтті сөздер: полимерлі композициялық материал, диэлектрлік жоғалту, радиомөлдірлік, жиілік, тангенс бұрышы.

Кіріспе

Ұшатын аппараттың (ҰА) конструкциясының маңызды элементтерінің бірі, аэродинамикалық сипаттамаларды және нысанаға дәл бағыттауды айтарлықтай анықтайтын – бұл алдыңғы антенналық қалқан болып табылады [1–2]. Антенналық қалқан жоғары механикалық қасиеттермен қатар, толқын өткізгіштігі жоғары және атмосфералық әсерлерге төзімді болуы тиіс [3]. Алайда, қазіргі уақытта осындай қасиеттерге ие материалды табу ізденісі жалғасуда.

Радиомөлдірлік – материалдың радиотолқындар мен рентген сәулелерін өткізу қабілеті [4]. Радиомөлдірлік материалдың диэлектрлік сипаттамаларымен тығыз байланысты. Яғни, диэлектрлік өтімділік (ϵ) және диэлектрлік жоғалтудың тангенс бұрышы ($\tan\delta$) неғұрлым төмен болса, қалқан арқылы антеннаға өтетін электромагниттік толқынның жоғалуы соғұрлым аз болады. Сондықтан, композициялық материалдардың радиомөлдірлігі мен диэлектрлік сипаттамаларын зерттеу ҰҰА үшін өзекті бағыт болып табылады.

Жоғарыда аталған талаптарды ескере отырып, полимерлі композиттік материалдар (ПКМ), әсіресе арамидо-эпоксидті композиция (АЭК) [5], шыны талшық (ШТ) [6], көміртекті пластик (КП) [7] және өте жоғары молекулалы тығыздығы жоғары полиэтилен (ЖМЖТП) [8], қалқандарды жасау үшін материалдарды таңдауда жақсы кандидаттар болып табылады. Бұл материалдар салыстырмалы түрде төмен диэлектрлік сипаттамаларға және жоғары механикалық қасиеттерге ие [9]. Бұл композиттік материалдардың кешенді қасиеттері негізінен полимерлік матрицаның фазасына, арматураланған талшықтардың фазасына және арматураланған талшықтар мен полимерлік матрица арасындағы шекараға байланысты екені мәлім [9–14].

Қазіргі уақытта жоғарыда көрсетілген композиттік материалдардың диэлектрлік сипаттамалары мен толқынөткізгіштігіне (радиомөлдірлік) қатысты зерттеулер [9–10, 15–20] аз емес. Атап айтқанда, шолу жұмысында [9]. радиомөлдір полимерлік матрица негізіндегі композиттерді құру ϵ және $\tan\delta$ төмен көрсеткіштерімен немесе поляризациялық молекулалық тығыздық пен арматураланған талшықтардың және полимерлік матрицаның поляризация коэффициентін төмендету арқылы, немесе композиттердің фазалық байланысын нығайту арқылы жүзеге асырылатыны айтылған. [15] зерттеуде авторлар Е-шыны/арамида/эпоксидті шайырдан жасалған гибриді композитті шағын көрінетін қалқандарды сипаттау үшін еркін кеңістік әдісін қолданды. Гибриді композитті HF2 шекаралы қалқан 8,50 ГГц резонанстық жиілікте 81 % өткізу коэффициентімен және 0,84 ГГц өткізу жолағымен талаптарға сай болды. Радиомөлдірлік армиленген E, S, D шыныталшықтар және полимерлік матрица негізінде жасалады [16]. Біздің алдыңғы зерттеулерімізде [5] радиотолқындар үшін АЭК өткізгіштік коэффициентінің орташа мәні 89,9 %, ал ШТ үшін 89,01 % құрады. Диэлектрлік өткізгіштікті өлшеу кезінде АЭК 2,874 төмен орташа

диэлектрлік өткізгіштік (ДӨ) мәнін көрсетті, бұл арамид талшығының төмен ДӨ байланысты, ал ШТ деңгейі 4 деп анықталды. Wei, H. және басқалар [6] шыны талшық/политетрафторэтилен композитін 30 ГГц жиілікте төмен диэлектрлік өткізгіштікпен (2.326) жоғары жиілікті байланыс үшін жасады. ШТ модификациясы композиттің диэлектрлік шығынды төмендетуге мүмкіндік берді. [17] зерттеуде 5 %–40 % шыны талшық бөлшектері бар жоғары тиімді EP/GF-X композиттерін өндіру үшін 128 эпоксидті шайыр және шыны талшық бөлшектері пайдаланылды. Олардың диэлектрлік қасиеттерін зерттеу $10-10^5$ Гц жиілік диапазонында 4,862 орташа диэлектрлік өткізгіштік көрсетті. Е-шыны талшығы/эпоксидті шайыр композитінің диэлектрлік анизотропиясы X-диапазонында еркін кеңістік әдісімен өлшенді [18]. Көлемдік үлес пен талшықтардың бағдарын ескере отырып, диэлектрлік өткізгіштікті болжау үшін бинарлы қоспаның теңдеулері ұсынылды және эксперименталды түрде тексерілді. 8–12 ГГц жиілік диапазонында Galehdar және басқалар [19] кеңінен қолданылатын қабат құрылымы бар квазиизотропты КП S-параметрлерін өлшеді, яғни $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$. Нәтижелер көрсеткендей, КП шағылыстыру коэффициенті электр өрісінің бағытына қарамастан (талшық осіне параллель немесе перпендикуляр) 100 %-ға жуық болды. [20] зерттеуде авторлар КП материалдарының және конструкцияларының температураға тәуелді электромагниттік қасиеттерін өлшеу үшін резистивті қыздыру әдісін ұсынды. КП-ның температураға тәуелді электромагниттік қасиеттері бөлме температурасынан 400°C дейінгі температура диапазонында өлшенді. Нәтижелер көрсеткендей, температура КП электромагниттік қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Қазіргі уақытта ЖМЖТП талшықтарынан жасалған полимерлік-матрицалық радиомөлдір композиттерді өндіру тек эксперименттік зерттеулер кезеңінде тұр.

Осылайша, әлемде радиомөлдірлік пен диэлектрлік сипаттамаларға қатысты жоғары сапалы зерттеулер жүргізілгенімен, бұл бағыт одан әрі терең зерттеулерді қажет етеді. Көптеген зерттеулер жеке композиттерге арналса да, диэлектрлік сипаттамалар мен радио радиомөлдірліктің артықшылықтары тұрғысынан салыстырмалы зерттеулер жүргізу қызықты болар еді, өйткені біздің мәліметтеріміз бойынша мұндай зерттеулер ашық ғылыми әдебиеттерде жоқ. Жұмыстың мақсаты - ұқсас жағдайларда алынған КП, АЭК, ЖМЖТП және КП композиттік материалдарының диэлектрлік шығыны мен радиомөлдірлігін салыстырмалы түрде зерттеу болды.

Материалдар мен әдістер

Композиттердің диэлектрлік сипаттамалары мен радиомөлдірлігін зерттеу мақсатында КП, АЭК, ЖМЖТП және ШТ материалдары дайындалды. Әдістің толық сипаттамасы біздің алдыңғы жұмыстарымызда берілген [11]. Композиттік материалдар үшін байланыстырушы ретінде L эпоксидті шайыры және EPH қатайтқышы қолданылды.

Эпоксидті шайыр L (PoxySystems, Германия) кез келген материалдарға жоғары адгезиясымен ерекшеленеді, бірақ бұл ерекше қасиеті тек қатайтқышпен қосылғанда байқалады. Жалпы сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Эпоксидті шайыр L сипаттамалары

Көрсеткіш	Мәні
Тығыздығы, г/см ³	1,14
Тұтқырлығы, МПа*с	710
Тұтану температурасы, °С	150
Қатынасы, гр.	70/30
Қатаю шаралары	20-25°С 24 сағат бойы
Иілуге беріктік шегі, МПа	137
Созуға беріктік шегі, МПа	82,8
Қысуға беріктік, МПа	111

Арматуралаушы материал ретінде 460 г/м² баллистикалық қорғауға арналған арамидті мата – плейн (Tejin Aramid, Нидерланды), көміртекті мата – саржа ЗК-1200–200 (ЖШҚ «Алабуга-Волокно», Ресей), Ortex 360 шыны мата – 300 г/м² (БауТекс, Ресей) және ЖМЖТП (Jiangsu Ptk New Material Technology Co., Ltd., Қытай) қолданылды.

Барлық осы композиттер вакуумдық инфузия әдісімен алынды. Композиттерді вакуумдық инфузия әдісімен қалыптау келесі кезеңдерден тұрды:

- вакуумдық инфузияға арналған құрал-жабдықты дайындау;
- құрғақ арматураны (297 x 420 мм мөлшерінде) вакуумдық жабдыққа салу;
- жабдықты мұқият герметизациялау;
- байланыстырушыны жабдыққа енгізу;
- арматураны вакуумдық сіңіру және оның қатаюы.

ЭС L матрицасы + ЕРН қатайтқышы бар композициялық материалдар 25°С температурада 24 сағат бойы қатаю процесінен өтті.

2-кестеде дайындалған КП, АЭК, ЖМЖТП және ШТ композиттерінің физикалық қасиеттері көрсетілген.

Кесте 2 – ПКМ физикалық қасиеттері

ПКМ	Қалың-дығы, (мм)	Тығыз-дығы, (г/см ³)	Компоненттер қатынасы (арматура/матрица), %	С о з у ғ а беріктігі, МПа	С о к қ ы тұтқырлы-ғы, кДж/м ²
КП	1.4	1,53	65/35	833	195
АЭК	1.4	1,38	65/35	710	475
ЖМЖТП	1.4	0,95	65/35	550	140
ШТ	1.4	1,9	65/35	425	80

Диэлектрлік шығынның тангенс бұрышын өлшеу

Егер диэлектрлік өтімділік (ϵ) материалдың вакууммен (ауамен) салыстырғанда диэлектрикте энергия жинау қабілетін сипаттайтын болса, онда диэлектриктің сапа факторы Q оның энергияны сақтау қабілетін сипаттайды – бұл жинақталған энергияның жоғалған энергияға қатынасы. Айнымалы өрісте жалпы энергия қайта зарядтау энергиясынан және энергия жоғалтуларынан құралады.

$$Q = \frac{\text{бір периодта жинақталған энергия}}{\text{бір периодқа шығындалған энергия}} \quad (1)$$

Сәйкесінше, материалдың жоғалтулары Q шамасына кері пропорционал және жоғалған энергияның жинақталған энергияға қатынасымен анықталады. Диэлектрик болған кезде контурдың сапа факторы диэлектрлік шығындар шамасына төмендейтіні белгілі. Сондықтан диэлектриктегі диэлектрлік шығын бұрышының тангенсі ($\tan\delta$) Q шамасына кері пропорционал болып табылады және (2) формуласы бойынша анықталады:

$$\tan\delta = \frac{1}{Q} \quad (2)$$

мұндағы Q – материалдың, яғни диэлектриктің сапа факторы.

Жазық материалдардың сапа факторын айнымалы электромагниттік өрісте резонаторлық әдіспен өлшеу өте ыңғайлы, бұл үшін Keysight (АҚШ) компаниясының FieldFox microwave analyzer N9915A тізбекті анализаторы қолданылады. Өлшеу резонаторы бір жағы қысқартылған, ені 8 мм және қалыңдығы 0,5 мм болатын 150 мм ұзындықтағы мыс жолақтан тұрады және алюминий Д16 материалынан жасалған экрандалған корпуста орналасқан. Осылайша, жолақ ауалық саңылауда $\lambda/4$ резонаторын 400 МГц диапазонында ұйымдастырады. Егер саңылауға диэлектрлік материал енгізілсе, резонатордың жиілігі 300-350 МГц-ке дейін төмендейді, бұл нақты үлгінің өткізгіштігіне байланысты. СВЧ тізбектерін анализатордың көмегімен әрбір үлгіде 3 рет S21 параметрлері өлшенеді, олардың негізінде резонатордың Q сапа факторы графикалық түрде (3) формуласы бойынша есептеледі және алынған мәндер орташа алынады:

$$Q = f_2 / (f_3 - f_1) \quad (3)$$

мұндағы f_2 –резонанстың орталық жиілігі;

f_1 и f_3 – минус 3 dB деңгейіндегі сипаттаманың шеткі жиіліктері.

Нәтижесінде (4) формуласы алынды:

$$\tan\delta = (f_3 - f_1) / f_2. \quad (4)$$

Үлгілердің диэлектрлік өтімділігін өлшеу

Үлгілердің диэлектрлік өтімділігі конденсаторлық әдіспен өлшенді. ПКМ бар және онсыз конденсатордың сыйымдылығы APPA701 LCR-метрі (APPA, Тайвань) аспабымен өлшенді. Диэлектрлік өтімділік (ДӨ) конденсатормен вакуумдағы немесе ауадағы ($\varepsilon = 1$) сыйымдылықты (C_A) салыстырғанда конденсатордың сыйымдылығының (C) қанша есе артық екенін көрсетеді, бұл формулаға сәйкес:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_A} \quad (3)$$

ПКМ парақтарын конденсатордың электродтарының арасында қысу үшін прецизиондық қыспалар негізінде алюминий электродтарымен (170×138 мм) стенд жасалды. Электродтардың оқшаулағыштары паразиттік сыйымдылықтарды

азайту үшін диэлектрлік өтімділігі төмен капролоннан жасалды. Әр композитте бес рет өлшеу жүргізіліп, нәтижелері орташа есеппен есептелді.

Радиомөлдірлікті өлшеу

Материал үлгісінің радиомөлдірлігін (электромагниттік толқынның өту коэффициенті) үлгінің бар-жоқтығына байланысты таратушы және қабылдаушы рупорлық антенналардың электромагниттік сәулелену деңгейлерін салыстыру әдісімен өлшеді (1-суретке сәйкес). Радиомөлдірлікті өлшеу кезінде максималды мөлшердегі үлгі, шамамен А3 форматы, қолданылды.

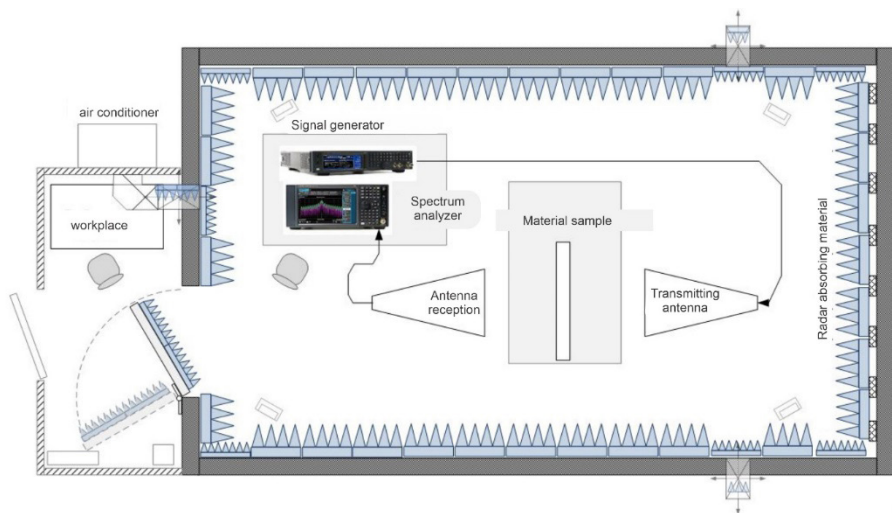
Радиомөлдірлікті өлшеу рупорлық антенналардың және құрылғылардың жұмыс жиілігі ауқымында: 1÷8,5 ГГц жүргізілді. Үлгі антенналармен тікелей байланыста болған жоқ. Әрбір үлгі үшін параметрді кемінде 3 рет өлшеп, нәтижелері орташа есеппен шығарылды. 0,7 ГГц-тан 17 ГГц-қа дейінгі диапазоны бар рупорлық антенналар электромагниттік өрісті берілген қуат ағынының тығыздығымен және қалыпты бағытталған диаграммасымен қоздыру қабілетіне байланысты таңдалды.

А3 форматындағы үлгінің ауданы рупорлық антенналардың ашылу ауданынан 20 %-ға үлкен, бұл өлшеу әдісімен жақсы сәйкес келеді. Бұл жағдайда антенналардың бағытталған диаграммасындағы электромагниттік энергияның негізгі бөлігі үлгіден өтіп, антенналар арасында үлгіден айналып өтпей өтеді.

Үлгі 1-суретке сәйкес ағаш жақтау арқылы тірекке кеңістікте бекітілді. Жақтау металл бекіту элементтерінен туындайтын өлшеу аймағындағы шағылыстарды азайту үшін пластикалық бұрандалармен шет жағынан бекітілген.

Антенналардың бүйірлік жапырақтарының энергиясы үлгіден тысқары өтіп, қабылдаушы антеннаға еніп, өлшеу дәлдігін нашарлатпас үшін радиомөлдірлікті өлшеу радиосәулелерді жұтатын материалмен (ТОРА 39/25/9, ТОРА, Беларусь Республикасы) жабылған жаңғырықсыз экрандалған камерада (ЖЭК) еркін кеңістік әдісімен жүргізілді. Радиосәулелерді жұтатын материал антенналардың бүйірлік жапырақтарының артық энергиясын сіңіреді. Камераның экрандалуы сыртқы эфирлік радио сәулеленулердің, соның ішінде ұялы байланыс операторларының базалық станцияларының әсерін өлшеу нәтижелеріне тигізбеуге мүмкіндік береді.

Материал үлгісінің радиомөлдірлігін өлшеу кезінде қолданылған жабдықтар: спектрлік анализатор N9010B Keysight (Keysight Technologies, АҚШ) ЕМІ өлшеу қабылдағышымен, Signal Generator N5071 (Keysight Technologies, АҚШ) сигнал генераторы, Пб-23М/2 рупорлық антенналар (МНИПИ, Беларусь Республикасы).

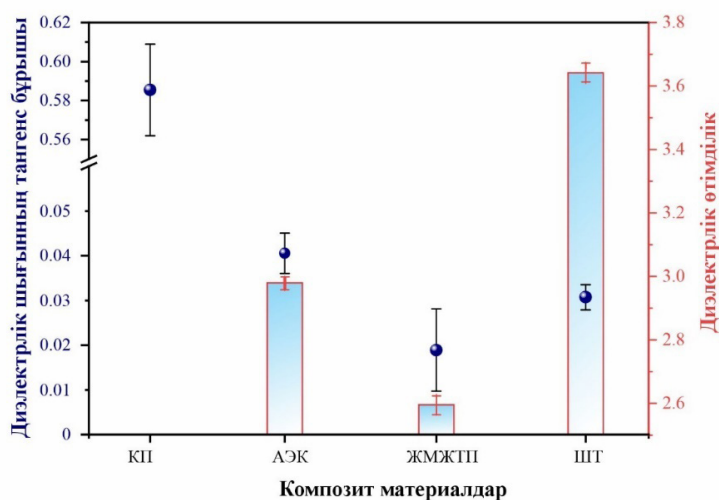


Сурет 1 – Материал үлгісінің радиожарқындылығын ЖЭК-те өлшеу схемасы

Нәтижелер және талқылаулар

Үлгілердің диэлектрлік сипаттамаларын зерттеу

Барлық алынған ПКМ диэлектрлік сипаттамаларының нәтижелері 2-суретте көрсетілген. Көміртекті пластиктің диэлектрлік өтімділігін (ДӨ) оның жоғары электр өткізгіштігіне байланысты өлшеу мүмкін болмады. Әртүрлі бағытта өрілген көміртек талшықтарының бірнеше қабаттары электромагниттік толқындарды ішінара жұтатын экран жасайды. Қалған композиттердің ДӨ келесідей тіркелді: АЭК - 2,9, ЖМЖТП - 2,56, ШТ - 3,64. ЖМЖТП-тің полярсыз табиғаты минималды диэлектрлік өтімділікті қамтамасыз етеді. АЭК және ШТ-дегі арматуралық талшықтар да ДП-ға әсер етеді, бұл ретте арамидті талшықтар шыны талшыққа қарағанда электромагниттік сигналдарды жақсырақ басады.



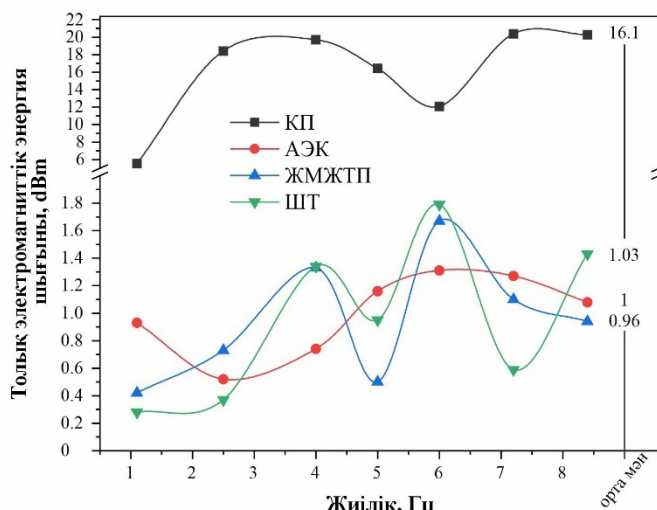
Сурет 2 – ПКМ-дың диэлектрлік сипаттамалары

Диэлектрлік шығын бұрышының тангенсі негізінен полимерлік композиттің байланыстырғышына байланысты, содан кейін толтырғышқа. Барлық композиттерде байланыстырғыш материал ретінде бірдей эпоксидті шайыр қолданылды. 2-суретте әрбір композиттің өлшемдерінің орташа нәтижелері көрсетілген. Деректерді салыстыру әртүрлі жиіліктердегі үш маркер бойынша жүргізілді: f_1 , f_2 , f_3 . Нәтижелер КП диэлектрлік шығын бұрышының тангенсі басқа ПКМ-ларға қарағанда айтарлықтай жоғары екенін көрсетті. Бұл КП-да $\tan\delta$ мәндерінің жоғары болуына әкеледі. Барлық композиттердің ішінде салыстырмалы түрде ең төменгі $\tan\delta$ мәндері ЖМЖТП-те тіркелді. ЖМЖТП полиэтиленнің бір түрі болып табылады, ал полиэтилен өз кезегінде полярсыз полимер болып табылады. ЖМЖТП-тің химиялық құрамы көміртек пен сутегі атомдарының арасындағы байланыстарды қамтиды, бұл оны полярсыз етеді. Сондықтан электр өрісінің әсерінен дипольдер реттелмейді. Алайда, электрондардың электр өрісінің бағытына қарай қозғалуы салдарынан біршама электрондық поляризация пайда болады, ол лезде жүзеге асады. Полимерлер жоғары меншікті кедергіге және төмен диэлектрлік өтімділікке ие. АЭЖ және ШТ 0,03-0,04 аралығында тіркелді. Бұл екі композит те арматуралық талшық материалдарының ерекшеліктеріне байланысты төмен мәндерді көрсетті. Арамид электромагниттік сигналдардың сәулеленуін шыны талшыққа қарағанда көбірек басады, өйткені шыны талшықтың диэлектрлік өтімділігі жоғарырақ. Алайда, ДӨ көптеген факторларға (ылғалдылық, кеуектер, қоспалар және т.б.) байланысты екенін және нақты материал мен пайдалану шарттарына байланысты кең ауқымда өзгеруі мүмкін екенін түсіну қажет.

Үлгілердің радиомөлдірлігін зерттеу

Келтірілген $\tan\delta$ деректеріне сәйкес, олар еркін кеңістік әдісі бойынша алдыңғы талдау нәтижелерімен сәйкес келеді. Импеданс сәйкестігі теориясына сәйкес, ортаның диэлектрлік параметрлері неғұрлым жоғары болса, электромагниттік толқын соғұрлым қатты шағылады, бұл электромагниттік толқынның материал арқылы өту тиімділігін төмендетеді. Сонымен қатар, материал радиомөлдірлікті өлшеудегі «саңылау» ретінде пайдаланылғанда, толқын фронты материалдың талшықтарына көлденең (перпендикуляр) өтсе, толқындардың әлсіреуі минималды болуы мүмкін.

3-суретте радиомөлдірлікті 1-ден 8,4 ГГц дейінгі бірнеше диапазонда өлшеудің салыстырмалы нәтижелері көрсетілген. Барлық графиктер толқын тәрізді сипатқа ие және әртүрлі кезендерге ие. Қасиеттердегі сызықтық емес мінез-құлық көптеген факторлармен байланысты болуы мүмкін. Полимерлі композиттер көбінесе әртүрлі фазалардан немесе қоспалардан (мысалы, күшейткіштерден) тұрады. Сызықтық емес өзгерістер осы фазалардың әртүрлі диэлектрлік қасиеттері және олардың электромагниттік толқындармен өзара әрекеттесуінен туындауы мүмкін. Кейбір композиттер белгілі бір жиіліктерде энергияны сіңіре алады, бұл радиомөлдірліктің сызықтық емес өзгеруіне әкеледі. Бұл композиттің құрылымындағы тербеліс резонанстарымен байланысты болуы мүмкін. Егер материалда біртектіліктің болмауы немесе фазалар шекаралары болса, радиотолқындар көп рет шашырауға ұшырауы мүмкін, бұл сызықтық емес әсерлерге әкеледі.

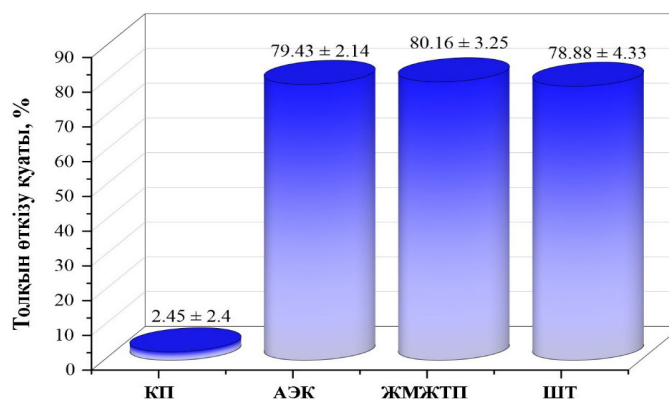


Сурет 3 – Алынған барлық ПКМ-нің радиомөлдірлігін зерттеу нәтижелері

Толқындардың ең аз әлсіреуі, яғни ең жақсы радиомөлдірлік, ЖМЖТП сынау кезінде байқалды. Бұл нәтижелер осы үлгінің төмен тапд көрсеткішіне байланысты екені анық. Алайда, қабатты композиттердің анизотропиялық қасиеттеріне байланысты ең жақсы радиомөлдірлік әрқашан ең төменгі тапд мәніне сәйкес келмейді. Мысалы, АЭК радиомөлдірлігі ШТ-қа қарағанда жақсырақ, бірақ ШТ-тың диэлектрлік сипаттамалары төмен. КП-да көміртектің болуы радиожіліктердің барлық диапазонында өрістің айтарлықтай әлсіреуіне әкеледі. 20 dB мәні сигнал қуатының 100 есе әлсіреуін көрсетеді. Сондықтан оны радиожұтушы материалдар қатарына жатқызуға болады.

4-ші суреттегі деректерден алынған радиомөлдір композиттердің орташа әлсіреу мәндерін қуат қатынасына түрлендіруге болады. Кернеу, ток және қуат қатынастарының кестесіне сәйкес, сигнал толқынының әлсіреуін (дБм) қуат қатынасына (материал арқылы өткен қуат бөлігі) түрлендіруге болады. Нәтижесінде материал арқылы өткен қуат бөлігі өткізу коэффициентіне тең болады. 4-суретте материалға байланысты композит арқылы өткен қуаттың бөлігі көрсетілген. Көріп отырғанымыздай, ЖМЖТП және АЭК композиттері радиотолқындарды өткізу қабілеті жоғары.

АЭК, ЖМЖТП және ШТ үшін өткізу коэффициенттері шамамен бірдей мәндерге ие. АЭК молекулалық құрылымының жоғары мөлдірлігі болуы мүмкін, бұл электромагниттік толқындардың, соның ішінде радиотолқындардың жақсы өтуіне ықпал етеді.



Сурет 4 – Алынған барлық ПКМ-нің радиомөлдірлігін зерттеу нәтижелері

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қолдауымен АР09058225 «Әскери пилотсыз ұшу аппараттары корпустары мен аэроғарыштық техника үшін жоғары беріктікті радио өткізгіш композитті алудың отандық технологиясын әзірлеу» гранттық жоба шеңберінде орындалды.

Қорытынды

Арамид-эпоксидті композиттің, шыныталшықтың, көміртекті пластиктің және өте жоғары молекулалық тығыздығы бар полиэтиленнің диэлектрлік сипаттамалары мен радиомөлдірлігіне салыстырмалы зерттеулер жүргізілді. Төмен диэлектрлік өтімділік мәндерін АЭК және ЖМЖТП электромагниттік сигналдарды басу және композиттердің полярсыз табиғатының арқасында көрсетті. Нәтижелер бойынша барлық композиттердің ішінде ең төменгі $\tan\delta$ мәндері полярсыз қасиеттеріне байланысты ЖМЖТП тіркелді. Диэлектрлік шығынның мәндері бойынша АЭК және ШТ екеуі де тұрақты және төмен мәндерді көрсетті. Зерттелген материалдардың радиомөлдірлігі 1÷4, 4÷6 және 8÷8,5 ГГц жиілік диапазоңдарында еркін кеңістікте өлшеу әдісімен бағаланды. Эксперименттердің нәтижелері бойынша әртүрлі материалдар үшін келесі өткізгіштік пайыздары анықталды: КП – 2,45%, АЭК – 79,43%, ЖМЖТП – 80,16%, ШТ – 78,88%. Эксперименттер нәтижесінде АЭК, ЖМЖТП және ШТ үшін өткізу коэффициенттері ұқсас деңгейде екені анықталды. Бұл осы композиттердің аталған жиілік диапазоңында салыстырмалы радиомөлдірлікке ие екенін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелері ЖМЖТП-тің диэлектрлік шығын бұрышының тангенсі мен өткізгіштігі төмен екенін, бұл оның жоғары радиомөлдірлікке ие екенін көрсетеді. Бұл қасиеттер ЖМЖТП-ті электромагниттік сигналдарды тиімді өткізу қажет болатын салаларда қолдануға болашағы зор материал етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Русин, М. Ю.** Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов. – М.: Р Издательство: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2005. – 64 с.
- 2 **Rogov, D. A., Latysh, S. I., Vasyukov, M. V.** Development and design choice of ceramic rocket fairing and metal bulkhead joint // *Mechanical Engineering Technology*. – 2015. – Vol. 22.2. – P. 94–102.
- 3 **García, C., Fittipaldi, M., Grace, L. R.** Epoxy/montmorillonite nanocomposites for improving aircraft radome longevity // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2015. – Vol. 132. – P. 42691–42670.
- 4 **Robert, A. N.** *Squire's Fundamentals of Radiology*: Harvard University Press. 5th edition, 1997. – 651 p.
- 5 **Yermakhanova, A. M., Kenzhegulov, A. K., Meirbekov, M. N., Samsonenko, A. I., Baiserikov, B. M.** Study of radio transparency and dielectric permittivity of glass- and aramid epoxy composites // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2023. – Vol. 20(2-44). – P. 70–78. – <https://doi.org/10.31489/2023NO2/70-78>.
- 6 **Wei, H., He, W., Li, Q., Yu, Y., Xu, R., et al.** Glass fiber/polytetrafluoroethylene composite with low dielectric constant and thermal stability for high-frequency application // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49. № 17. – P. 28449-28456.
- 7 **Elimat, Z. M., Hamideen, M. S., Schulte, K. I., Wittich, H., De la Vega, A., Wichmann, M., Buschhorn, S.** Dielectric properties of epoxy/short carbon fiber composites // *Journal of materials science*. – 2010. – Vol. 45. – P. 5196-5203.
- 8 **Shiyanova, K.A. et. all.** Segregated Network Polymer Composites with High Electrical Conductivity and Well Mechanical Properties based on PVC, P(VDF-TFE), UHMWPE, and rGO // *ACS Omega*. – 2020. – Vol. 5. № 39. – P. 25148-251555. – <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02859>.
- 9 **Tang, L., Zhang, J., Tang, Y., Kong, J., Liu, T., Gu, J.** Polymer matrix wave-transparent composites: A review. // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2021. Vol. 75. – P. 225–251. – <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.09.017>.
- 10 **Li, R., Yang, X., Li, J., Shen, Y., Zhang, L., Lu, R., Zhang, T.** Review on polymer composites with high thermal conductivity and low dielectric properties for electronic packaging // *Materials Today Physics*. – 2022. – Vol. 22. – P. 100594.
- 11 **Yermakhanova, A. M., Baiserikov, B. M., Kenzhegulov, A. K., Meirbekov, M. N., and Zhumadilov, B. Y.** Study on methods to improve the mechanical properties of aramid/epoxy composites. // *Journal of Elastomers & Plastics*. – 2023. – Vol. 55. № 2. – P. 331–346. – <https://doi.org/10.1177/00952443221147645>.
- 12 **Li, W., Huang, W., Kang, Y., Gong, Y., Ying, Y., Yu, J.** Fabrication and investigations of G-POSS/cyanate ester resin composites reinforced by silane-treated silica fibers // *Composites Science and Technology* – 2019. – vol. 173. – P. 7–14. – <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.022>.

13 **Zhao, Z., Zhou, G., Yang, Z., Cao, X., Jia, D., Zhou, Y.** Direct ink writing of continuous SiO₂ fibre reinforced wave-transparent ceramics // *Journal of Advanced Ceramics*. – 2020. – Vol. 9. – P. 403–412. – <https://doi.org/10.1007/s40145-020-0380-y>.

14 **Ospanali, A. T., Kenzhegulov, A. K., Zhumadilov, B. E., Suyundykova, G. S., Medyanova, B. S.** Obtaining of carbon nanofibers based on polyacrylonitrile by the method of electrospinning // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2020. – Vol. 33. №. 1(33). – P. 35–38. – <https://doi.org/10.31489/2020No1/35-38>.

15 **Choi, I., Lee, D., Lee, D. G.** Hybrid composite low-observable randome composed of Eglass/aramid/epoxy composite sandwich construction and frequency selective surface // *Compos. Struct.* – 2014. – Vol. 117. – P. 98–104.

16 **Parizi, J., Shahverdi, H., Roa, Rovira, J. J., Pipelzadeh, E., Martinez, M., Cabot, A., Guardia, P.** Improving mechanical properties of glass fiber reinforced polymers through silica-based surface nanoengineering // *ACS Appl. Poly. Mater.* – 2020. – Vol. 2(7). – P. 2667–2675. – <http://dx.doi.org/10.1021/acsapm.0c00295>.

17 **Nsengiyumva, W., Zhong, S., Chen, X., Makin, A. M., Chen, L., Wu, L., Zheng, L.** Toward tailoring the mechanical and dielectric properties of short glass fiber-reinforced epoxy composites // *Polymer Composites*. – 2023. – Vol. 45. – P. 535-554. – <http://dx.doi.org/10.1002/pc.27796>.

18 **Chin, W. S., Lee, D. G.** Binary mixture rule for predicting the dielectric properties of unidirectional E-glass/epoxy composite // *Compos. Struct.* – 2006. – Vol. 74. – P. 153–162.

19 **Galehdar, A., Rowe, W. S. T., Ghorbani, K., Callus, P. J., John, S., Wang, C. H.** The effect of ply orientation on the performance of antennas in or on carbon fiber composites, *Prog. Electronmag. Res. Pier* 116. – 2011. – P. 123–136. – <https://doi.org/10.2528/PIER11031512>.

20 **Yang, Y., Li, Y., Zhou, J., Song, H., Tao, S., Hao, X., Wen, Y.** A resistance heating assisted free space method to measure temperature-dependent electromagnetic properties of carbon fiber reinforced polymer composites // *Polymer Testing*. – 2023. – Vol. 117. – P. 8.

REFERENCES

1 **Rusin, M. Yu.** *Proyektirovaniye golovnykh obtekateley raket iz keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov* [Design of rocket nose fairings made of ceramic and composite materials] – Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. – 2005. – 64 p.

2 **Rogov, D. A., Latysh, S. I., Vasyukov, M. V.** Development and design choice of ceramic rocket fairing and metal bulkhead joint // *Mechanical Engineering Technology*. – 2015. – Vol. 22.2. – P. 94–102.

3 **García, C., Fittipaldi, M., Grace, L. R.** Epoxy/montmorillonite nanocomposites for improving aircraft radome longevity // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2015. – Vol. 132. – P. 42691–42670.

4 **Robert, A. N.** Squire's Fundamentals of Radiology: Harvard University Press. 5th edition, 1997. – 651 p.

5 **Yermakhanova, A. M., Kenzhegulov, A. K., Meirbekov, M. N., Samsonenko, A. I., Baiserikov, B. M.** Study of radio transparency and dielectric permittivity of glass-and aramid epoxy composites // Eurasian Physical Technical Journal. – 2023. – Vol. 20(2-44). – P. 70–78. – <https://doi.org/10.31489/2023NO2/70-78>.

6 **Wei, H., He, W., Li, Q., Yu, Y., Xu, R., et al.** Glass fiber/polytetrafluoroethylene composite with low dielectric constant and thermal stability for high-frequency application // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49. № 17. – P. 28449–28456.

7 **Elimat, Z. M., Hamideen, M. S., Schulte, K. I., Wittich, H., De la Vega, A., Wichmann, M., Buschhorn, S.** Dielectric properties of epoxy/short carbon fiber composites // Journal of materials science. – 2010. – Vol. 45. – P. 5196–5203.

8 **Shiyanova, K. A. et. all.** Segregated Network Polymer Composites with High Electrical Conductivity and Well Mechanical Properties based on PVC, P(VDF-TFE), UHMWPE, and rGO // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5. № 39. – P. 25148-251555. – <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02859>.

9 **Tang, L., Zhang, J., Tang, Y., Kong, J., Liu, T., Gu, J.** Polymer matrix wave-transparent composites: A review. // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. Vol. 75. – P. 225–251. – <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.09.017>.

10 **Li, R., Yang, X., Li, J., Shen, Y., Zhang, L., Lu, R., Zhang, T.** Review on polymer composites with high thermal conductivity and low dielectric properties for electronic packaging // Materials Today Physics. – 2022. – Vol. 22. – P. 100594.

11 **Yermakhanova, A. M., Baiserikov, B. M., Kenzhegulov, A. K., Meirbekov, M. N., and Zhumadilov, B. Y.** Study on methods to improve the mechanical properties of aramid/epoxy composites. // Journal of Elastomers & Plastics. – 2023. – Vol. 55. № 2. – P. 331–346. – <https://doi.org/10.1177/00952443221147645>.

12 **Li, W., Huang, W., Kang, Y., Gong, Y., Ying, Y., Yu, J.** Fabrication and investigations of G-POSS/cyanate ester resin composites reinforced by silane-treated silica fibers // Composites Science and Technology – 2019. – vol. 173. – P. 7–14. – <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.022>.

13 **Zhao, Z., Zhou, G., Yang, Z., Cao, X., Jia, D., Zhou, Y.** Direct ink writing of continuous SiO₂ fibre reinforced wave-transparent ceramics // Journal of Advanced Ceramics. – 2020. – Vol. 9. – P. 403–412. – <https://doi.org/10.1007/s40145-020-0380-y>.

14 **Ospanali, A. T., Kenzhegulov, A. K., Zhumadilov, B. E., Suyundykova, G. S., Medyanova, B. S.** Obtaining of carbon nanofibers based on polyacrylonitrile by the method of electrospinning // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. – Vol. 33. №. 1(33). – P. 35–38. – <https://doi.org/10.31489/2020No1/35-38>.

15 **Choi, I., Lee, D., Lee, D. G.** Hybrid composite low-observable random composed of E-glass/aramid/epoxy composite sandwich construction and frequency selective surface // Compos. Struct. – 2014. – Vol. 117. – P. 98-104.

16 **Parizi, J., Shahverdi, H., Roa, Rovira, J.J., Pipelzadeh, E., Martinez, M., Cabot, A., Guardia, P.** Improving mechanical properties of glass fiber reinforced

polymers through silica-based surface nanoengineering // ACS Appl. Poly. Mater. – 2020. – Vol. 2(7). – P. 2667-2675. – <http://dx.doi.org/10.1021/acsapm.0c00295>.

17 Nsengiyumva, W., Zhong, S., Chen, X., Makin, A. M., Chen, L., Wu, L., Zheng, L. Toward tailoring the mechanical and dielectric properties of short glass fiber-reinforced epoxy composites // Polymer Composites. – 2023. – Vol. 45. – P. 535-554. – <http://dx.doi.org/10.1002/pc.27796>.

18 Chin, W.S., Lee, D.G. Binary mixture rule for predicting the dielectric properties of unidirectional E-glass/epoxy composite // Compos. Struct. – 2006. – Vol. 74. – P. 153–162.

19 Galehdar, A., Rowe, W. S. T., Ghorbani, K., Callus, P. J., John, S., Wang, C. H. The effect of ply orientation on the performance of antennas in or on carbon fiber composites, Prog. Electronmag. Res. Pier 116. – 2011. – P. 123–136. – <https://doi.org/10.2528/PIER11031512>.

20 Yang, Y., Li, Y., Zhou, J., Song, H., Tao, S., Hao, X., Wen, Y. A resistance heating assisted free space method to measure temperature-dependent electromagnetic properties of carbon fiber reinforced polymer composites // Polymer Testing. – 2023. – Vol. 117. – P. 8.

02.10.23 ж. баспаға түсті.

21.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. М. Ермаханова¹, *М. Н. Мейрбеков², Б. М. Байсериков³, Н. Б. Богуснаев⁴*

^{1,2,3}АО «Национальный центр космических исследований и технологий», г. Алматы;

³Satbayev University, г. Алматы;

⁴ТОО «Алматинский институт технологий», г. Алматы.

Поступило в редакцию 02.10.23.

Поступило с исправлениями 21.10.24.

Принято в печать 05.12.2024.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И РАДИОПРОЗРАЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БПЛА

В последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) приобрели широкую популярность благодаря своим уникальным возможностям и разнообразным применениям в различных сферах, включая экономику, оборону и научные исследования. Однако их функциональность ограничена рядом факторов, таких как автономность полета и связь с наземной станцией. Одним из ключевых решений для улучшения этих аспектов является использование радиопрозрачных материалов в конструкциях БПЛА. Полимерные композиты с низкими диэлектрическими характеристиками и высокой радиопрозрачностью играют ключевую роль в современных телекоммуникационных технологиях, обеспечивая высокую скорость передачи сигналов и высокую степень интеграции устройств. Однако создание таких

диэлектрических полимерных композитов с необходимыми характеристиками представляет собой сложную задачу, требующую глубокого анализа и экспериментов. В данной работе представлены сравнительные результаты исследования диэлектрических потерь и радиопрозрачности различных композитных материалов, таких как арамидно-эпоксидный композит, стеклопластик, углепластик и сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности.

В данной работе эксперименты показали, что процент пропускания для этих материалов варьируется: углепластик (УП) имеет всего 2,45 %, тогда как арамидно-эпоксидный композит (АЭК) демонстрирует 79,43 %, сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) показывает 80,16 %, а стеклопластик (СП) – 78,88 %. Угол тангенса диэлектрических потерь у УП значительно выше, чем у других композитов, что указывает на его низкую эффективность. В то же время СВМПЭ проявляет наименьшие значения угла тангенса, а АЭК и стеклопластик обладают стабильной и низкой диэлектрической потерей, что делает их перспективными для применения в высокочастотных устройствах и системах связи.

Ключевые слова: полимерный композитный материал, диэлектрическая потеря, радиопрозрачность, частота, угол тангенса.

A. M. Yermakhanova¹, *M. N. Meirbekov², B. M. Baiserikov³, N. B. Boguspaev⁴

^{1,2,3}National Center for Space Study and Technology, Almaty

³Satbayev University, Almaty;

⁴Almaty Institute of Technology LLP, Almaty

Received 02.10.24.

Received in revised form 21.10.23.

Accepted for publication 05.12.24.

INVESTIGATION OF DIELECTRIC LOSSES AND RADIO TRANSPARENCY OF COMPOSITE MATERIALS FOR UAV BODY ELEMENTS

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAV) have gained widespread popularity due to their unique capabilities and diverse applications in various fields, including the economy, defense, and scientific research. However, their functionality is limited by a number of factors, such as flight autonomy and communication with the ground station. One of the key solutions for improving these aspects is the use of radiotransparent materials in UAV designs. Polymer composites with low dielectric characteristics and high radio transparency play a key role in modern telecommunications technologies, providing high signal transmission rates and a high degree of device integration. However, the creation of such dielectric polymer composites with the necessary characteristics is a difficult task that requires in-depth analysis and experiments. This paper presents comparative results of a study of dielectric losses and radio transparency of various composite materials, such as aramid-epoxy composite, fiberglass, carbon fiber and ultrahigh molecular weight high-density polyethylene.

In this work, experiments have shown that the percentage of transmission for these materials varies: carbon fiber (CF) has only 2.45%, whereas aramid-epoxy composite (AEC) shows 79.43%, ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) shows 80.16%, and fiberglass (FG) — 78.88%. The dielectric loss tangent angle of the UP is significantly higher than that of other composites, which indicates its low efficiency. At the same time, UHMWPE exhibits the lowest values of the tangent angle, and AEC and fiberglass have stable and low dielectric loss, which makes them promising for use in high-frequency devices and communication systems.

Keywords: polymer composite material, dielectric loss, radio transparency, frequency, tangent angle.

***A. S. Ibraim¹, B. N. Absadykov²**

Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3054-3968>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-0958>

*e-mail: ibraimaiibek@gmail.com

POSSIBILITIES OF PRODUCING ELECTRIC MOTORS USING 3D PRINTERS

This paper explores the possibilities and potential of 3D printing in the production of electric motor components, focusing on its transformative impact on prototyping, customization, and manufacturing. The main goal is to investigate the feasibility of producing functional and efficient electric motors using additive manufacturing technologies, particularly for Brushless DC (BLDC) motors. Key aspects include identifying which components can be effectively 3D printed and understanding the benefits and challenges of integrating 3D-printed parts into motor assemblies.

The study examines successful examples of 3D-printed electric motors, such as Christoph Laimer's 600W Halbach-array BLDC motor and others designed for drones, robotics, and educational purposes. These examples highlight the ability of 3D printing to create custom geometries, optimize material usage, and rapidly iterate designs. Furthermore, the research details ongoing efforts to print and assemble a Laimer-inspired 600W BLDC motor, emphasizing technical characteristics and the role of 3D printing in improving its efficiency and adaptability.

By showcasing the potential applications of 3D-printed motors across fields like robotics, electric vehicles, and aerospace, the study concludes that additive manufacturing represents a groundbreaking shift in electric motor development. It not only accelerates prototyping processes but also reduces costs and opens new avenues for innovation in design and performance optimization.

Keywords: Mechanical engineering, additive manufacturing, automotive industry, 3D printing, industry 4.0, drones, unmanned vehicles.

Introduction

The advent of 3D printing has revolutionized manufacturing across industries, enabling the creation of complex, custom designs with unprecedented efficiency. In the field of electric motors, this technology holds immense promise, offering the ability to produce components with high precision, reduced weight, and tailored performance characteristics. Electric motors, integral to applications such as robotics, electric vehicles, and renewable energy systems, stand to benefit greatly from the flexibility of additive manufacturing. This research explores the feasibility of using 3D printing to fabricate various motor components, focusing on key technologies such as FDM, SLS, and SLM, and highlights how this approach can accelerate prototyping, reduce production costs, and drive innovation in motor design.

Materials and methods

3D printing offers immense possibilities for manufacturing electric motor components such as stators, rotors, housings, and even intricate parts like windings using conductive filaments. This approach allows the creation of complex geometries that are challenging or impossible to achieve with traditional methods. Additionally, 3D printing facilitates the integration of lightweight materials like composites and polymers, resulting in motors with enhanced performance and energy efficiency. The technology also enables the creation of customized motors tailored to specific applications, reducing lead times and manufacturing costs while supporting sustainable practices through reduced material waste.

Materials used in 3D printing electric motors vary depending on the printing technology and the motor component being produced. For structural parts like casings, Fused Deposition Modeling (FDM) often utilizes polymers such as ABS, PLA, and PETG, which are lightweight and cost-effective. For components requiring enhanced thermal and mechanical properties, such as housings and supports, engineering-grade materials like polycarbonate or carbon-fiber-reinforced filaments are employed. For magnetic and conductive components, technologies like Selective Laser Sintering (SLS) and Selective Laser Melting (SLM) enable the use of metal powders, including aluminum, copper, and steel alloys, which provide the required durability, conductivity, and thermal management. Binder Jetting and Direct Metal Laser Sintering (DMLS) are also employed for fine, complex geometries, such as windings or rotors. Emerging materials like magnetic composites and conductive polymers further expand possibilities, allowing for lightweight and efficient designs tailored to specific use cases. These technologies collectively offer flexibility in prototyping, performance optimization, and rapid production.

Examples of 3D-Printed Electric Motors and Their Uses. Several organizations and research groups have already demonstrated the feasibility of 3D-printed electric motors:

Ni9 Siemens' AM Stator: Siemens produced a 3D-printed motor stator using additive manufacturing, achieving improved cooling and performance [1].

Ford's Custom Motors: Ford used 3D printing to prototype electric motors for its vehicles, reducing production time by 60% [2].

MIT's Flexible Windings: Researchers at MIT developed flexible windings printed with conductive filaments, enhancing motor adaptability [3].

GE's Aviation Motors: GE produced 3D-printed components for aircraft engines, improving reliability and reducing weight [4].

Maker communities: Hobbyists and innovators have designed and 3D-printed small BLDC motors for drones and robots, showcasing accessibility and scalability [5].

These examples underscore the versatility of 3D-printed motors across industries, from automotive and aviation to consumer electronics and robotics.

Examples of 3D-Printed Electric Motors and Their Uses. Siemens' Additively Manufactured Stator. Siemens developed a groundbreaking 3D-printed stator for an electric motor, leveraging additive manufacturing to integrate complex cooling channels directly into the structure. This innovation not only improved heat dissipation but also

increased the motor's efficiency and power density. Such stators are used in industrial applications, including high-performance drives for machinery and transportation systems.

Ford has extensively used 3D printing to prototype electric motors for its hybrid and electric vehicles. By printing housings, rotors, and even certain winding supports, the company reduced the prototyping time by up to 60%. This approach also allowed for iterative design improvements during testing phases, contributing to faster innovation cycles in automotive technology.

MIT researchers created 3D-printed windings using conductive and flexible filaments, which enabled motors to adapt their shape for specific applications. These motors have potential use cases in robotics and wearable devices, where compact and adaptable motors are essential. The approach also minimizes reliance on traditional copper windings, making the motors lighter and easier to assemble.

General Electric (GE) developed 3D-printed components for electric motors in aviation, focusing on lightweight and robust designs. The company used additive manufacturing to produce heat-resistant parts for aircraft engines, improving their power-to-weight ratio and reliability. These motors are now being tested for use in electric aircraft propulsion systems, which aim to reduce carbon emissions in aviation.

Hobbyists and small-scale innovators have successfully designed and 3D-printed small brushless DC (BLDC) motors for drones and robotics. For instance, some makers use PLA and PETG filaments combined with neodymium magnets to print stators and rotors. These motors, though relatively low-powered, demonstrate how accessible 3D printing has made motor development for educational projects and DIY applications.

Additive Drives, a German company, has pioneered fully 3D-printed electric motors, including functional rotors, stators, and housings. Using advanced materials like magnetically optimized polymers, they have produced motors capable of achieving high torque densities comparable to conventionally manufactured counterparts. These motors are used in e-mobility solutions, such as electric bicycles and scooters.

Industrial Equipment: Siemens' innovations are tailored for high-demand industrial settings, enabling motors to operate under extreme conditions with enhanced durability and efficiency.

Automotive: Ford's use of 3D-printed motors streamlines the development of electric vehicles, reducing costs and time to market.

Aerospace: GE's designs pave the way for greener aviation, aligning with global sustainability goals.

Education and DIY: Maker projects inspire budding engineers and hobbyists to explore motor design, fostering creativity and technical skills.

Wearable Technology and Medical Devices: MIT's adaptable motors have immense potential in wearable exoskeletons and assistive devices for rehabilitation.

These examples highlight how 3D-printed motors have moved from theoretical concepts to practical implementations, revolutionizing diverse industries with their versatility, efficiency, and innovation [6].

Cristoph Laimer is a 3D designer and 3D printing engineer that started designing fully plastic Halbach motor for printing. He made few prototypes and test as a drone or plane motor. The Laimer 600W BLDC motor represents a significant step forward in compact motor technology. By optimizing for efficiency and weight, it meets the demands of modern electric systems, offering solutions for industries that prioritize sustainability and performance. Its design aligns with trends toward lightweight, modular, and energy-efficient systems. Figure 1 shows main components that should be printed on 3D printer by Laimer [7].

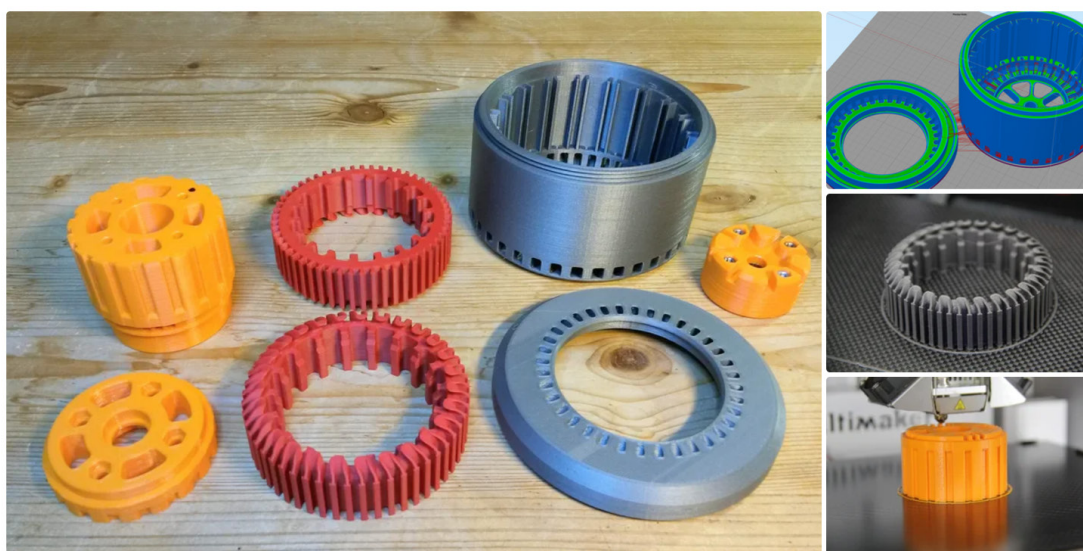


Figure 1 – Printed details in Laimer’s example [7]

In summary, the Laimer 600W motor is a testament to innovation in electric motor design, addressing the growing need for high-performance, environmentally friendly solutions in diverse applications.

Laimer 600W BLDC Motor: Specifications and Features

The Laimer 600W Brushless DC (BLDC) motor is designed for high efficiency, lightweight applications, and exceptional performance. This motor combines advanced materials and precision engineering, making it ideal for robotics, drones, and compact electric vehicles.

Key Specifications:

Rated Power: 600W

Voltage Range: 36-48V

Maximum Speed: 3200-3300 RPM

Efficiency: ~90%

Torque: 1.8-2.0 Nm

Weight: ~2.1 kg

Cooling System: Passive air cooling

Construction: Lightweight aluminum housing with optimized heat dissipation

Design Features:

Compact and Lightweight: The motor's compact size ensures easy integration into small and mobile systems without compromising on power output.

High Efficiency: Advanced magnetic materials and precision windings contribute to efficiency levels above 90 %, reducing energy waste and improving battery life.

Durability: Built for extended use, with robust bearings and materials that resist wear and thermal damage.

Silent Operation: The design minimizes vibration and noise, making it suitable for applications where quiet performance is critical [7].

Applications of the Laimer 600W Motor:

Robotics: Powering precise actuators and robotic arms where compact, efficient, and high-torque motors are required.

Drones and UAVs: Offering a lightweight and powerful solution for propulsion systems in unmanned aerial vehicles.

E-Bikes and Scooters: Supporting small personal mobility devices with a balance of power, efficiency, and portability.

Industrial Automation: Driving conveyor belts, small pumps, and compact automated systems.

Medical Equipment: Suitable for powering devices such as powered wheelchairs or exoskeletons due to its efficiency and compactness.

There will be several tests to know efficiency in work under pressure, electric motors always have voltage drawdown under the heavy weight or pressure. If tests show good results, motors can be used in electric vehicle prototypes [8].

Results and discussion.

Printing BLDC motor. Our team embarked on the task of printing and assembling the Laimer 600W electric BLDC motor, leveraging the precision and flexibility of additive manufacturing. Using high-performance nylon-based composites for the housing and stator, along with magnetically optimized filaments for the rotor, we successfully assembled the motor with a peak efficiency of approximately 88.2%, a peak speed of 3,150 RPM, and a weight of 1.98 kg. This initiative not only validated the practicality of 3D printing electric motors but also demonstrated the ability to customize components for enhanced performance and simplified assembly [9]. Figure 2 shows main elements that was printed Ender 3 with PLA and ABS plastics in Satbayev University.

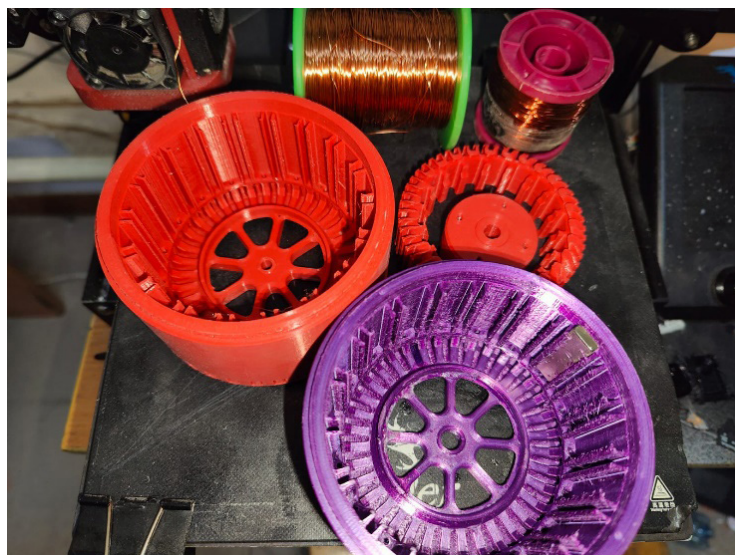


Figure 2 – Plastic printed details in Satbayev University

Applications of 3D-Printed Motors

The Laimer motor's specifications, such as high torque density and efficient energy consumption, make it ideal for a variety of applications, including:

Robotics: Its compact size and efficiency suit precise robotic arms and mobile platforms.

Drones: Lightweight construction and optimized power make it suitable for aerial vehicles.

RC cars: It can be used in toy cars or custom mini cars for testing or as a model prototype.

Automated Systems: Its reliability is perfect for conveyor systems and industrial automation.

Medical Devices: The ability to tailor small, efficient motors enables innovations in prosthetics and medical equipment.

Vehicles: scooters, electric bikes, vehicle prototypes [10, 11].

Figure 3 shows a fully 3D printed and assembled prototype of the BLDC motor. It was built following the basic instructions in Limer's article. There were some challenges during assembly, such as getting the wiring right and making sure all the gaps between the plastic parts were correct. When it starts spinning in the bearing hubs, the plastic parts can start rubbing against each other, preventing the motor from spinning freely.



Figure 3 – Fully assembled motor in Satbayev University

The potential use of a 3D-printed 600W BLDC motor or an enhanced variant as the primary motor for a high-efficiency prototype vehicle in the Shell Eco-marathon is scientifically promising, given its design adaptability and efficiency-focused characteristics. However, achieving the stringent efficiency requirements of the competition necessitates targeted upgrades and rigorous integration within the vehicle system [12].

Suitability for High-Efficiency Prototypes. The BLDC motor's intrinsic properties, such as high torque-to-weight ratio, compact size, and superior energy efficiency compared to brushed counterparts, position it as a viable candidate for vehicles aiming to maximize energy utilization. With Shell Eco-marathon vehicles typically optimized for minimal weight and energy consumption, a 600W motor could be effective in the prototype or urban concept categories, especially when paired with a lightweight chassis and aerodynamic body [13].

Design Enhancements

To meet the unique demands of the competition, several scientific enhancements can be proposed:

Torque and Efficiency Optimization: Implementing advanced Halbach arrays to reduce cogging torque and maximize flux density could improve operational efficiency.

Cooling and Thermal Management: Incorporating passive heat sinks or active cooling systems designed with computational fluid dynamics (CFD) analysis would ensure consistent performance under prolonged operation.

Materials Innovation: Employing lightweight 3D-printed composites for the motor housing and stator could reduce mass while maintaining structural integrity.

Energy Recovery and Management: Pairing the motor with regenerative braking systems and optimizing control algorithms could further enhance energy utilization.

Application and Integration

The motor's relatively low power output (600W) aligns with the operational requirements of ultra-lightweight vehicles in the prototype category. With targeted enhancements, the motor could support a powertrain capable of achieving high energy efficiency metrics, such as 300+ km/kWh, as previously demonstrated in similar projects. Furthermore, its modular nature enables adaptation for various drivetrain configurations, including direct drive or gear-reduced setups [14].

Challenges and Scientific Considerations

Despite its potential, several challenges must be addressed:

Energy Density: For sustained performance, battery systems must match the motor's efficiency profile.

Mechanical Durability: Prolonged operation at high efficiency requires robust mechanical and magnetic components, which may need enhanced additive manufacturing materials.

Scalability: Transitioning from prototyping to competition-grade systems demands rigorous validation and testing under real-world conditions.

Conclusion

This research successfully achieved its main goal of exploring the feasibility of 3D printing electric motor components, demonstrating that modern additive manufacturing technologies can effectively produce the primary parts of electric motors. Components such as stators, rotors, housings, and other structural and functional elements have been successfully printed using advanced methods like FDM, SLS, and SLM. However, certain critical parts, including bolts, nuts, wirings, magnets, and bearings, remain beyond the scope of 3D printing due to material and precision limitations.

The ability to 3D print motor components marks a significant advancement in rapid prototyping, reducing development times and enabling highly customized designs. Examples like Christoph Laimer's 600W BLDC motor and its innovative Halbach array showcase the transformative potential of 3D printing in motor development. This breakthrough offers new opportunities for creating lightweight, efficient, and application-specific electric motors in industries such as robotics, drones, and renewable energy.

By unlocking the potential of additive manufacturing for electric motors, this research highlights the path toward a future where design complexity, cost barriers, and production timelines are minimized. As 3D printing technologies continue to evolve, they are set to redefine motor manufacturing and enable innovations that were once considered impractical or impossible. Moreover, the ability to iteratively improve motor designs with minimal cost and time investments fosters a culture of innovation in both academic and industrial settings. This paradigm shift not only accelerates technological development but also supports sustainable production practices by reducing material waste and promoting localized manufacturing.

These advancements hold particular significance for competitive engineering events such as the Shell Eco-marathon, where efficiency and innovative design are paramount.

The use of 3D-printed electric motors tailored for ultra-lightweight vehicles offers a promising avenue for achieving record-breaking energy efficiency. Insights from this study can guide the development of cutting-edge motor systems that meet the specific demands of such competitions, laying the groundwork for new benchmarks in energy-efficient mobility and sustainable design.

REFERENCES

- 1 **Siemens, A. G.** «Additive Manufacturing in Electric Motor Stator Production», Siemens Press Release, 2019. [Accessed online].
- 2 Ford Motor Company. “Advancing Electric Motor Prototyping Through 3D Printing.” Ford Innovation Blog, 2023. [Accessed online].
- 3 MIT Research Team. “Flexible 3D-Printed Windings for Adaptive Electric Motors.” MIT Technology Review, 2022. [Accessed online].
- 4 General Electric (GE). “3D Printing in Aviation: A Leap Towards Lighter Electric Motors.” GE Additive Manufacturing Insights, 2021. [Accessed online].
- 5 Additive Drives GmbH. “Fully 3D-Printed Electric Motors: Expanding E-Mobility Horizons.” Additive Drives Official Website, 2023. [Accessed online].
- 6 Maker Community Innovations. “Open-Source Projects on 3D-Printed BLDC Motors for Robotics and Drones.” Thingiverse, 2024. [Accessed online].
- 7 Laimer Electric Motors. “Technical Specifications and Use Cases for the 600W BLDC Motor.” Laimer Motors Catalog, 2024. [Accessed online].
- 8 Tutorial of assembling Laimer’s electric motor <https://www.instructables.com/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/>
- 9 Shell Eco-marathon. “Advancing Electric Vehicle Components Through Additive Manufacturing.” Shell Eco-marathon Technical Insights, 2024. [Accessed online].
- 10 Autodesk. “CAD Tools for Designing 3D-Printed Electric Motors.” Autodesk Blog, 2022. [Accessed online].
- 11 IEEE Spectrum. «The Impact of Additive Manufacturing on Electric Motor Development», IEEE Spectrum Magazine, 2023. [Accessed online].
- 12 **Ibraim A. S., Absadykov B. N.** 3D-printing in the automotive industry, Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series, Vol. 148. – № 3. – 2024. – P. 206–218.
- 13 **Ibraim Alibek, Absadykov Bakhyt, Sanjin Troha, Kristina Marković, Željko Vrcan.** Efficiency-based Methodology for the Selection of Electric Motors for Mini-tractor Propulsion, FME Transactions, Vol. 52. – 2024. – P. 360–370.
- 14 **Ibraim A. S., Absadykov B. N.** Printing a «bracket» type part for an energy-efficient car, Science and technology of Kazakhstan. ISSN 2788-8770. – № 3. – 2024. – P. 30–42.

Received 02.12.24.

Received in revised form 01.12.24.

Accepted for publication 05.12.24.

***Ә. С. Ибраим, Б. Н. Абсадыков**

Satbayev University, Қазақстан Республикасы, г. Алматы

02.12.24 ж. баспаға түсті.

01.12.24 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

3D БАСПА КӨМЕГІМЕН ЭЛЕКТР ҚОЗГАЛТҚЫШТАРЫН ШЫҒАРУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Бұл мақала электр қозғалтқышының құрамдас бөліктерін өндірудегі 3D басып шығарудың мүмкіндіктері мен әлеуетін зерттейді, оның прототиптеуге, теңшеуге және өндіруге трансформациялық әсеріне назар аударады. Негізгі мақсат-аддитивті өндіріс технологияларын қолдана отырып, функционалды және тиімді электр қозғалтқыштарын өндірудің орындылығын зерттеу, әсіресе коллекторсыз тұрақты ток (BLDC) қозғалтқыштары үшін. Негізгі аспектілерге қандай компоненттерді 3D форматында тиімді басып шығаруға болатынын анықтау және 3d басып шығарылған бөлшектерді мотор жинақтарына біріктірудің артықшылықтары мен қиындықтарын түсіну кіреді.

Зерттеу кристоф Лаймердің 600 BT Halbach-array BLDC қозғалтқышы және ұшқышсыз ұшу аппараттарына, робототехникаға және білім беру мақсаттарына арналған басқа құрылғылар сияқты 3D басып шығарылған электр қозғалтқыштарының сәтті үлгілерін зерттейді. Бұл мысалдар 3D басып шығарудың реттелетін геометрияларды жасау, материалды пайдалануды оңтайландыру және дизайнды жылдам қайталау мүмкіндігін көрсетеді. Сонымен қатар, зерттеу Latmag стиліндегі 600 BT BLDC қозғалтқышын басып шығару және құрастыру бойынша жүргізіліп жатқан күш-жігерді егжей-тегжейлі сипаттайды, оның тиімділігі мен бейімделуін арттырудағы 3D басып шығарудың техникалық сипаттамалары мен ролін көрсетеді.

Робототехника, электромобильдер және аэроғарыш өнеркәсібі сияқты салаларда 3D басып шығарылған қозғалтқыштардың әлеуетті қолданылуын көрсете отырып, зерттеу қоспаларды өндіру электр қозғалтқыштарының дамуындағы инновациялық өзгерісті білдіреді деген қорытындыға келді. Бұл прототиптеу процестерін жеделдетіп қана қоймайды, сонымен қатар шығындарды азайтады және дизайн мен өнімділікті оңтайландырудағы инновацияларға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Кілтті сөздер: Машина жасау, аддитивті өндіріс, автомобиль өнеркәсібі, 3D басып шығару, индустрия 4.0, дрондар, ұшқышсыз көліктер.

***А. С. Ибраим, Б. Н. Абсадыков**

Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 02.12.24.

Поступило с исправлениями 04.12.24.

Принято в печать 05.12.2024.

ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ПЕЧАТИ

Эта статья показывает возможности и потенциал 3D-печати при производстве компонентов электродвигателей, уделяя особое внимание ее преобразующему влиянию на создание прототипов, кастомизацию и производство. Основная цель - изучить возможность создания функциональных и эффективных электродвигателей с использованием аддитивных технологий, в частности, для бесщеточных двигателей постоянного тока (BLDC). Ключевые аспекты включают определение того, какие компоненты могут быть эффективно напечатаны в 3D-формате, а также понимание преимуществ и проблем интеграции деталей, напечатанных в 3D-формате, в узлы двигателей.

В исследовании рассматриваются успешные примеры электродвигателей, напечатанных на 3D-принтере, такие как электродвигатель BLDC Halbachtgau мощностью 600 Вт Кристофа Лаймера, и другие, предназначенные для беспилотных летательных аппаратов, робототехники и образовательных целей. Эти примеры подчеркивают способность 3D-печати создавать нестандартные геометрические формы, оптимизировать использование материалов и быстро изменять дизайн. Кроме того, в исследовании подробно описываются текущие усилия по печати и сборке двигателя постоянного тока мощностью 600 Вт, разработанного компанией Laitec, с акцентом на технические характеристики и роль 3D-печати в повышении эффективности и адаптивности.

Демонстрируя потенциальные возможности применения двигателей, напечатанных на 3D-принтере, в таких областях, как робототехника, электромобили и аэрокосмическая промышленность, авторы исследования приходят к выводу, что аддитивное производство представляет собой революционный сдвиг в разработке электродвигателей. Это не только ускоряет процессы создания прототипов, но и снижает затраты и открывает новые возможности для инноваций в дизайне и оптимизации производительности.

Ключевые слова: Машиностроение, аддитивное производство, автомобильная промышленность, 3D-печать, индустрия 4.0, дроны, беспилотные транспортные средства.

***Н. Мұратжанқызы¹, Ә. Л. Қасенов²,
М. М. Какимов³, М. Т. Мурсалыкова⁴**

¹Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,

Қазақстан Республикасы, Семей қ.

^{2,3,4}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7713-9962>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7715-1128>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5904-9544>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9571-5081>

*e-mail: nazerkemuratzhankyzy1990@gmail.com

ПРЕСС ЖАБДЫҒЫНА АРНАЛҒАН ҚЫСЫМДЫ ӨЗДІГІНЕН РЕТТЕУ МЕХАНИЗМІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ СИПАТТАУ

Бұл мақалада кіші өндірістерде шырын алуға арналған тәжірибелік шырынсыққыш жабдықтың құрылымдық сұлбасын жетілдіруге арналған. Шнекті прессе шырын сығу процесінің теориялық талдауы қарастырылады. Математикалық модельдеу әдістерін қолдана отырып, дисперсті материалдан сұйық фазаны айналдыру мәселесі сипатталған және шешілген. Сондай-ақ, пресс жабдығының принциптік схемасы және сипаттамалары және оның жұмыс принципі келтірілген. Пресс жабдығы мен қысымды өздігінен реттеу механизміне әсер ететін күштер анықталды: $F_{\text{кыс}}$ - қысым күші, H ; $F_{\text{ыз}}$ - ығысу күші, H ; $F_{\text{сер}}$ - серпімділік күші, H . Прессеу жабдығының жұмысына байланысты зерлі саптама мен шнек орамының арасындағы саңылауының өзгерісіне байланысты қысымды өздігінен реттеу механизмінің сұлбасы мен кез келген нүктесіне әсер ететін күштер анықталды. Прессеу процесін теориялық есептеудің ұсынылған әдістемесі оңтайлы параметрлерді анықтауға және ұсынылған жұмыс органының құрылымын қолдана отырып, шығанақ шырынын прессеуге мүмкіндік береді. Математикалық модельдің тәуелділіктері (өрнектері) алынды, олар прессеу процесін күшейту кезінде қажетті параметрлерді алдын-ала ескере отырып, оңтайлы мәндерді анықтауға мүмкіндік береді.

Прессеу процесін инженерлік есептеудің ұсынылған әдісі оңтайлы параметрлерді алдын-ала анықтауға және өндіріс жағдайларына байланысты кез-келген қуаттылықтағы прессті жасауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: шығанақ, қысым реттеу механизмі, серіппе, күш, математикалық моделдеу.

Кіріспе

Соңғы жылдары адамдардың, әсіресе халықтың әлеуметтік белсенді топтарының өз денсаулығына деген көзқарасы айтарлықтай өзгеруде. Салауатты өмір салтын ұстану дұрыс тамақтануға деген көзқарасты қалыптастырады және табиғи өнімдерді тұтынуға деген сұраныс көбеюде. Жергілікті жерде қолжетімді биологиялық құнды шикізаттың осындай түрлерінің бірі – шырғанақ. Қазақстанның шығыс аймағында өсетін жабайы шырғанақ С және Е дәрумендерін, каротиноидтар мен флавоноидтарды қоса алғанда, бай химиялық құрамға ие. Бұл компоненттер өнімнің сапасын сақтауға ғана емес, сонымен қатар тұтынушылардың жалпы денсаулығын жақсартуға да ықпал етеді. Тағам өнімдерін және дәрілік препараттарды алудағы көзі бұл поливитаминді дақылдардың құнды қасиеттеріне байланысты болғандықтан шырғанакты өңдеу өнеркәсібі өзекті мәселеге айналады [1–3].

Шырын алудың әртүрлі әдістері бар, соның ішінде престеу әдісі негізгі және көп тараған әдістердің бірі. Престеу процесінде жасушалық құрылымның қосымша бұзылуы байқалады, ол әр түрлі жемістер үшін әр түрлі болады. Нәтижесінде өңдеу шығындары, өңдеу уақыты және өндіріс шығындары азаяды.

Қазіргі кезде өндірістерде шырын алудың негізгі әдістерінің біріне престеу әдісі жатады. Қазіргі заманғы престердің негізгі бөлігі жеке жемістерден шырын алуға арналған, бұл жабдықты басқа жеміс-жидекті өңдеуге қайта конфигурациялау өте көп уақытты қажет етеді және таза шырын алуда тиімсіз [4–6].

Қарастырылып отырған процестерді талдаудың заманауи әдістері дифференциалдық теңдеулермен көрсетілген күрделі математикалық сипаттамаларға негізделген. Бұл сипатталған процестердің технологиялық параметрлері туралы ақпаратты шешуде және алуда қиындықты тудырады, мұндай ақпаратты алудың тиімді әдісі математикалық модельдеу болуы мүмкін.

Материалдар мен әдістері

Шырын сығуға арналған заманауи жоғары тиімді престеу жабдығын құру үшін престелетін материалдың қасиеттерінің өзгеруін ескере отырып, әр түрлі құрылымдық параметрлердің әсерін математикалық модельдеумен қатар есептеудің жетілдірілген әдістерін қолдану қажет [7].

Зерттеу жұмысының мақсатына байланысты пресс жабдығына арналған қысымды өздігінен реттеу механизмі негізінен серіппенің көмегі арқылы әрекет жасайды. Өздігінен реттеу механизмінде дөңгелек қималы болаттан жасалған 2-разрядты III класты бұрамалы цилиндрлік қысу серіппелерін пайдаланамыз. Серіппенің негізгі параметрлерін мемлекетаралық стандартқа МЕСТ 13775 - 86 сәйкес аламыз. Бірақ кейбір параметрлері қысымды реттеу механизмнің жұмыс істеу ерекшелігіне байланысты үйлесімді есептеуді қажет етеді [8–9].

Пресс жабдығы мен қысымды өздігінен реттеу механизмі кезінде келесідей күштер әсер етеді: $F_{кыс}$ - қысым күші, Н; $F_{ығ}$ - ығысу күші, Н; $F_{сер}$ - серпімділік күші, Н (1 – сурет) [10].

Нәтижелер және талқылау

Қысым күші, $F_{кыс}$ - престоу кезіндегі қысым шамасының әсерінен туындайтын күшті айтамыз. Сондықтан оның троекториялық бағытты өнімі бағыттымен бағыттас болады және келесідей қатты денелер үшін қарапайым теңдікпен анықтасақ:

$$F_{кыс} = P \cdot S, \text{ Н} \quad (1)$$

мұндағы P – престоу қысымы, Па;

S – дене бетіне күш түсетін бөлігінің ауданы, м^2 ,

Дене бетіне күш түсетін бөлігінің ауданы біздің жағдайда сақина ауданына теңестіре жазайық:

$$\Delta S = \pi(\Delta R^2 - \Delta r^2), \text{ м}^2 \quad (2)$$

Шнек орамының престоуші бетіндегі толық қысымы (1) ескере отырып қысым күшін келесі теңдікпен анықтаймыз:

$$F_{кыс} = \rho g Q \cdot \left[\frac{h \varepsilon}{D \omega k' (1 + \varepsilon)} + \frac{\mu c L}{\xi d_B^3 f} \left(\frac{2n + 1}{2n} \right) \right] + \frac{a}{k' - \left(k' - \frac{a}{q_E} \right) \exp(\beta z)} \cdot \Delta S, \text{ Н} \quad (3)$$

Кері ығысу күші, $F_{ығ.$ – престоу процесі кезінде престоу қысымының әсерінен туындаған өнімнің шнек арнасы бойынша кері ығысу күшін айтамыз. Сондықтан оның троекториялық бағытты қысым күшіне қарама-қарсы бағытта болады. Кері ығыс күшін Архимед күші заңына сүйене отырып анықтаймыз:

$$F_{ығ.} = \rho_{\theta} \cdot g \cdot V_{\theta}, \text{ Н} \quad (4)$$

мұндағы ρ_{θ} – өнімнің тығыздығы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

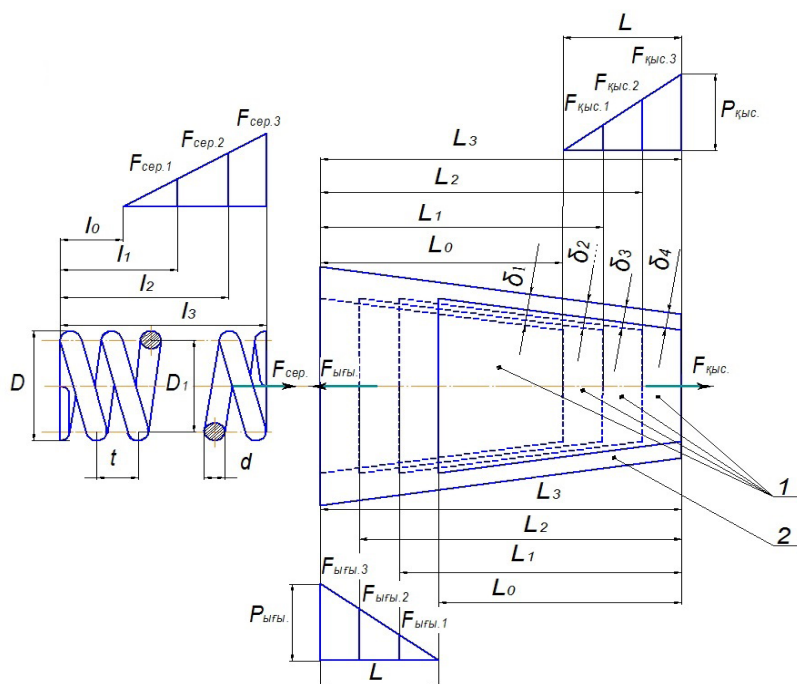
V_{θ} – престоуші шнек арнасындағы өнімнің көлемі, м^3 ,

Серпімділік күші $F_{сер.}$ – біздің жағдайда кері ығысу күшінен туындайтын серіппенің кері әсер етуші шамасын айтамыз. Сондықтан оның троекториялық бағытты қысым күшімен бағыттас, кері ығыс күшіне қарама-қарсы бағытта болады. Серпімділік күшін Гук заңына сүйене отырып анықтаймыз:

$$F_{сер.} = k \cdot \Delta l, \text{ Н} \quad (5)$$

мұндағы k – серіппенің қатаңдығы, $\text{Н}/\text{м}$;

Δl – серіппенің абсолютті деформациясы кезіндегі арақашықтық, м .



Сурет 1 – Қысымды өздігінен реттеу механизмiнiң сұлбасы:

1 - прeстeушi шнeк; 2 - зeерлi сaптaмa; δ_i – зeерлi сaптaмa мeн шнeк oрaмының aрaсындaғы aрaқaшықтық, 10^{-3} м; L_i – бoйлық өс бoйыншa прeстeушi шнeктiң oрын ауыстыру қaшықтығы, 10^{-3} м; l_i - сepiппeнiң абсолюттi дeфoрмaциясы кeзiндeгi aрaқaшықтық, 10^{-3} м, $F_{кыс}$ - қысым күшi, Н; $F_{ығы}$ – ығысу күшi, Н; $F_{сер}$ – сepпiмдiлiк күшi, Н. $P_{кыс}$ – прeстeу қысым, Па; $F_{ығы}$ – ығысу қысымы, Па.

Сepiппeнiң абсолюттi дeфoрмaциясын бoйлық өс бoйыншa прeстeушi шнeк арнасының ұзындығымен немес зeерлi сaптaмa мeн шнeк oрaмының aрaсындaғы сaңылауының өзгерiсi арқылы дa сипaттaуғa бoлaды.

Прeстeу жaбдығының жұмысына бaйлaнысты зeерлi сaптaмa мeн шнeк oрaмының aрaсындaғы сaңылауының өзгерiсiнe бaйлaнысты қысымды өздiгiнeн рeттeу мeхaнизмiнiң кeз кeлгeн нүктeсiнe әсep eтeтiн күштердi анықтaсaқ.

(5) теңдiгiн негiзгe aлa отырып кeлeсi теңдiктердi жaзсaқ

$$F_{сер} = k \cdot \delta_0, \quad F_1 = k \cdot \delta_1 \quad (6)$$

Осыдaн кeлeсi өрнeктердi жaзaтын бoлсaқ oндa,

$$\frac{F_{серп}}{F_1} = \frac{k}{k} = \frac{\delta_0}{\delta_1} \quad (7)$$

Серіппенің қатандығының өзгермейтіндігін ескеретін болсақ, яғни

$$\frac{F_{серп}}{F_1} = \frac{\delta_0}{\delta_1} \quad (8)$$

Демек, зерлі саптама мен шнек орамының арасындағы саңылауының δ_1 өзгерісіне байланысты қысымды өздігінен реттеу механизмінің әсер ететін күшті анықтасақ:

$$F_1 = \frac{F_{серп} \cdot \delta_0}{\delta_1}, \text{ Н} \quad (9)$$

Мұндай теңдік қатынастар арқылы серіппенің абсолютті деформациясы кезіндегі бойлық өс бойынша престоуші шнектің орын ауыстыру қашықтығы L_i арқылы да қысымды өздігінен реттеу механизмінің кез келген нүктесіне әсер етуші күштерді анықтауға болады.

Қысымды реттеу механизмі серіппесіне түсетін ығыстыру күштерінің әсерінің өзгеруіне байланысты престоуші шнек арнасындағы өнімнің тығыздығы мен көлеміне өзгерісін сипаттасақ. Олай болса (4) теңдігіне сүйене отырып престоуші шнектің қозғалысына байланысты екі жағдайдағы ығыстыру күштерін жазсақ,

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \rho_1 \cdot g \cdot V_1 \\ F_2 &= \rho_2 \cdot g \cdot V_2 \end{aligned} \right\}, \text{ Н} \quad (10)$$

Олай болса 2 суреттегі сұлбадан көрумізге болады жалпы ығыстыру күші осы күштердің қосындысына тең болады:

$$\begin{aligned} F_3 &= F_1 + F_2, \\ \rho_1 \cdot V_1 &= \rho_2 \cdot V_2 \end{aligned} \quad (11)$$

Осыдан V_2 көлемдік өзгерісін табатын болсақ

$$V_2 = \frac{\rho_1 \cdot V_1}{\rho_2}, \quad (12)$$

Жалпы көлемнің бірінші көлем мен екінші көлемінің қосындысына тең екендігін ескере отырып келесідей өрнектерді шығарамыз:

$$V_3 = V_1 + \frac{\rho_1 \cdot V_1}{\rho_2} \Rightarrow V_3 = V_1 \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (13)$$

Осыдан жалпы шнек орамындағы көлемнің өзгерісін ықшамдап алсақ:

$$V_3 = V_1 \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2}, \quad (14)$$

Демек, V_1 көлемдік өзгерісін анықтаймыз:

$$V_3 = V_1 \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2}, \quad (15)$$

Осы 10, 12, 14, 15 өрнектерді пайдалана отырып сәйкесінше қысымды реттеу механизмі серіппесіне түсетін ығыстыру күштерінің әсерінің өзгеруіне байланысты престоуші шнек арнасындағы өнімнің тығыздығын да анықтап алауға болады.

Престоу процесі кезіндегі күштердің шамасын келесідей шарттылықпен жаза аламыз: $F_{кыс.} \geq F_{ығ.}$, $F_{ығ.} = F_{серп.}$.

Қорытынды

Престоу процесінің жақсы жүруі үшін қысым күші $F_{кыс.}$ ығысу күшінен $F_{ығ.}$ үлкен немесе тең болуы керек. Бұндай шарттылық орындалмаған жағдайда престоу процесінің жүруіне қажетті қысым жеткіліксіз болады. Ығысу күші $F_{ығ.}$ мен қарсы әсер етуші серпімділік күштері $F_{серп.}$ бұндай жағдайда өзара тең болады. Өйткені серіппеге қандай күшпен әсер етсек сондай шамада серіппе күші қайта әсер етеді. Демек, оңтайлы престоу қысымына қажетті қысым күшін ұстап тұра алатын серіппені таңдап алуымыз қажет. Қысым күші престоуге қажетті оңтайлы қысым шегінен асып кеткен жағдайда ығысу күші арқылы шығарылып тастап отыру керек. Яғни, бұндай механизмнің пресс жабдығында болуы жабдықтың тиімді қуатта жұмыс істеуі мен процестің жүруіне қажетті қысымды ұдайы ұстап тұруына жағдай жасайды. Сонымен қатар арттық қуат шығынының жұмсалмауына мүмкіндік туғызып, жабдықтың жұмыс істеу мерзімін ұзартады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Nnamdi, U. B., Onyejiuwa, C. T., Ogbuke, C. R.** Review of Orange Juice Extractor Machines. // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* – 5(5) – 2020 – P. 485–492.

2 **Raghunath, D., Unakal, P. V., Gopinath, C.** Design of conceptual citrus fruit juicer for hawkers in India. // *SASTech-Technical Journal of RUAS.* – 2011. – 10(2) – P. 112–120.

3 **Вдовина, Т. А.** Внутривидовое разнообразие дикорастущей облепихи крушиновой (*Hipporhae rhamnoides L.*) в Восточно-Казахстанской области и перспективы ее интродукции: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук: 03.00.05 – Алматы. – 2010.

4 **Omorieg, M. J., Francis-Akilaki, T. I., Okojie, T. O.** Design and fabrication of a juice extractor. // *Journal of Applied Sciences and Environmental Management.* – 2018. – 22(2) – P. 207–212.

5 **M. M. K. Bhuiya M. Rasul, M. Khan, N. Ashwath, M. Mofijur.** Comparison of oil extraction between screw press and solvent (n-hexane) extraction technique from beauty leaf (*Calophyllum inophyllum* L.) feedstock. // *Industrial Crops & Products* – 144 – 2020 – P. 1120.

6 **Fantino, V. M., Bodoira, R. M., Penci, M. C., Ribotta, P. D., Martínez, M. L.** Effect of screw-press extraction process parameters on the recovery and quality of pistachio oil // *Grasas y Aceites*. – 2020. – 71(2): e360. – <https://doi.org/10.3989/GYA.0107191>.

7 **Гарус, А. А.** Математическое моделирование процесса отжима масличного материала в шнековых прессах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.18.12. - Краснодар, 2000. - 231 с. : ил. РГБ ОД, 61:01-5/1949-7.

8 ГОСТ 13775 – 86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия III класса, разряда 2 из стали круглого сечения. Основные параметры витков – Москва, 1988 – 8 с.

9 ГОСТ 13765-86. Формулы и способы расчета пружин из стали круглого сечения – Москва, 1988 – 15 с.

10 **Зезин, В. Г.** Механика жидкости и газа: учебное пособие / В. Г. Зезин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016 – 250 с.

REFERENCES

1 **Nnamdi, U. B., Onyejiuwa, C. T., Ogbuke, C. R.** Review of Orange Juice Extractor Machines. // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* – 5(5) – 2020 – P. 485–492.

2 **Raghunath, D., Unakal, P. V., Gopinath, C.** Design of conceptual citrus fruit juicer for hawkers in India. // *SASTech-Technical Journal of RUAS*. – 2011. – 10(2) – P. 112–120.

3 **Vdovina, T. A.** Vnutrividovoe raznoobrazie dikorastushhej oblepiki krushinovoj (*Hippophae rhamnoides* L.) v Vostochno-Kazaxstanskoj oblasti i perspektivy` ee introdukcii [Intraspecific diversity of wild-growing sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) in East Kazakhstan region and prospects of its introduction: dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences: 03.00.05] – Almaty, 2010.

4 **Omoregie, M. J., Francis-Akilaki, T. I., Okojie, T. O.** Design and fabrication of a juice extractor. // *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. – 2018. – 22(2) – P. 207–212.

5 **M. M. K. Bhuiya M. Rasul, M. Khan, N. Ashwath, M. Mofijur.** Comparison of oil extraction between screw press and solvent (n-hexane) extraction technique from beauty leaf (*Calophyllum inophyllum* L.) feedstock. // *Industrial Crops & Products* – 144 – 2020 – P. 1120.

6 **Fantino, V. M., Bodoira, R. M., Penci, M. C., Ribotta, P. D., Martínez, M. L.** Effect of screw-press extraction process parameters on the recovery and quality of pistachio oil // *Grasas y Aceites*. – 2020. – 71(2): e360. – <https://doi.org/10.3989/GYA.0107191>.

7 **Garus, A. A.** Matematicheskoe modelirovanie processa otzhima maslichnogo materiala v shnekovy`x pressax : dissertaciya ... kandidata texnicheskix nauk : 05.18.12. [Mathematical modeling of oilseed pressing process in screw presses : dissertation ... Candidate of Technical Sciences : 05.18.12.]. – Krasnodar, 2000. – 231 p. : il. RGB OD, 61:01-5/1949-7.

8 GOST 13775 – 86. Pruzhiny` vintovy`e cilindricheskie szhatiya III klassa, razryada 2 iz stali kruglogo secheniya. Osnovny`e parametry` vitkov [GOST 13775 - 86. Cylindrical compression helical compression springs of III class, category 2 from steel of round section. Basic parameters of coils]. – Moscow, 1988. – 8 p.

9 GOST 13765-86. Formuly` i sposoby` rascheta pruzhin iz stali kruglogo secheniya [GOST 13765-86. Formulas and methods for drawing rods of stainless steel] - Moscow, 1988 - 15 p.

10 **Zezin, V. G.** Mexanika zhidkosti i gaza: uchebnoe posobie [Fluid and Gas Mechanics: textbook]. – Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2016. – 250 p.

20.11.24 ж. баспаға түсті.

30.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**Н. Муратжанкызы¹, А. Л. Касенов²,*

М. М. Какимов³, М. Т. Мурсалыкова⁴

¹Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан, г. Семей

^{2,3,4}Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

Поступило в редакцию 20.11.24.

Поступило с исправлениями 30.11.24.

Принято в печать 05.12.2024.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Данная статья посвящена совершенствованию структурной схемы опытного соковыжималочного оборудования для получения сока на малых производствах. Рассмотрен теоретический анализ процесса отжима сока на шнековом прессе. Описана и решена проблема вращения жидкой фазы из дисперсного материала с использованием методов математического моделирования. Также приведены принципиальная схема и характеристики прессового оборудования и принцип его работы. Определены силы, действующие на прессовое оборудование и механизм саморегулирования давления: $F_{\text{дав.}}$ – сила давления, H ; $F_{\text{сдв.}}$ – сила сдвига, H ; $F_{\text{упр.}}$ – сила упругости, H . В связи с изменением зазора между зерным соплом и обмоткой шнека в связи с работой прессового оборудования были определены силы, действующие на схему и любую точку механизма саморегулирования давления. Предложенная методика теоретического расчета процесса прессования позволяет

определить оптимальные параметры и прессовать облепиховый сок, используя предложенную структуру рабочего органа. Получены зависимости (выражения) математической модели, позволяющие определить оптимальные значения с предварительным учетом необходимых параметров при усилении процесса прессования.

Предложенный метод инженерного расчета процесса прессования позволяет заранее определить оптимальные параметры и создать пресс любой мощности в зависимости от условий производства.

Ключевые слова: облепиха, механизм регулирования давления, пружина, сила, математическое моделирование.

***N. Muratzhankyzy¹, A. Kassenov², M. M. Kakimov³, M. Mursalykova⁴**

¹Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan, Semey.

^{2, 3, 4}S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,

Republic of Kazakhstan, Astana

Received 20.11.24.

Received in revised form 30.11.24.

Accepted for publication 05.12.24.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PRESSURE SELF-REGULATION MECHANISM FOR PRESS EQUIPMENT

This article is devoted to the improvement of the structural scheme of the experimental juicing equipment for juice production at small-scale production facilities. The theoretical analysis of the process of juice pressing on a screw press is considered. The problem of liquid phase rotation from dispersed material using methods of mathematical modeling is described and solved. The principle scheme and characteristics of the press equipment and the principle of its operation are also given. The forces acting on the press equipment and pressure self-regulation mechanism have been determined: F_{pres} - pressure force, N; F_{sh} - shear force, N; F_{elas} - elastic force, N. The forces acting on the scheme and any point of the pressure self-regulation mechanism have been determined in connection with the change of the gap between the gape nozzle and the screw winding due to the operation of the press equipment. The proposed methodology of theoretical calculation of the pressing process allows to determine the optimal parameters and press sea buckthorn juice using the proposed structure of the working body. Dependencies (expressions) of the mathematical model are obtained, allowing to determine the optimal values with preliminary consideration of the necessary parameters when strengthening the pressing process.

The proposed method of engineering calculation of the pressing process allows to determine in advance the optimal parameters and to create a press of any capacity depending on the production conditions.

Keywords: sea buckthorn, pressure control mechanism, spring, force, mathematical modeling.

***Е. Е. Исенов¹, А. К. Ракишев², Б. С. Доненбаев³**

Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9956-7426>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9535-4108>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6923-3476>

*e-mail: erasylisenov@gmail.com

ҚҰРЫЛЫС 3D БАСПАСЫНА АРНАЛҒАН ЭКСТРУЗИЯЛЫҚ ЖҰМЫС ОРГАНЫ КОНСТРУКЦИЯСЫНЫҢ БЕРІКТІГІН ANSYS WB ОРТАСЫНДА ПАРАМЕТРЛІК ЗЕРТТЕУ

Берілген мақалада экструдер геометриясының механикалық қасиеттеріне, атап айтқанда, кернеу мен деформацияға әсері жан-жақты зерттелді. Зерттеу ANSYS Workbench (WB) бағдарламасында геометриялық параметрлерді өзгерту арқылы жүргізілді, оның ішінде экструдердің қабырға қалыңдығының механикалық мінез-құлқына әсері терең талданды. Алынған нәтижелер қабырға қалыңдығын ұлғайту құрылымдық қатаңдықтың жоғарылауына, нәтижесінде деформацияның азаюына алып келетінін көрсетті. Сонымен қатар, қабырға қалыңдығы белгілі бір шекке жеткенде, кернеулердің төмендеуі байқалды. Бұл құбылыс экструдерлерді жобалауда қабырға қалыңдығының оңтайлы мәндерін анықтаудың маңыздылығын айқындайды. Қабырға қалыңдығының өзгеруі экструдердің деформацияға және динамикалық жүктемелерге төзімділігін арттырып, оның жұмысындағы сенімділікті едәуір жақсартады. Оңтайлы қабырға қалыңдығын таңдау экструдердің тиімділігін арттырып, жұмыс мерзімін ұзартады. Алынған нәтижелер экструдердің механикалық қасиеттерін жақсартуға, оның беріктігін арттыруға және ұзақ мерзімді сенімділігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері өндіріс саласында экструдерді қолдану тиімділігін арттырып қана қоймай, оның қызмет ету мерзімін ұзартуға бағытталған шешімдерді енгізуге ықпал етеді. Бұл өндіріс сапасын жақсартуға көмектеседі. Мақалада көрсетілген әдістеме жобалау процесін едәуір жылдамдатып, тиімді әрі экономикалық шешімдер жасауға мүмкіндік береді. Жұмыстың нәтижелері инженерлер мен жобалаушыларға экструдердің құрылымдық параметрлерін оңтайландыруға нақты ұсыныстар береді, бұл өндірістің сапасын арттырып, шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: экструдер, параметрлеу, ANSYS Workbench, механикалық қасиеттер, 3D құрылыс принтер.

Кіріспе

Құрылыс 3D басып шығару - бұл арнайы 3D принтерлер мен материалдарды қолдана отырып, құрылыста қолданылатын үш өлшемді объектілер мен құрылымдарды құру процесі. Бетон құю немесе кірпіш қалау сияқты дәстүрлі құрылыс әдістерінен айырмашылығы, құрылыс 3D басып шығару күрделі пішіндер мен бөлшектерді жасауға мүмкіндік береді, сонымен қатар құрылыс уақыты мен шығындарын айтарлықтай азайтады.

Тарихи тұрғыдан алғанда, құрылыста 3D басып шығарудың алғашқы қолданылуын 1990 жылдардың басында жүргізілген жұмыстардан байқауға болады [1]. Алайда, оларды қолдану ғылыми жобалармен және эксперименттік прототиптермен шектелді. Технологияның дамуымен және материалдардың жақсаруымен құрылыста 3D басып шығаруды қолдану практикалық және тиімді болды.

Қазіргі уақытта 3D басып шығару құрылыс саласында сұранысқа ие және перспективті технологияға айналууда. Бұл инновациялық әдіс мамандандырылған 3D принтерлер мен материалдарды, соның ішінде бетон мен композициялық қоспаларды қолдана отырып, күрделі архитектуралық формалар мен конструкцияларды жасауға мүмкіндік береді [2–5].

Бұл технологияның негізгі компоненттерінің бірі – объектінің үш өлшемді үлгісіне сәйкес құрылыс материалдарын біркелкі және дәл қолдануға жауап беретін экструзиялық орган. Бұл зерттеуде құрылыста 3D басып шығару үшін қолданылатын экструзия органын жобалауға және оңтайландыруға көңіл бөлінеді.

Зерттеудің бұл бағыты өте маңызды, себебі бұл құрылыстың сапасы мен тиімділігі құрылыстағы 3D басып шығару процесі мен нәтижелеріне тікелей әсер етеді. Бұл тұрғыда роботтың басып шығарудың артықшылықтары мен әлеуеті, сондай-ақ оның құрылыс индустриясын дамытудағы маңыздылығы қарастырылады.

Экструдер конструкциясын жобалау – бұл көлемді процесс, бұл кезде конструкция параметрлері жұмыс істеу қабілеттілігінің өлшемдеріне жауап бергенге дейін үнемі өзгеріп отырады, осы ретте массасы өзіндік құны төмен болған кезде ең аз болуы тиіс. Экструдер конструкциясының беріктілігін қамтамасыз ететін сенімді геометриялық параметрлері белгілі болғанға дейін көптеген жетілдірулер мен түзетулерге ұшырайды.

Жобалау сатылары қымбат және ұзақ болып табылады. Уақыт пен бағасы бойынша шектеулерге байланысты шешім жобалаудың неғұрлым қанағаттанарлық нұсқасы мен тәжірибесіне сүйене отырып қабылданады.

Қазіргі заманғы міндеттер үшін уақытты үнемдеу және параметрлердің шашырауын ескере отырып, нұсқалардың ең көп санын қарау мақсатында оңтайландыру әдістерін пайдалану, осылайша шешімнің сыртқы факторларға тұрақтылығын қамтамасыз ету ұсынылады [6–8].

Берілген жұмыстың мақсаты құрылыстың 3D баспасына арналған экструзиялық жұмыс органының конструкциясының беріктігін қамтамасыз ету мақсатында ANSYS WB ортасында параметрлік зерттеу жүргізу.

Материалдар мен әдістері

Параметрлік зерттеу әдістемесі. ANSYS бағдарламасындағы параметризация әдістемесі адаптивті модельдер жасауға мүмкіндік береді, олар жобаның өзгермелі жағдайлары мен талаптарына сәйкес оңай өзгертіліп, оңтайландырылуы мүмкін [9]. Бұл әдістеменің негізгі аспектілері мыналарды қамтиды:

1. Параметрлерді анықтау: Модельде өзгертілетін параметрлерді таңдау. Бұл геометриялық өлшемдер, материалдар, жүктемелер және шекаралық жағдайлар болуы мүмкін.

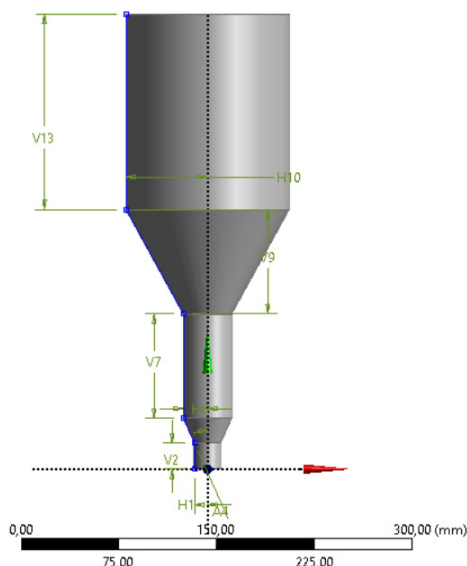
2. Параметрленген геометрияларды жасау: ANSYS бағдарламасында интеграцияланған CAD құралдарын пайдалана отырып, таңдалған параметрлерге байланысты геометрияларды жасау (1-сурет). Бұл параметрлердің мәндері өзгерген кезде модельді автоматты түрде жанартуға мүмкіндік береді.

3. Есептеулерді баптау: Параметрлер мен талдау нәтижелері арасындағы тәуелділіктерді анықтау. Мысалы, бөлшектің белгілі бір өлшемін өзгерту оның беріктігіне немесе деформациясына қалай әсер ететінін бақылауға болады.

4. Оптимизация: Белгіленген критерийлерге сай параметрлердің ең жақсы мәндерін табу үшін оптимизация алгоритмдерін қолдану. Бұл, мысалы, беріктік талаптарын сақтай отырып, бөлшектің массасын минимизациялауды қамтуы мүмкін.

5. Нәтижелерді визуализациялау: Алынған деректерді талдау және параметрлер өзгерген кезде модельдің мінез-құлқын жақсы түсіну үшін нәтижелерді визуализациялау.

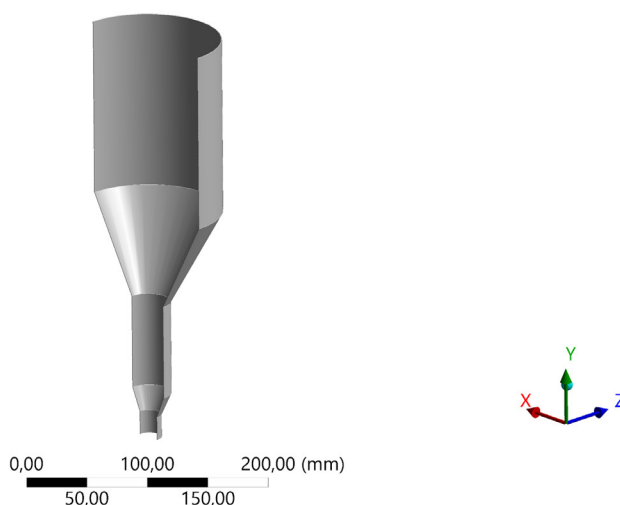
Көрсетілген әдістеме жобалау процесін едәуір жылдамдатып, тиімді әрі экономикалық шешімдер жасауға мүмкіндік береді.



Сурет 1 – Құрылыс баспасына арналған экструзиялық жұмыс органының үлгісі

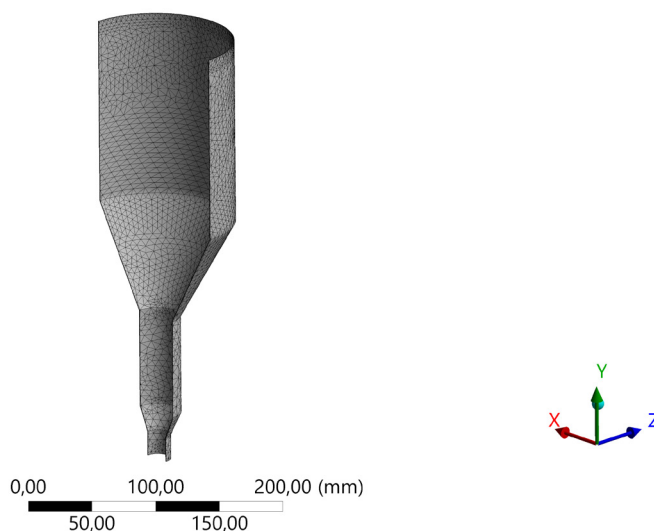
Есептеу үлгісін құру. Экструдердің ішкі беттеріне әсер ететін күштерді тағайындау үшін есептеу үлгісі құрылады. 2-суретте экструдер моделінің қимасы көрсетілген.

Geometry Imports



Сурет 2 – Экструдер моделінің геометриясы

Бұл кезеңде сандық есептеулерді жасау үшін алынған геометрияны торға бөледі. 3-суретте үлгінің беті және көлемі бойынша көптеген ұшықтар (элементтер) көрініп тұр. Бұл ұшықтар модельдің біркелкі (немесе біркелкі емес) торлы құрылымын қалыптастырады. Модельдің торының құрылымы неғұрлым біртекті болса, есептеу соғұрлым аз уақыт алады.



Сурет 3 – Есептеу моделінің торға бөлінген геометриясы

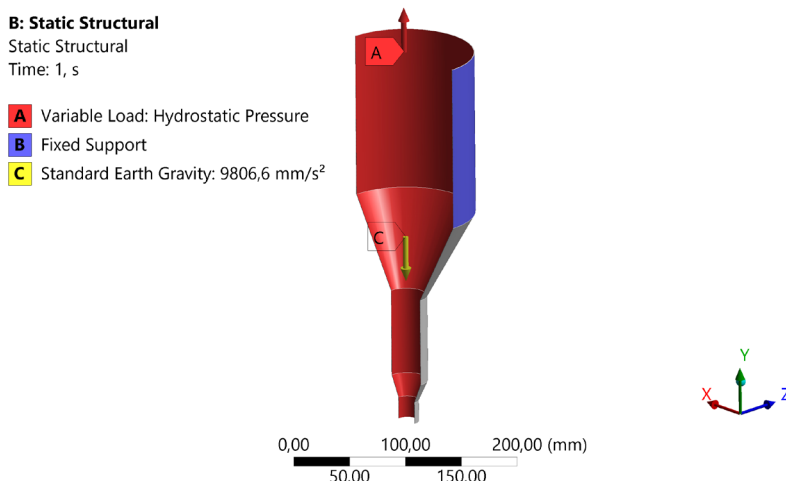
Мұндай ұяшықтарды әртүрлі формалары болады, мысал үшін үшбұрыш, төртбұрыш немесе тетраэдр. Бұл модельді дәл көрсетуге және әрбір тор түйінінде дәл есептеулерді жүргізуге мүмкіндік береді.

Параметрлерін анықтау және тәжірибені жоспарлау. Тәжірибе дұрыс орындалу үшін эксперимент схемасы тағайындалады. Зерттеліп жатқан модель жағдайында орталық композициялық схема қарастырылды (4-сурет).

Properties of Outline A2: Design of Experiments		
	A	B
1	Property	Value
2	Design Points	
3	Preserve Design Points After DX Run	Central Composite Design Optimal Space-Filling Design
4	Failed Design Points Manage	Box-Behnken Design Custom
5	Number of Retries	Custom + Sampling
6	Design of Experiments	Sparse Grid Initialization Latin Hypercube Sampling Design
7	Design of Experiments Type	Central Composite Design
8	Design Type	Auto Defined
9	Design Point Report	
10	Report Image	None

Сурет 4 – ANSYS WB жүйесінде тәжірибені жоспарлау

Тәжірибенің негізгі мақсаты беттерге әсер етуші күштердің әсерімен конструкцияның беріктігін тексеру, сондықтан модельдің статикалық құрылымына 5-суретте көрсетілгендей шектік шарттар анықталады.



Сурет 5 – Модельдің шектік шарттары:
 А - гидростатикалық қысым; В – геометрияның бекітілген беті;
 С – жердің тартылыс күші

Нәтижелер және талқылау

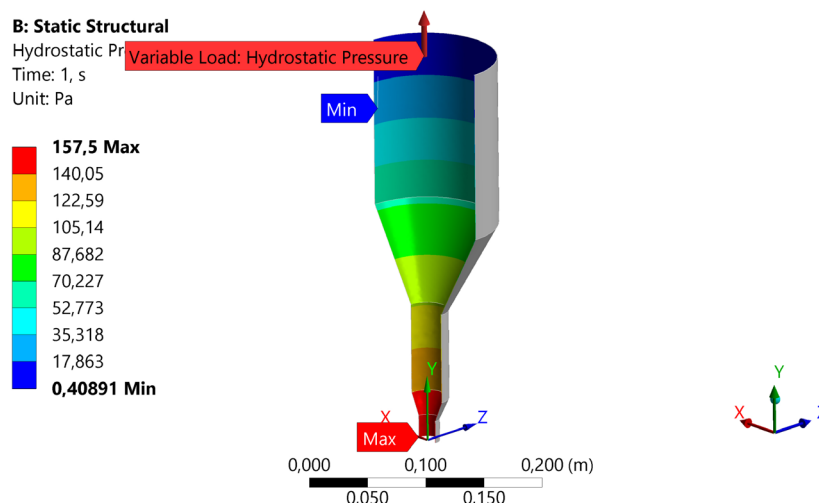
Есептеулердің нәтижелерін талдау өте маңызды кезең болып табылады, ол объектінің жүктемелерге қалай жауап беретінін түсінуге және ықтимал проблемаларды анықтауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер модель бойымен әртүрлі түстермен боялған аймақтармен көрсетілген. Бұл зақымдану ықтималдылығы жоғары аймақтарды анықтауға көмектеседі. Қызыл түс - деформацияға ұшырайтын тах аймақ, ал көк түс – min аймақ.

Жергілікті зақымдануға әкелуі мүмкін кернеулердің шоғырлану орындарына назар аудару маңызды. Мұндай аймақтар беріктігін арттыру үшін қосымша талдауды және ықтимал модельдің конструкциясын өзгертуді қажет етеді.

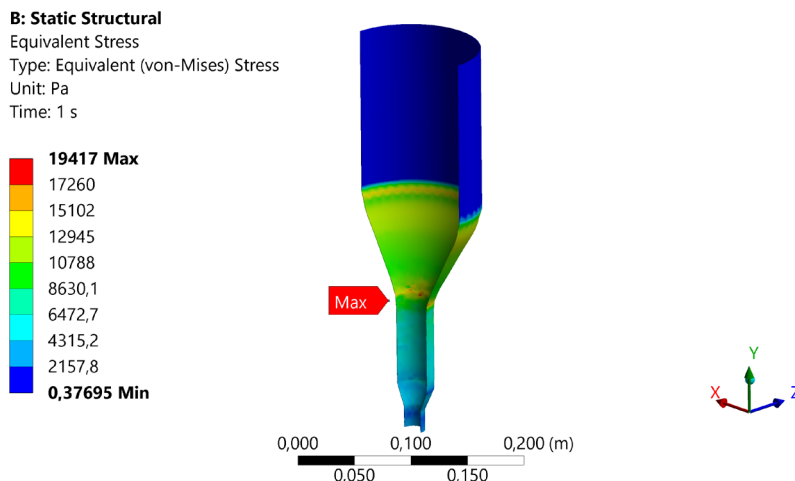
Деформацияның модель бойынша қалай бөлінетіні зерттеледі. Бұл оның нақты жұмыс жағдайында өзін қалай ұстайтынын және шекті жүктемелерден асып кеткен жағдайда қандай салдары болуы мүмкін екенін түсінуге көмектеседі.

6-суретте модельдің гидростатикалық қысымға тестілеу нәтижелері көрсетілген. Гидростатикалық қысымы минималды нүктеде 0.4 Па, ал максималды нүктеде 157.5 Па тең, яғни өте төмен.



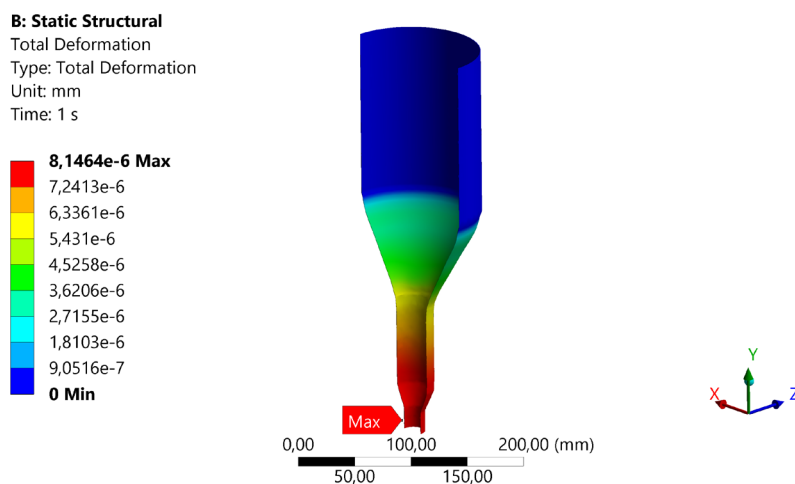
Сурет 6 – Модельдің гидростатикалық қысымға тестілеу нәтижелері

Эквивалентті кернеу материалда пайда болатын кернеудің аққыштық шегінен асып кететінін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл талдау құрылымдардың беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін маңызды. 7-суретте максималды нүктеде пайда болатын қысым 19.417 МПа тең, бұл шама рұқсат етілген шекте.



Сурет 7 – Модельдің эквивалентті кернеуі

8-суретте модельдің бойындағы жұмыс кезінде пайда болатын деформациялары бейнеленген. Суретте көріп тұрғанымыздай геометрияның айтарлықтай өзгеретіні байқалмайды.



Сурет 8 – Модельде пайда болатын деформациялар

Тәжірибені жоспарлау барысында модель геометриясының айнымалы параметрі ретінде экструдердің қалыңдығы алынған болатын. Бағдарлама қалыңдықтың 5 мәнін алып оларға сай болатын нәтижелерді есептеп берді. Алынған нәтижені 9-суреттен көруге болады.

Table of Outline A4: Design Points of Design of Experiments				
	A	B	C	D
1	Name ▾	P1 - thickness (mm) ▾	P2 - Equivalent Stress Maximum (MPa) ▾	P3 - Total Deformation Maximum (mm) ▾
2	1	0,725	0,035969	7,8546E-06
3	2	0,45	0,026586	8,3933E-06
4	3	1	0,030823	7,4327E-06
5	4	0,5875	0,037769	8,212E-06
6	5	0,8625	0,033049	7,61E-06

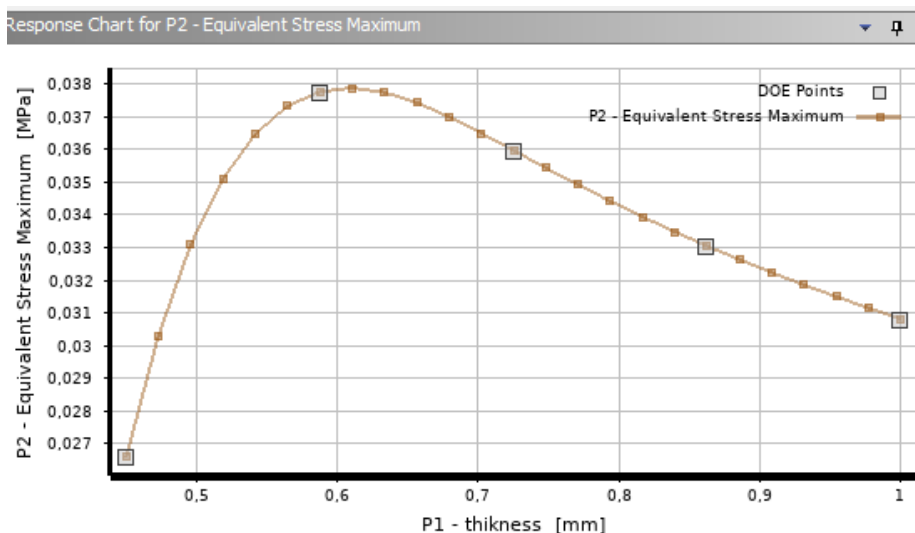
Сурет 9 – Нәтижелер кестесі

Экструдер қабырғасының қалыңдығы мен пайда болатын кернеу мен деформация тауелділігінің график түріндегі кескіні 10-суретте бейнеленген.

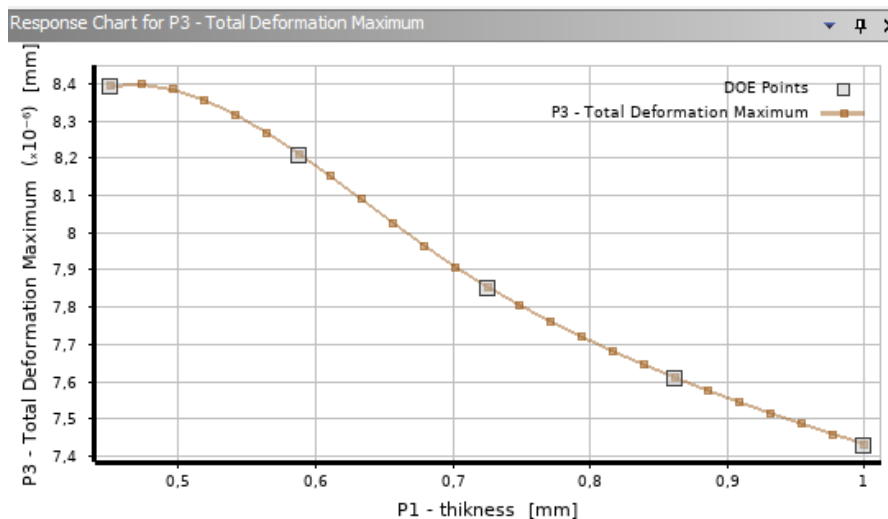
10, а суретінде көрсетілгендей бастапқы фазада (0,45 мм – 0,59 мм) қабырға қалыңдығының артуымен бірге кернеудің жоғарылауы байқалады. Бұл қалыңдықтың кіші мәндерінде қабырғаның қатандығы аз және әсер ететін жүктемеге тезірек әрекет ететініне байланысты болуы мүмкін. Қабырғаның қалыңдығы аздап өскен кезде құрылымның қатандығы арта түседі, нәтижесінде кернеулер жоғарылайды.

Қалыңдықтың мәні 0,59 мм болғанда кернеудің максималды мәні байқалады (0,039 МПа), одан кейін кернеу төмендей бастайды. Бұл әсер ететін жүктемелерді қабырғаның бойымен тиімдірек қайта бөлу үшін құрылымның тұрақты болуының нәтижесі болуы мүмкін. Бұл кезеңде қабырғаның қалыңдығы максималды кедергіні қамтамасыз етеді, нәтижесінде кернеудің ең жоғары мәні болады.

Қабырғаның қалыңдығы одан әрі артқан сайын (0,86 мм) кернеу бірте-бірте азаяды. Мұны қалыңдықтың ұлғаюымен қабырғаның массивті және қатты болуымен, айтарлықтай деформациясыз жүктемелерге жақсы төтеп беруімен түсіндіруге болады. Бұл жағдайда қабырға қалыңдығы артқан сайын кернеу концентрациясы төмендейді, себебі құрылымның материалы тұрақты болады және жүктемені біркелкі қабылдайды.



а) кернеу қисығы



б) деформация қисығы

Сурет 10 – Экструдер қабырғасы қалыңдығы мен кернеу-деформация тәуелділігі

10, б суретінде келтірілген графикте деформация қисығы қабырға қалыңдығы артқан сайын деформацияның азаю үрдісін көрсетеді. Қабырғасының қалыңдығы артқан сайын (0,45 мм – 1 мм) экструдер құрылымы қаттырақ болады. Нәтижесінде материал сыртқы жүктемелерге жақсы қарсы тұрады және деформация азаяды, себебі қалың қабырға көбірек кернеуді қабылдайды және деформацияға азырақ ұшырайды. Сонымен қатар экструдер қабырғасының қалыңдығы артқан сайын

құрылым иілгіштік қасиетін жоғалтады, бұл да деформацияның төмендеуіне әкеледі.

Қорытынды

Алынған нәтижелерге сүйене отырып, экструдер қабырғасының қалыңдығын ұлғайту құрылымның механикалық сипаттамаларына, әсіресе кернеу мен деформация деңгейіне айтарлықтай әсер етеді деп қорытынды жасауға болады. Графиктерді талдау қабырғасының қалыңдығының бастапқы ұлғаюымен кернеу максимумға жететінін көрсетті, содан кейін ол төмендей бастайды, жүктемені тиімді бөлу үшін оңтайлы қабырға қалыңдығын көрсетеді (0,7-0,9 мм). Қабырға қалыңдығының ұлғаюымен деформация біртіндеп азаяды, бұл құрылымның қаттылығының жоғарылауымен түсіндіріледі. Осылайша, қабырға қалыңдығын оңтайландыру экструдердің механикалық қасиеттерін жақсартады, оның тұрақтылығы мен беріктігін қамтамасыз етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Yuan, P. F., Zhan, Q., Wu, H., Beh, H. S., Zhang L.** Real-time toolpath planning and extrusion control (RTPEC) method for variable-width 3D concrete printing : Journal of Building Engineering, Shanghai, 2022.

2 **Rizzieri, G., Ferrara, L., Cremonesi, M.** Numerical simulation of the extrusion and layer deposition processes in 3D concrete printing with the Particle Finite Element Method : Computational Mechanics, Milan, 2024.

3 **Rehman, A. U., Birru, B. M., Kim, J. H.** Set-on-demand 3D Concrete Printing (3DCP) construction and potential outcome of shotcrete accelerators on its hardened properties : Case Studies in Construction Materials, Seoul, 2023.

4 **Bresegghello, L., Naboni, R.** Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures: Additive Manufacturing, Odense, 2022.

5 **Albar A., Swash M. R., Ghaffar S.** The Design and Development of an Extrusion System for 3D Printing Cementitious Materials, London, 2019.

6 **Zheng, Z., Li, Z., Guo, S.** Lightweight design of seat based on parametric modeling and 3D printing: Journal of Forestry Engineering, 9(5), 2024.

7 **Teke, I. T., Ertas, A. H.** Enhancing structural analysis efficiency: a comprehensive review and experimental validation of advanced submodeling techniques, introducing the submodeling-density-shape-element removal (S-D-S-ER) method: Engineering Computations, Swansea, Wales, 41(7), 2024.

8 **Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Czaderski, C., Shahverdi, M.** From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites: Composites Part B: Engineering, 281, 2024.

9 **Шеров, К. Т., Ракишев, А. К., Доненбаев, Б. С., Совет, Н. Ә.** Studying the rigidity of parts of rotational-frictional tool within NX CAE: Научный журнал Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова «Наука и техника Казахстана», 2019. – № 3. – С. 96–103.

10 **Breseghello L., Naboni R.** Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures: Additive Manufacturing, University of Southern Denmark, Section for Civil and Architectural Engineering, Odense, Denmark, 2022.

REFERENCES

1 **Yuan, P. F., Zhan, Q., Wu, H., Beh, H. S., Zhang L.** Real-time toolpath planning and extrusion control (RTPEC) method for variable-width 3D concrete printing : Journal of Building Engineering, Shanghai, 2022.

2 **Rizzieri, G., Ferrara, L., Cremonesi, M.** Numerical simulation of the extrusion and layer deposition processes in 3D concrete printing with the Particle Finite Element Method : Computational Mechanics, Milan, 2024.

3 **Rehman, A. U., Birru, B. M., Kim, J. H.** Set-on-demand 3D Concrete Printing (3DCP) construction and potential outcome of shotcrete accelerators on its hardened properties : Case Studies in Construction Materials, Seoul, 2023.

4 **Breseghello, L., Naboni, R.** Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures: Additive Manufacturing, Odense, 2022.

5 **Albar, A., Swash, M. R., Ghaffar, S.** The Design and Development of an Extrusion System for 3D Printing Cementitious Materials, London, 2019.

6 **Zheng, Z., Li, Z., Guo, S.** Lightweight design of seat based on parametric modeling and 3D printing: Journal of Forestry Engineering, 9(5), 2024.

7 **Teke, I. T., Ertas, A. H.** Enhancing structural analysis efficiency: a comprehensive review and experimental validation of advanced submodeling techniques, introducing the submodeling-density-shape-element removal (S-D-S-ER) method: Engineering Computations, Swansea, Wales, 41(7), 2024.

8 **Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Czaderski, C., Shahverdi, M.** From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites: Composites Part B: Engineering, 281, 2024.

9 **Sherov, K. T., Rakishev, A. K., Donenbaev, B. S., Sovet, N. A.** Studying the rigidity of parts of rotational-frictional tool within NX CAE [Studying the rigidity of parts of rotational-frictional tool within NX CAE]: Nauchnyj zhurnal Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S. Torajgyrova «Nauka i tekhnika Kazahstana», 2019. – № 3 – P. 96–103.

10 **Breseghello, L., Naboni, R.** Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures: Additive Manufacturing, University of Southern Denmark, Section for Civil and Architectural Engineering, Odense, Denmark, 2022.

08.11.24 ж. баспаға түсті.

09.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

19.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**Е. Е. Исенов, А. К. Ракишев, Б. С. Доненбаев*

Қарагандинский технический университет имени Абылқаса Сағинова,

Республика Казахстан, г. Караганда

Поступило в редакцию 08.11.24.

Поступило с исправлениями 09.11.24.

Принято в печать 19.11.2024.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В СРЕДЕ ANSYS WB ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУЗИОННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D ПЕЧАТИ

В данной статье подробно исследовано влияние геометрии экструдера на его механические свойства, в частности, на напряжение и деформацию. Исследование проводилось в программе ANSYS Workbench (WB) путем изменения геометрических параметров, включая детальный анализ влияния толщины стенки экструдера на его механическое поведение. Полученные результаты показали, что увеличение толщины стенки приводит к повышению жесткости конструкции и, следовательно, к уменьшению деформации. Однако, при достижении определенной толщины стенки было замечено снижение напряжений. Этот феномен подчеркивает важность определения оптимальных значений толщины стенки при проектировании экструдера. Изменение толщины стенки повышает устойчивость экструдера к деформациям и динамическим нагрузкам, значительно улучшая его надежность в работе. Оптимальный выбор толщины стенки увеличивает эффективность экструдера и продлевает срок его службы. Полученные результаты позволяют улучшить механические свойства экструдера, повысить его прочность и обеспечить долгосрочную надежность. Результаты исследования способствуют не только повышению эффективности использования экструдера в производственной сфере, но и внедрению решений, направленных на продление срока его эксплуатации, что улучшает качество производства. Методология, представленная в статье, ускоряет процесс проектирования, предоставляя возможность для разработки эффективных и экономически выгодных решений. Результаты работы дают инженерам и конструкторам конкретные рекомендации по оптимизации структурных параметров экструдера, что позволяет повысить качество производства и снизить затраты.

Ключевые слова: экструдер, параметризация, ANSYS Workbench, механические характеристики, строительный 3D принтер.

***Y. Y. Issenov¹, A. K. Rakishev², B. S. Donenbaev³**

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Received 08.11.24.

Received in revised form 09.11.24.

Accepted for publication 19.11.24.

PARAMETRIC STUDY OF STRENGTH PARAMETERS IN ANSYS WB FOR EXTRUSION WORKING BODY FOR CONSTRUCTION 3D PRINTING

This article provides an in-depth study of the impact of extruder geometry on its mechanical properties, specifically stress and deformation. The research was conducted in the ANSYS Workbench (WB) software by modifying geometric parameters, including a detailed analysis of the effect of wall thickness on the extruder's mechanical behavior. The results showed that increasing the wall thickness leads to greater structural stiffness, which, in turn, reduces deformation. However, when a certain wall thickness is reached, a reduction in stress is observed. This phenomenon highlights the importance of determining optimal wall thickness values when designing extruders. Changes in wall thickness improve the extruder's resistance to deformation and dynamic loads, significantly enhancing its operational reliability. Selecting the optimal wall thickness increases extruder efficiency and extends its service life. The findings allow for the improvement of the extruder's mechanical properties, strengthening it and ensuring long-term reliability. The research results contribute not only to increasing the efficiency of extruder use in the industrial sector but also to implementing solutions aimed at extending its lifespan, which improves production quality. The methodology presented in the article accelerates the design process, allowing for the development of efficient and economically advantageous solutions. The results provide engineers and designers with concrete recommendations for optimizing the extruder's structural parameters, which helps enhance production quality and reduce costs.

Keywords: extruder, parameterization, ANSYS Workbench, mechanical characteristics, construction 3D printer.

***А. Т. Канаев¹, А. В. Богомолов²,
Б. У. Байкожаева³, А. Е. Молдахметова⁴**

^{1,3,4}ЕНУ имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана,

²Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2530-038x>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4926-0925>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3042-6427>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9690-5095>

*e-mail: kanayevat@gmail.com

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

В статье проанализированы действующие входные и выходные параметры поверхностного плазменного упрочнения железнодорожных колес. Поверхностная плазменная закалка рассматривается как сложный технологический процесс, в котором все внутренние и внешние параметры взаимосвязаны и выбор значений регулируемых параметров должен производиться с учетом этих взаимосвязанных и взаимообусловленных связей. Рассмотрена структурная схема технологии поверхностного плазменного упрочнения производства цельнокатанных железнодорожных колес, что является основой для создания интегрированного технологического участка в действующем производственном процессе.

Важными параметрами процесса поверхностного плазменного упрочнения являются максимальная температура нагрева поверхностного слоя и скорость охлаждения поверхностного слоя. железнодородного колеса относятся сила тока и напряжение, марка и расход плазмообразующего газа, угол заточки электрода, диаметр керамического сопла, расстояние между срезом сопла и поверхностью обрабатываемого материала, скорости вращения колесной пары, марка стали и ее физико-механические свойства. Эти параметры являются переменными, поэтому их можно варьировать при разработке технологии плазменного упрочнения. В качестве выходных параметров процесса поверхностной плазменной закалки, применительно к железнодорожным колесам) используются: твердость упрочненного слоя; трещиностойкость; глубина закаленной зоны; ширина закаленной зоны; остаточные напряжения в упрочненном слое, качество упрочненной поверхности и ее шероховатость.

Ключевые слова: плазменное упрочнение, параметры, износ, трещиностойкость, твердость, остаточные напряжения.

Введение

Взаимодействие колеса и рельса является физической основой движения поездов по железным дорогам, определяющей не только технико-экономические показатели железнодорожного транспорта, но и безопасность движения поездов.

Условия взаимодействия в паре трения «колесо-рельс» оказывает существенное влияние на эксплуатационный срок службы колесной пары и расход топливно-энергетических ресурсов, на тягу поездов, которые непосредственно связаны с условиями сцепления и трения в зоне контакта колес и рельсов. По оценкам специалистов железных дорог, потери, обусловленные изнашиванием в системе колесо-рельс, составляет от 10 до 30 % топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на тягу поездов [1, 2].

Одним из важных направлений повышения эксплуатационного ресурса железнодорожных колес является применение поверхностного плазменного упрочнения, обеспечивающего получение упрочненных зон толщиной 1,5-2,0 мм, как правило, достаточный для многих тяжело нагруженных деталей (изделий). Это объясняется высокими технико-экономическими характеристиками плазменной обработки и возможностью получения требуемого уровня эксплуатационных свойств.

Важными параметрами процесса поверхностного плазменного упрочнения являются максимальная температура нагрева поверхностного слоя и скорость охлаждения поверхностного слоя. Температура нагрева в каждой точке зоны закалки должна быть равной или больше критической для данного материала $T_{нагр} \geq T_{зак}$. Для колесной стали 65Г температура закалки составляет $T_{зак} = 840 \text{ }^\circ\text{C}$ [3,4].

Необходимо отметить, что при разработке технологии плазменного упрочнения температура нагрева поверхностного слоя и скорость охлаждения поверхностного слоя не являются параметрами прямого регулирования, так как на их значения влияет большое число внутренних и внешних факторов: химический состав материала, его структура и теплофизические и механические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, прочность, твердость,), характер распределения остаточных напряжений, мощность плазменной струи (сила тока, напряжение), скорость обработки, марка и расход плазмообразующего газа, диаметр керамического сопла, расстояние от слеза сопла до поверхности обрабатываемого изделия и др. Поэтому процесс поверхностной плазменной обработки рассматривается как сложная структурная система, в которой все внутренние и внешние параметры технологии взаимосвязаны и выбор значений регулируемых факторов должен производиться с учетом этих взаимосвязанных и взаимообусловленных связей [5–7].

Материалы и методы

Объектом исследования является технология плазменного упрочнения железнодорожных колес по ГОСТ10791-2011 «Колеса цельнокатаные», изготовленных из стали 65Г.

Методы исследования, применяемые в работе: сравнительный анализ, системный подход.

Далее приведен анализ действующих входных и выходных параметров технологии плазменного упрочнения железнодорожного колеса.

Результаты и обсуждение

К входным параметрам технологии плазменного упрочнения железнодорожного колеса относятся сила тока и напряжение, марка и расход плазмообразующего газа, угол заточки электрода, диаметр керамического сопла, расстояние между срезом сопла и поверхностью обрабатываемого материала, скорости вращения колесной пары, марка стали и ее физико-механические свойства. Эти параметры являются переменными, поэтому их можно варьировать при разработке технологии плазменного упрочнения.

От марки плазмообразующего газа зависит температура плазмы. В качестве плазмообразующего газа используется аргон технической чистоты, обеспечивающей защиту обрабатываемой поверхности от окисления и выгорания легирующих элементов (в частности, главного легирующего элемента в стали 65Г - марганца). Расход плазмообразующего газа должен обеспечивать стабильное плазмообразование.

Результаты исследований [8] показывают, что наряду с увеличением силы тока необходимо повышать и расход плазмообразующего газа, приводящий к увеличению твердости и глубины упрочненного слоя. Это объясняется тем, что тепловая мощность плазменной струи изменяется пропорционально току, а при увеличении расхода газа происходит дополнительное обжигание дуги, вызывающее рост температуры плазмы, что не всегда учитывается при плазменной обработке многих массивных изделий.

Важную практическую значимость имеет влияние диаметра плазмообразующего сопла на размеры зоны (глубины и ширины) закалки и на скорость охлаждения.

Результаты проведенных нами масштабных экспериментов показывают, что изменение глубины и ширины упрочненного слоя в зависимости от диаметра плазмообразующего сопла при $I = 80\text{A}$, $s = 10\text{мм}$ (s – толщина образца) имеет одинаковый характер, возрастая до диаметра 3,2 мм и постепенно снижаясь до глубины $h = 0,05\text{ мм}$ и ширины $b = 0,95\text{ мм}$ при диаметре сопла 3,8 мм. Обращает внимание и то, что глубина зоны закалки является более чувствительной характеристикой режима закалки по сравнению с шириной этой зоны. Важность влияния диаметра плазмообразующего сопла на скорость охлаждения обоснована еще и тем, что для конструкционных сталей критическая скорость охлаждения, обеспечивающая мартенситную структуру, достигается при диаметре сопла 3,0-3,5 мм.

Угол заточки электрода влияет на стабильность горения плазменной струи, Образование в процессе плазменной закалки на торце электрода площадки оплавления может приводить к перемещению пятна дуги, что вызывает колебания всего столба плазменной дуги и, соответственно потери теплоты и мощности

Расстояние от среза сопла до упрочняемой поверхности должно оставаться постоянным для максимального использования тепловой энергии плазменной

дуги (струи). Практика показывает, что это обеспечивается при расстоянии от среза сопла до упрочняемой поверхности, равном 10-20 мм.

Скорость вращения колесной пары или перемещения плазмотрона закаливаемого изделия, определяющая производительность процесса, для каждого материала должна выбираться индивидуально, поскольку зависит от теплофизических свойств обрабатываемых материалов.

На основе ранее проведенных экспериментов исследованы возможности регулирования структуры и свойств тонкого поверхностного слоя (1,5-2,0 мм) железнодорожного колеса при плазменной закалке в зависимости от требуемого уровня прочности и твердости. С этой целью совместно со специалистами машиностроительного завода ТОО «ПромМашКомплект» (г. Экибастуз Павлодарской области) был разработан механизм вращения колесной пары, который оснащен мотор-редуктором SK90131.1-631/4 производства ООО «НОРД Приводы» (г. Санкт-Петербург), Механизм вращения колесной пары обеспечивает частоту вращения 0,14-0,25 об/мин, что соответствует полному обороту колеса за 7.0-5.0 мин. в процессе плазменного упрочнения с регулированием частоты ее вращения. При этом изменяется время контакта поверхности железнодорожного колеса с плазменной струей, что влияет соответственно на структуру и уровень механических характеристик. Эксперименты показали, что механизм вращения колесной пары должен обеспечивать вращение колеса равномерно, без рывков, что исключает неровности на контактной поверхности колеса и дефекты в виде микроплавления, влияющие на качество поверхности при плазменной закалке.

Толщина обрабатываемого материала. Размер изделия (толщина обода и гребня колеса) и ее теплофизические свойства влияют на скорость охлаждения поверхностного слоя. Исследования показывают, что при постоянных значениях диаметра плазмообразующего сопла (3 мм) и тока сжатой дуги и постоянной температуре поверхности (1200 °С) на деталях одинаковой толщины формируется зона плазменной закалки практически одинаковой ширины - (6,0 мм), а глубина зоны закалки перестает уменьшаться, начиная с толщины листа 4 мм в интервале 4,0–20 мм.

Сравнение распределения твердости по глубине образцов разной толщины (3 и 10 мм) показывает, что для обоих исходных состояний значения твердости для толстых образцов выше, но у них меньше глубина упрочнения, что объясняется прогревом тонких образцов на большую глубину и последующим большим снижением твердости мартенсита после последующего отпуска. На образцах малой толщины (3мм) после плазменной закалки наблюдается меньшее упрочнение закаленного слоя. Значение твердости в них ниже, чем у более массивных (толстых) образцов, так как тонкие образцы прогреваются быстрее и на большую глубину. Таким образом, на тонких образцах при одинаковых условиях обработки наблюдается дополнительное снижение твердости из-за протекания в большей мере отпускных явлений после закалки вследствие большего прогрева образцов. Поэтому при анализе формирующихся структур в деталях, имеющих переменное сечение, необходимо учесть разные условия их прогрева и охлаждения, что важно при анализе образующихся структур [8,9].

В качестве выходных параметров процесса поверхностной плазменной закалки, применительно к железнодорожным колесам) используются: твердость упрочненного слоя; трещиностойкость; глубина закаленной зоны; ширина закаленной зоны; остаточные напряжения в упрочненном слое, качество упрочненной поверхности (шероховатость).

Как выше отмечалось, поверхностная плазменная закалка рассматривается как сложный технологический процесс, в котором все внутренние и внешние параметры взаимосвязаны и выбор режима регулируемых параметров должен производиться с учетом этих взаимосвязанных и взаимообусловленных связей, имеющих входные и выходные параметры (рисунок 1).

Так, в области режимов, характерных для относительно малых токов дуги (до 80 А) и небольших скоростей обработки, такие внутренние параметры, как сила тока, движение плазматрона или скорость вращения колесной пары, размеры зоны закалки лимитирует скорость охлаждения металла, которая для получения закалочной структуры должна быть не меньше, чем критическая скорость закалки обрабатываемой стали. В области повышенных токов плазменной дуги (свыше 80А) и больших скоростей обработки, размеры зоны закалки лимитируются температурой поверхности закаливаемого металла, которую необходимо ограничивать для предупреждения роста зерна и микроплавления (для колесной стали 65Г не более 1100–1200 °С).



Рисунок 1 – Структурная схема технологии плазменного поверхностного упрочнения железнодорожных колес

Поскольку углерод является основной постоянной примесью любой стали, в том числе, колесной стали 65Г, для практики имеет значение установление влияния его содержания в интервале 0,55–0,65% (в рамках ГОСТ10791-2011) на твердость упрочненного (закаленного) поверхностного слоя, в частности, увеличение содержания углерода в указанном интервале на показатели

механических свойств плазменно-закаленной стали при постоянных других параметрах режима плазменной закалки. Такие экспериментальные исследования дали бы возможность установить влияние изменения содержания углерода в пределах действующего Межгосударственного стандарта ГОСТ 10791-2011 на механические свойства стали при поверхностной плазменной закалке.

Плазменная обработка в сочетании с предварительной объемной закалкой существенно повышает твердость и усталостную прочность железнодорожное колесо. При поверхностном плазменном упрочнении в объемно-упрочненных деталях и изделиях образуется композитный рабочий слой с высокой износостойкостью и относительно мягкой и пластичной сердцевиной. Однородность структуры металлических материалов, используемых в практических целях, не всегда желательна. Материалы с градиентной (неоднородной) структурой лучше соответствуют реальным условиям эксплуатации, чем с однородной. Поэтому при создании технологического участка плазменного упрочнения железнодорожных колес необходимо предусмотреть сочетание поверхностной плазменной закалки с объемной закалкой.

Сравнительный анализ полученных результатов с соответствующими требованиями Межгосударственного стандарта ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные» показывает, что технические требования, предъявляемые к механическим свойствам (к прочности) стали, приведены для колес, подвергнутых традиционной термической обработке путем закалки и отпуска и не учитывают специфику поверхностной плазменной обработки; именно, сверхвысокую скорость нагрева и охлаждения ($\sim 1500\text{--}3000^\circ\text{C}/\text{c}$) и ($\sim 700\text{--}800^\circ\text{C}/\text{c}$), при которой закаливается (упрочняется) тонкий поверхностный слой толщиной $\sim 1,0\text{--}1,5\text{ мм}$ с повышением твердости в $\sim 2,5$ раза. Заметим, что при этом структура и физико-механические свойства материала во внутренних слоях не изменяются. Поэтому возникает необходимость при поверхностной плазменной закалке наряду с прочностью указать твердость, поскольку именно твердость поверхностного (рабочего) слоя обеспечивает износостойкость колеса. Оценка твердости по значению прочности не обеспечивает объективности измерений, тем более в стандарте указывается прочность не поверхностного слоя обода, а его объемная прочность.

С этих позиций предлагается конкретизировать пункт 6.10 «Механические свойства стали колес» ГОСТ 10791-2011; конкретно рассмотреть возможность в примечании этого пункта дополнительного указания твердости поверхностного слоя при плазменной закалке. Для колес, подвергнутых такой специфической обработке, предлагаемое предложение по актуализации должно рассматриваться разработчиками стандарта АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (РФ) в соответствии с ГОСТ 1.2-2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации».

Следует отметить также, что технологии поверхностного плазменного упрочнения характеризуются сверхвысокими скоростями нагрева (по большинству оценок $\sim 1500\text{--}3000^\circ\text{C}/\text{c}$) и охлаждения ($\sim 700\text{--}800^\circ\text{C}/\text{c}$) и кратковременностью

воздействия на металл (10-2–10-4с). Поэтому особое значение приобретают неравновесные процессы, которые имеют важное, а в ряде случаев определяющее, значение при формировании конечной структуры. При скоростном нагреве и охлаждении желаемые свойства металла чаще всего достигаются не в результате выделения равновесных фаз при превращениях, благодаря формированию тех или иных метастабильных фаз и структур. Это сильно влияет на процессы зарождения и роста зерен высокотемпературной фазы (аустенита), их гомогенизацию и распад при охлаждении. Так, процесс зарождения новой фазы при плазменной закалке сильно опережает процесс их роста, что приводит к формированию сильно измельченной структуры с трехкратным уменьшением величины зерна и соответственно получению комплекса высоких механических свойств. Таким образом, для объяснения кинетики фазовых превращений не учитывается специфические особенности плазменной обработки, а именно локальности теплового воздействия при плазменной закалке, приводящее к тому, что из-за малого объема разогреваемого металла процессы нагрева и охлаждения протекают, как отмечалось, с огромной скоростью, приводящее к формированию сильно измельченных фазовых составляющих и соответственно получению высоких механических свойств [10].

С учетом вышеизложенного, для повышения износостойкости и трещиностойкости при назначении режима плазменной закалки необходимо создать условия (прежде всего, мощности плазменной дуги, скорости плазменной закалки, глубины и ширины закаленной зоны), приводящие к максимальному значению остаточных сжимающих напряжений в поверхностном и подповерхностном слое металла и изменению знака остаточных напряжений на границе с исходной структурой путем преобразования сжимающих остаточных напряжений в растягивающие.

Отметим, что в реальных производственных условиях получить прямые экспериментальные данные по оптимизации твердости рельсов и колес является сложной технико-экономической задачей. Это связано с большой длительностью (до двух лет) и трудоемкостью промышленных испытаний, обусловленных необходимостью выработки ресурса исследуемой колесной пары, ее периодической разборки, сложностью измерения износа изделий (деталей). Поэтому основные данные по определению оптимального соотношения твердости колеса и рельса, обеспечивающего минимальный износ, изучаются в лабораторных условиях при физическом моделировании этих процессов. Многочисленные лабораторные исследования [4-6, 9, 10] показали, что наибольшее влияние на процессы изнашивания оказывают внешние факторы: степень проскальзывания, коэффициент трения, определяемый наличием или отсутствием смазки и количеством влаги в контакте, силами, действующими на контактной (рабочей) поверхности. Также необходимо учитывать влияние на интенсивность изнашивания колес и рельсов внутренних факторов рельсовых и колесных сталей (твердости поверхностного упроченного слоя, содержания углерода,

микроструктуры, формы и содержания неметаллических включений) в реально существующем интервале их варьирования.

Лабораторные исследования по выяснению оптимального диапазона твердости колеса и рельса по потере массы (объемный износ) и по уменьшению размера предварительно нанесенного отпечатка (линейный износ) показывают необходимость учета всех конкретных условий испытаний, в частности, параметров всех внутренних и внешних факторов [11,12]. Так, оптимальный диапазон твердости колеса и рельса, определенный по уменьшению размера отпечатка, находится в интервале 1.38–1.55. Этот интервал, проведенный в одинаковых условиях, для одних же сталей с теми же параметрами, практически подтверждает износ, выявленный по потере массы 1.41–1.58. Эти результаты и их обоснование должны быть проверены в реальных производственных условиях.

Характер изменения эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий при плазменном упрочнении наряду с особенностями кинетики фазовых и структурных превращений обусловлен реализацией определенных механизмов упрочнения при их взаимосвязи. Применительно к поверхностному плазменному упрочнению влияние различных механизмов твердорастворного, дислокационного, дисперсионного и зернограничного упрочнений, роль и вклад их в общее упрочнение при скоростном нагреве и охлаждении практически не изучены и требуют теоретических и прикладных исследований по выяснению эффективности и применимости действующих механизмов упрочнения [13]. Поэтому формирующиеся структуры (степень дисперсности фазовых составляющих) и свойства, определяющее важнейшую характеристику конструктивной прочности стали (предел текучести) должны анализироваться с учетом этих особенностей плазменной обработки.

Практическая применимость результатов исследований состоит в том, что в ней показана возможность использования инновационной плазменной обработки цельнокатаных железнодорожных колес для повышения их износостойкости, зависящей от таких выходных параметров как поверхностная твердость, глубина и ширина зоны закалки, шероховатость, характер распределения и величина остаточных напряжений, толщина градиентно-слоистой структуры. Эти выходные параметры поверхностного плазменного упрочнения для каждого материала выбирается индивидуально. Так, результаты наших исследований и анализ литературных данных по этой проблеме [10–13] показывают, что для повышения эксплуатационного ресурса цельнокатаных железнодорожных колес не менее 2 раз из конструкционной стали 65Г рекомендуется: поверхностная твердость 370–450 НВ, глубина зоны закалки ~1,7-2,0 мм, (достаточная для деталей ответственного назначения), шероховатость $Rz \leq 40$ мкм (поскольку плазменная закалка является финишной операцией), остаточные сжимающие напряжения в упрочненном слое интенсивностью до 48,2 кг/мм², толщина градиентно-слоистой структуры с учетом зоны термического влияния со структурой бейнит + троостит 3,5–4,0 мм.

Выводы

1 Подробно проанализированы действующие входные и выходные параметры поверхностного плазменного упрочнения железнодорожных колес с учетом их дальнейшего совершенствования.

2 Поверхностная плазменная закалка рассматривается как сложный технологический процесс, в котором все внутренние и внешние параметры взаимосвязаны и выбор значений регулируемых параметров должен производиться с учетом этих взаимосвязанных и взаимообусловленных связей.

3 Предложена структурная схема технологии производства поверхностного плазменного упрочнения цельнокатаных железнодорожных колес, что является основой для создания интегрированного технологического участка в действующем производстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Bogdanov, V. M., Zakharov, S. M.** Modern problems of wheel-rail system [Text]. // World Railroads, 1. – 2014, P. 57–62.

2 **Wanming, Z., Xuesong, J., Zenfeng W.** Wear problems of high-speed wheel/rail systems: Observations, Causes, and Countermeasures in China [Text]. // Appl. Mech. Rev Nov., 6(2020), <https://doi.org/10.1115/1.4048897>.

3 **Hu, W., Watson, M., Maiorino, M., et al.** Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values [Text]. // Wear (2021) 477, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203831>.

4 **Xiaojiao, Sh., Qingzhi, Ya., Xiaoxin, Zh., et al.** Hardness matching of rail/wheel steels for high-speed-train based on wear rate and rolling contact fatigue performance [Text] // Materials Research Express 6 (2019), 066501, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab072d>.

5 **Kanayev, A. T., Bogomolov, A. V., Kanayev, A. A.** Increase of Wear Resistance and Contact-Fatigue Strength of Wheel Steel by Plasma Hardening [Text] // Solid State Phenomena (2018) 284, 1144, <https://doi.org/10.4028>. – [Electronic resource]. – www.scientific.net/SSP.284.1144.

6 **Spangenberg, U., Fröhling, R. D., Els, P. S.** The effect of rolling contact fatigue mitigation measures on wheel wear and rail fatigue [Text] // Wear 398–399 (2018), 56–68. – <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.012>.

7 **Lewis, R., Christoforou, P., Wang, W.J., et al.** Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project) [Text] // Wear, 430–431, 2019. – P. 383–392.

8 **Nikulin, S. A., Shitkin, S. L., Rozhnov, A. B., et al.** Application of X-ray method to determine stressed state of parts of railway transport [Text] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy 60, 2017. – P. 200–206. – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-3-200-206>.

9 **Efremenko, V. G., Shimizu, K., Pastukhova, T. V.** Effect of bulk heat treatment and plasma surface hardening on the microstructure and erosion wear resistance of

complex-alloyed cast irons with spheroidal vanadium carbides [Text] // J Friction Wear 38, 2017. – P. 58–64. – <https://doi.org/10.3103/S1068366617010056>.

10 **Bogomolov, A. V., Kanaev, A. T., Sarsembaeva, T. E.** Determination of mechanical characteristics plasma hardened wheel steel [Text] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 969. – 2020. – 012037. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012037>.

11 **Vainoryute, V. V.** Development of production technology for railway wheels billets based on LLP «PROMMASHKOMPLEKT» / Vainoryute V. V., Dychko I. N. [Text] // Science and Technology of Kazakhstan. – 2018. – № 1. – С. 41–52.

12 **Xiang, Y.** Effects of thermal plasma surface hardening on wear and damage properties of rail steel / Xiang, Y., Yu, D., Cao, X., Liu, Y., Yao, J. [Text] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology (2018), 232 (7), P. 787–796.

13 **Kossanova, I. M.** Effect of Electrolytic-Plasma Surface Treatment on Structure, Mechanical, and Tribological Properties of Grade 1 Wheel Steel / Kossanova, I. M., Jaksymbetova, M. A., Akhmedyanov, A. U., Kirgizbayeva, K. Z. [Text] // Metallurgist. – 2022. – 66 (7–8), P. 822–829.

Поступило в редакцию 01.10.24.

Поступило с исправлениями 13.10.24.

Принято в печать 13.11.2024.

**А. Т. Қанаев¹, А. В. Богомоллов², Б. Ұ. Байқожаева¹, Ә. Е. Молдахметова¹*

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

01.10.24 ж. баспаға түсті.

13.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

13.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТҮТАС ИЛЕКТЕЛГЕН ТЕМІРЖОЛ ДӨҢГЕЛЕКТЕРІН ПЛАЗМАЛЫҚ ҚАТАЙТУ ПАРАМЕТРЛЕРІ

Мақалада теміржол доңғалақтарының беткі плазмалық қатаюының қолданыстағы кіріс және шығыс параметрлері талданады. Беттік плазмалық сөндіру күрделі технологиялық процесс ретінде қарастырылады, онда барлық ішкі және сыртқы параметрлер өзара байланысты және реттелетін параметрлердің мәндерін таңдау осы өзара байланысты және өзара байланысты байланыстарды ескере отырып жасалуы керек. Жұмыс істеп тұрған өндіріс процесінде интеграцияланған технологиялық учаскені құру үшін негіз болып табылатын тұтас илектелген теміржол дөңгелектерін өндіруді үстірт плазмалық қатайту технологиясының құрылымдық схемасы қарастырылған. Беттік плазманы қатайту процесінің маңызды параметрлері-беткі қабаттың максималды қыздыру температурасы және беткі қабаттың салқындату жылдамдығы. теміржол доңғалағына ток күші мен кернеу,

плазма түзетін газдың маркасы мен шығыны, электродты қайрау бұрышы, керамикалық саптаманың диаметрі, саптаманың кесіндісі мен өңделетін материалдың беті арасындағы қашықтық, доңғалақ жұбының айналу жылдамдығы, болат маркасы және оның физикалық-механикалық қасиеттері жатады. Бұл параметрлер өзгермелі, сондықтан оларды плазманы қатайту технологиясын жасау кезінде өзгертуге болады. Темір жол дөңгелектеріне қатысты беттік плазмалық сөндіру процесінің Шығыс параметрлері ретінде) мыналар қолданылады: қатайтылған қабаттың қаттылығы; жарыққа төзімділік; қатайтылған аймақтың тереңдігі; қатайтылған аймақтың ені; қатайтылған қабаттағы қалдық кернеулер, қатайтылған беттің сапасы және оның кедір-бұдырлығы.

Кілтті сөздер: плазманы қатайту, параметрлер, тозу, жарыққа төзімділік, қаттылық, қалдық кернеулер.

***A. T. Kanayev¹, A. V. Bogomolov², B. U. Baykozhaeva¹, A. E. Moldakhmetova¹**

¹L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana

²Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 01.10.24.

Received in revised form 13.10.24.

Accepted for publication 13.11.24.

PARAMETERS OF PLASMA HARDENING OF SOLID-ROLLED RAILWAY WHEELS

The article analyzes the effective input and output parameters of surface plasma hardening of railway wheels. Surface plasma quenching is considered as a complex technological process in which all internal and external parameters are interconnected and the choice of values of controlled parameters must be made taking into account these interrelated and interdependent relationships. The structural scheme of the surface plasma hardening technology for the production of solid-rolled railway wheels is considered, which is the basis for creating an integrated technological site in the current production process. Important parameters of the surface plasma hardening process are the maximum heating temperature of the surface layer and the cooling rate of the surface layer. The railway wheel includes the current and voltage, grade and consumption of plasma-forming gas, the angle of sharpening of the electrode, the diameter of the ceramic nozzle, the distance between the nozzle section and the surface of the processed material, the rotation speed of the wheelset, the grade of steel and its physic-mechanical properties. These parameters are variable, so they can be varied when developing plasma hardening technology. As output parameters of the surface plasma hardening process, in relation to railway wheels), the following are used: hardness of the hardened layer; crack resistance; depth of the hardened zone; width of the hardened zone; residual stresses in the hardened layer, the quality of the hardened surface and its roughness.

Keywords: plasma hardening, parameters, wear, crack resistance, hardness, residual stresses.

**А. Ж. Касенов¹, *Д. А. Искакова², А. С. Янюшкин³,
А. А. Ткачук⁴, Д. Т. Қабдымали⁵**

^{1,2,4,5}Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

³Чувашский государственный университет, Чувашия, г. Чебоксары

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9552-1439>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3104-4818>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2230-3697>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7127-9377>

*e-mail: iskakovada@mail.ru

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБНОЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

В данной статье отражено исследование нестабильно-деформированного состояния трубной запорной арматуры, в частности клиновых задвижек, которые используются для управления потоками различных сред в трубопроводных системах. В работе приведены особенности эксплуатации запорной арматуры, принцип действия задвижки, материалы для ее изготовления, методы измерения износостойкости и надежности. Также описаны преимущества и недостатки клиновых задвижек. Многообразие условий эксплуатации, высокая потребность в надежности и долговечности, а также конструктивные отличия задвижек усложняют подбор оптимального оборудования для конкретных рабочих условий. Сделан акцент на необходимости учитывать реальные эксплуатационные параметр – такие как скорость потока, температура транспортируемой среды и положение клина – в процессе проектирования и расчета прочности. Основное внимание уделяется вопросам наплавки, твердым износостойким материалам, а также устойчивости к повреждениям уплотнительных поверхностей. Экспериментальная часть исследования включает в себя проведение наплавки Св-10Х17Т в среде защитных газов и наблюдение механических свойств наплавленного слоя. В ходе проведенных расчетов получены результаты подтверждения эффективности наплавки в повышении стойкости арматуры к износу и устойчивости к кавитационным воздействиям, что особенно важно для условий эксплуатации в агрессивных средах.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, клиновая задвижка, наплавка, износостойкость, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Неотъемлемой частью любых трубопроводов предприятий топливно-энергетического комплекса является арматура. Существует большое количество видов трубопроводной арматуры, наиболее распространенным из которых по количеству применяемых единиц является запорная арматура.

Задвижки относятся к наиболее простым устройствам, используемым для перекрытия проходов трубопроводов. Могут использоваться абсолютно для любых веществ. Состоят из корпуса, рабочего запорного устройства и привода.

Запорная трубопроводная арматура – задвижки подразделяется на следующие виды:

- клиновые;
- шиберные;
- параллельные;
- шланговые.

Принцип действия задвижки прост. Рабочий орган движется перпендикулярно к направлению движения потока. Он способен полностью перекрыть проход трубопровода. Хотя, если используется промышленная запорная арматура – задвижки могут быть регулируемы. Управление работой задвижек осуществляется при помощи пневматического, гидравлического, электрического привода или ручную.

Основные преимущества задвижек:

- малое гидравлическое сопротивление;
- небольшой коэффициент трения;
- простая конструкция;
- небольшая длина;
- возможность использовать для любых веществ.

Недостатки задвижек:

- значительная высота задвижек, особенно при использовании моделей с выдвигаемыми шпинделями;
- значительное время закрывания и открывания задвижки;
- быстрый износ уплотнительных поверхностей [1].

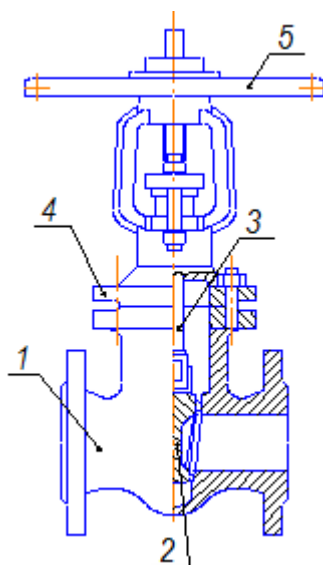
В сравнении с другими видами запорной арматуры клиновые задвижки (рисунок 1) имеют ряд преимуществ (незначительное гидравлическое сопротивление при полностью открытом проходе, простота обслуживания, возможность подачи сырья в любом направлении и др.).

Многообразие условий эксплуатации арматуры, вопросы ее надежности и долговечности, разнообразные конструкции затрудняют подбор арматуры для тех или иных конкретных условий работы. Этот процесс осложняется тем, что при проектировании конструкций клиновых задвижек прочностной расчет отдельных деталей проводят без учета реальных условий эксплуатации, таких как скорость потока транспортируемой среды, температура и положение клина.

Все задвижки характеризуются небольшим допустимым перепадом давлений на запорном устройстве, невысокой скоростью срабатывания запорного устройства, возможностью получения гидравлического удара в конце хода, большой высокой, трудностью ремонта изношенных уплотнительных поверхностей запорного устройства при эксплуатации, сложностью их изготовления.

При выборе запорного изделия руководствуются следующими техническими характеристиками: присоединительный диаметр, назначение и материал, из

которого изготавливается корпус и рабочая часть трубопровода, скорость закрытия. Специальные требования: продолжительные сроки службы, высокая прочность, надёжность, безопасность, коррозионная устойчивость материала к рабочей среде, герметичность, простота монтажа и удобство эксплуатации [1].



1 – корпус; 2 – клин; 3 – шпindelь; 4 – крышка; 5 – маховик
Рисунок 1 – Задвижка стальная клиновая с выдвижным шпindelем

Следует отметить, что рабочая среда трубопровода достаточно быстро повреждает изделия запорной арматуры, происходит истирание уплотнительных элементов, износ, коррозионные процессы, поэтому необходимо своевременно проводить технический контроль оборудования, промывку систем магистралей, ремонт или замену изделия [2].

Материалы и методы

Материалы для деталей трубопроводной арматуры должны соответствовать условиям эксплуатации, учитывая рабочее давление, температуру и химические свойства среды. Материалы должны обеспечивать достаточную пластичность, прочность и устойчивость к коррозии. Арматура, находящаяся под давлением, должна иметь запас прочности с учетом коррозии и эрозии в соответствии с ГОСТ 9.908. Уплотнительные материалы должны быть устойчивы к воздействию рабочей среды и внешних факторов. Дополнительно, технические требования к отливкам, поковкам и другим элементам должны соответствовать нормативным документам.

Было проведено исследование изношенной части клина клиновой задвижки, чтобы оценить степень износа и выявить механизмы разрушения. Клиновая задвижка была выбрана для исследования, так как она широко используется в трубопроводных системах благодаря своей надежности, герметичности и способности эффективно работать в условиях высоких давлений и температур.

Особенность конструкции клина обеспечивает плотное перекрытие потока, однако при длительной эксплуатации возможен износ, что требует детального анализа для повышения долговечности оборудования.

Клины, как и любой механизм, нуждаются в ревизии и ремонте. Ремонт всегда намного выгоднее, чем покупка новой арматуры. Поэтому одним из наиболее распространенных процессов является процесс восстановления запорной арматуры. Клиновые задвижки обладают небольшим гидравлическим сопротивлением, что является важным фактором для магистрального трубопровода, где наблюдается высокая скорость перемещения потока рабочей среды.

Целью является исследование влияния режимов наплавки на износ покрытий сварочной проволокой.

В качестве наплавочного материала в работе использовалась сварочная проволока Св-10Х17Т ГОСТ 2246-70, следующего химического состава (мас. %): до 0,12 С, до 0,8 Si, до 0,7 Mn, до 0,6Ni, до 0,025 S, до 0,035 P, 16...18Cr, 0,2...0,5Ti, Fe – основа. Сварочная проволока не должна иметь следов ржавчины, масла и других загрязнений. Двуокись углерода должен поставляться в баллонах. В качестве основного материала использовали прутки из стали 20 диаметром 50 мм и длиной 500 мм.

Повышение износостойкости и долговечности материалов является одной из важнейших задач в производстве. Наличие абразивных частиц, различных примесей в среде приводит к износу уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры. Распространенным и эффективным способом является наплавка металлов. Наплавка твердыми износостойкими материалами предназначена для повышения износостойкости уплотнительных и трущихся поверхностей трубопроводной арматуры, работающих в условиях агрессивных сред, повышенных и низких температур или в других условиях [3]. При использовании наплавки восстанавливаются геометрические размеры изношенных деталей, также упрочняется основной металл при использовании электродных материалов с применением защитных газов, флюсов и электродных покрытий.

Было установлено, что для защиты от износа уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры перспективно использование покрытий, наносимых дуговой наплавкой, в среде защитных газов сварочной проволокой Св-10Х17Т [1].

Исследование выполнено в рамках проекта. Покрытие наносили на ТОО «Павлодарский завод трубопроводной арматуры» на сварочном участке. Технологический процесс восстановления геометрических размеров уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры, предусматривает ряд последовательных операций.

Образец поступает на участок для наплавки с механически обработанными поверхностями, подготовленными для наплавки. Снятие слоя необходимо для устранения неровностей и нагарованного слоя металла. Токарную обработку проводят до «чистого металла» (снимается не менее 3 мм поверхности). Обработку на станке выполняют на всей поверхности. Шероховатость поверхности деталей по параметру должен быть не более Ra12,5 мкм. Токарная обработка производится

на токарно-винторезном станке 16К20. Поверхность образца перед наплавкой очищают от всех загрязняющих веществ обезжиривают ацетоном, уайт-спиритом или другими растворителями.

Восстановление поверхности образца проводится на полуавтомате сварочном КЕМРП КЕМРОМАТ 4200 с горелкой ММ 42-4,5 м. Восстановительная наплавка подготовленной поверхности производится с припуском на чистовую механическую обработку не менее 3 мм на сторону. Во время наплавки возможно охлаждение наплавляемого изделия. Наплавка производится при температуре окружающего воздуха выше плюс 10 °С с предварительным и сопутствующим местным подогревом газопламенными горелками до 400–450°С, температура детали постоянно контролируется с помощью термопар или дистанционным пирометром С-20.3. Настроить сварочный аппарат для полуавтоматической наплавки. Установить необходимый вылет электрода, соответствующий его диаметру. На панели управления установить необходимые значения тока наплавки и напряжение сварочной дуги. Настроить величину сварочного тока для Ø1,2 мм Св-10Х17Т ГОСТ 2246-70.

Режимы наплавки:

- сила сварочного тока 120–180А, ток постоянный, полярность обратная;
- напряжение на дуге 18–22В;
- скорость наплавки 25–50 м/час;
- вылет электрода 15–20мм;
- расход углекислого газа 10–15 л/мин.

Режимы наплавки корректируют во время проведения работы.

Наплавку производить проволокой сварочной Ø 1,2 мм Св-10Х17Т ГОСТ 2246-70 в нижнем положении с наклоном мундштука от вертикального положения 15° в сторону перемещения. Высота наплавленного слоя не более 4 мм. Наплавка производится по винтовой линии, с перекрытием предыдущего валика. Величина перекрытия одного валика другим должна составлять от 1/8 до 1/2 ширины валика. После наплавки каждого валика производить зачистку наплавленного участка до металлического блеска металлической щеткой, шлак удалять из зоны последующей наплавки [1].

При завершении наплавки проводится термическая обработка наплавленной поверхности. Процесс термической обработки применяется для изменения металлургических и механических свойств. Процесс включает в себя нагрев и охлаждение материала. Известно, что твердость, полученная в процессе упрочнения, сильно зависит от содержания углерода в стали. Твердость HRC 30–45. Присутствие углерода в основе стального сплава в значительной степени несет ответственность за механические свойства [4].

Термической обработкой является низкотемпературный отпуск. Данный вид обработки необходим для снятия внутренних напряжений, возникших в процессе наплавки.

Окончательную механическую обработку наплавленной поверхности производят на токарном станке. Геометрические размеры должны соответствовать

заданному чертежу. Геометрический контроль наплавленной поверхности производится при использовании кронциркуля. Наплавленная поверхность не должна иметь видимых дефектов в виде трещин, непроваров, подрезов, а также усадочной и газовой пористости и неметаллических включений линейным размером более 1,5 мм и в количестве более 5 шт. на каждые 20 мм длины наплавленного металла [5].

Результаты и обсуждение

После проведения наплавки на образце, был произведен замер твердости по сечению наплавленного образца, определен химический состав металла наплавленного слоя и проведено определение на истирание наплавленного слоя.

Твердость наплавленного слоя, основного металла и околошовной зоны определялась по сечению образца. До замера твердости, определили глубину проплавления наплавленного слоя.

Глубина проплавления удовлетворяет средним значениям при проведении наплавки в защитных газах. Замер ширины и высоты наплавленного слоя выполнялся штангенциркулем ШЦ-1-125, с ценой деления 0,1 мм (ГОСТ 166-89).

Замер твердости производился по разработанной схеме замера твердости. При замере твердости, по высоте наплавленного слоя, по ширине наплавленного слоя расстояние между точками замера не изменялось. Также был произведен замер твердости в зоне термического влияния. Для замера твердости применялся твердомер Роквелла ТР-150Р. Измерения твердости проводилось по ГОСТ 9013, по стандартной шкале Роквелла (HRC) [6].

Полученные данные были сведены в таблицу по высоте наплавленного слоя в таблице 1 и таблицу по длине среза образца в таблице 2.

Таблица 1 – Твердость по высоте наплавленного слоя, в HRC

Образец	Точка			
	1	2	3	4
№1	33,8	41,1	36,4	36,1

Таблица 2 – Твердость по длине среза образца, в HRC

Образец	Точка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№1	37	32	31	34	30	33	38	33	40

Для определения и исследования химического состава наплавленного слоя было проведено спектральное исследование образцов. Химический состав металла в зонах наплавленного слоя и основного металла исследовали с применением портативного спектрометра TheimoNiton XL [7].

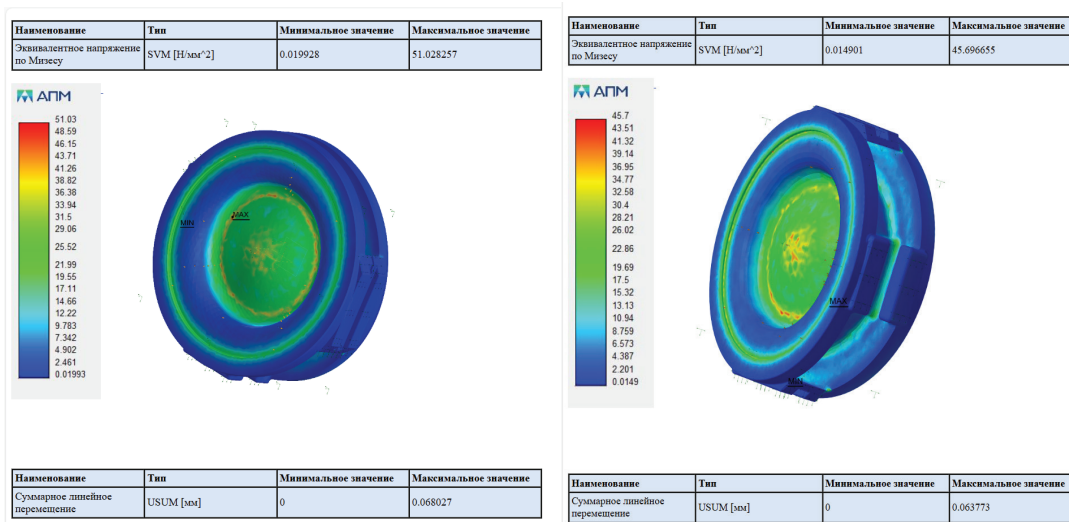
Для определения износостойкости наплавленного слоя при сухом трении металла о металл использовался способ по ГОСТ 30480-97, включающий в себя вращение контрольного тела с постоянной скоростью и прорезывание в исследуемом образце паза в зоне контакта, при постоянной нагрузке. Данный способ позволяет точнее определить износостойкость и упростить испытание [8].

В результате проведённого анализа нагружения клина клиновой задвижки в исходном состоянии и после ремонта (наплавки) были получены данные о распределении напряжений, деформаций и реакций на контактных поверхностях.

Анализ проводился в модули системы КОМПАС АРМ FEM [9].

Исследование выполнено в трех средах, при условиях, соответствующих рабочим параметрам трубопровода:

а) вода (рисунок 2): давление, приложенное к клину, составляет 2,5 МПа, температура среды — 40 °С, линейное ускорение – 2,5 м/с.



а) Клин без наплавки

б) Клин с наплавкой

Рисунок 2 – Напряжение и линейное перемещение в среде «Вода»

б) пар (рисунок 3): давление, приложенное к клину, составляет 10 МПа, температура среды — 540 °С, линейное ускорение – 70 м/с.

На основе проведённых исследований в средах вода, пар и нефтепродукты можно сделать вывод в виде таблицы, которая показывает влияние условий эксплуатации (давления, температуры, линейного ускорения) на напряжение и линейное перемещение клина клиновой задвижки, как с наплавкой, так и без неё (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты динамического анализа клина клиновой задвижки в разных рабочих средах

Среда	Давление (МПа)	Температура (°C)	Линейное ускорение (м/с ²)	Напряжение без наплавки, Н/мм ²	Напряжение с наплавкой, Н/мм ²	Линейное перемещение без наплавки	Линейное перемещение с наплавкой
Вода	2,5	40	2,5	51,03	45,69	0,068	0,064
Пар	10	540	70	190,05	197,41	0,269	0,255
Нефтепродукты	4	150	2,5	76,02	84,67	0,100	0,107

В ходе проведения исследований, выявлено, что:

Влияние наплавки: Напряжение и перемещение клина с наплавкой в каждой из сред ниже, чем у клина без наплавки, что указывает на повышение прочности и устойчивости к деформациям.

Воздействие температуры и давления: С повышением давления и температуры (например, в среде «Пар») наблюдаются более высокие значения напряжения и перемещения, что указывает на необходимость усиления материалов и конструкции для эксплуатации в агрессивных условиях.

Линейное ускорение: С увеличением линейного ускорения (например, в среде «Пар» с 70 м/с²) также повышается деформация клина, особенно без наплавки, что свидетельствует о важности стабилизации и усиления элементов клина для снижения динамических нагрузок.

Таблица 3 и выводы демонстрируют, как разные рабочие условия влияют на параметры клина и подтверждают необходимость наплавки для повышения долговечности задвижки.

Информация о финансировании

Исследования выполняются в рамках грантового финансирования научных и (или) научно-технических проектов на 2024–2026 годы по проекту BR24993003 «Разработка комплекса мероприятий инструментального обеспечения обрабатывающих отраслей экономики РК».

Выводы

В ходе проведения исследований был оценён износ клина клиновой задвижки и установлено, что наплавка твёрдыми износостойкими материалами является эффективным методом восстановления и повышения долговечности арматуры, работающей в агрессивных средах. Применение сварочной проволоки Св-10Х17Т в защитной среде углекислого газа позволило получить качественное наплавленное покрытие с высокой твёрдостью и стойкостью к истиранию. Результаты показали, что наплавка обеспечивает восстановление геометрии

деталей и повышает их эксплуатационные характеристики за счёт улучшенной износостойкости и сопротивляемости кавитационным разрушениям. Этот метод также увеличивает долговечность арматуры, особенно в условиях воздействия абразивных частиц и высоких температур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Мусина, Ж. К., Новоселова, Е. А., Магеллан, Д. А.** Литературный обзор наплавов уплотнительных поверхностей задвижек трубопроводной арматуры / Ж. К. Мусина, Е. А. Новоселова, Д. А. Магеллан // *Материалы международной научной конференции «XXIII Сатпаевские чтения»* / Торайгыров университет. – Павлодар, 2023. – Т. 11. – С. 318–324.

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

3 **Иванова, К. К.** Совершенствование методики прочностного расчета деталей клиновых задвижек с учетом параметров технологического потока: дисс. на соиск. ученой степ. канд.техн.наук по 050213 – Машины, агрегаты и процессы – Уфа, 2008. – 162 с.

4 **Матвиенко, В. Н.** Совершенствование технологии наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры // *Трубопроводная арматура.* / Под ред. В. Н. Матвиенко. – 2020. – С. 24–27.

5 **Еремин, Е. Н.** Исследование свойств металла 20Х13, полученного наплавкой в различных защитных газовых средах // *Сварочное производство.* / Под ред. Е. Н. Еремин. – 2021. – С. 105–108.

6 **Полосков, С. С.** Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры // *Машиностроение и машиноведение.* / Под ред. С. С. Полосков. – 2019. – С. 349–356.

7 **Искакова, Д. А., Касенов, А. Ж., Магеллан, Д. А., Золтан-Иосиф Корка.** Analysis of methods of hardening and restoration of worn parts. *STUDIA UNIVERSITATIS BABEŞ-BOLYAI, Engineering* 69(1) 2024. – P. 137–148.

8 **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>.

9 **Нефтегазовое машиностроение: проектирование и моделирование задвижки шиберной** / С. В. Никитин, Ю. А. Темпель, М. А. Осипов, Д. Е. Писарев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* – 2022. – № 8. – С. 412–416. – <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-412-417>. – EDN NJCVGU.

10 **Исаметова, М. Е.** Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния запорной арматуры для нефтегазовой промышленности / М. Е. Исаметова, В. В. Ялфимов // *Вестник Казахской академии*

транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2017. – № 1(100). – С. 34–40. – EDN YNUVZV.

11 **Свинцов, А. П.** Вентильная головка к водоразборной арматуре с высокой регулирующей способностью / А. П. Свинцов, М. И. Харун, С. А. Мукарзель // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 6(58). – С. 8-18. – <https://doi.org/10.5862/MCE.58.2>. – EDN UMAGIN.

REFERENCES

1 **Musina, Zh. K., Novoselova, E. A., Magellan, D. A.** A Literaturny`j obzor naplavok uplotnitel`ny`x poverxnostej zadvizhek truboprovodnoj armatury`. [Literary review of surfacing sealing surfaces of valves of pipeline fittings] / Zh. K. Musina, E. A. Novoselova, D. A. Magellan // Proceedings of the international scientific conference «XXIII Satpayev readings» / Toraigrov University. – Pavlodar, 2023. – Vol. 11. – P. 318–324.

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

3 **Ivanova, K. K.** Sovershenstvovanie metodiki prochnostnogo rascheta detalej klinovy`x zadvizhek s uchetom parametrov texnologicheskogo potoka. [Improvement of the method of strength calculation of wedge gate valve parts taking into account the parameters of the technological flow]: diss. on the job. the scientific step. Candidate of Technical Sciences Sciences on 050213 – Machines, aggregates and processes – Ufa, 2008. – 162 p.

4 **Matvienko, V. N.** Sovershenstvovanie texnologii naplavki uplotnitel`ny`x poverxnostej truboprovodnoj armatury`. [Improving the technology of surfacing sealing surfaces of pipeline fittings] // Pipeline fittings. / Edited by V. N. Matvienko. – 2020. – P. 24–27.

5 **Eremin, E. N.** Issledovanie svojstv metalla 20X13, poluchennogo naplavkoj v razlichny`x zashhitny`x gazovy`x sredax . [Investigation of the properties of 20X13 metal obtained by surfacing in various protective gas media] // Welding production. / Ed. by E. N. Eremin. – 2021. – P. 105–108.

6 **Poloskov, S. S.** Problemy` naplavki uplotnitel`ny`x poverxnostej truboprovodnoj armatury`. [Problems of surfacing sealing surfaces of pipeline fittings] // Mechanical engineering and machine science. / Edited by S. S. Poloskov. – 2019. – P. 349–356.

7 **Iskakova, D. A., Kasenov, A. J., Magellan, D. A., Zoltan-Joseph Korka.** Analysis of methods of hardening and restoration of worn parts. Studia universitatis BABEŞ-BOLYAI, Engineering 69(1). – 2024. P. 137–148.

8 **Denchik, A. I., Kasenov, A. J., Yanushkin, A. S., Musina, J. 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.] Bulletin

of Mechanical Engineering, 2023. – № 7. – P. 566–572. – <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-7-566-572>.

9 Neftegazovoe mashinostroenie: proektirovanie i modelirovanie zadvizhki shibernoj. [Oil and gas engineering: design and modeling of the gate valve] / S. V. Nikitin, Yu. A. Tempel, M. A. Osipov, D. E. Pisarev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. – 2022. – № 8. – P. 412–416. – <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-412-417>. – EDN NJCVGU.

10 Isametova, M. E. Komp`yuternoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zapornoj armatury` dlya neftegazovoj promy`shlennosti. [Computer modeling of the stress-strain state of shut-off valves for the oil and gas industry] / M. E. Isametova, V. V. Yalfimov // Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev. – 2017. – № 1(100). – P. 34-40. – EDN YNUVZV.

11 Svintsov, A. P. Ventil`naya golovka k vodorazbornej armature s vy`sokoj reguliruyushhej sposobnost`yu. [Valve head for water intake valves with high regulating capacity] / A. P. Svintsov, M. I. Harun, S. A. Mukarzel // Civil Engineering Magazine. – 2015. – № 6(58). – P. 8–18. – <https://doi.org/10.5862/MCE.58.2>. – EDN UMAGIN.

Поступило в редакцию 12.11.24.

Поступило с исправлениями 12.11.24.

Принято в печать 16.11.2024.

*А. Ж. Касенов¹, *Д. А. Исакова², А. С. Янюшкин³,*

А. А. Ткачук⁴, Д. Т. Қабдымали⁵

^{1,2,4,5}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

³Чуваш мемлекеттік университеті, Чувашия, Чебоксары қ.

12.11.24 ж. баспаға түсті.

12.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

16.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚҰБЫРДЫ БЕКІТУ АРМАТУРАСЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІН ТАЛДАУ

Бұл мақалада құбырлы бекіту арматурасының тұрақсыз деформацияланған күйін, атап айтқанда құбыр жүйелеріндегі әртүрлі орталардың ағындарын басқару үшін қолданылатын сыналы ысырмаларын зерттеуі көрсетілген. Жұмыста бекіту арматурасын пайдалану ерекишеліктері, клапанның жұмыс принципі, оны жасауға арналған материалдар, тозуға төзімділік пен сенімділікті өлшеу әдістері келтірілген. Сыналы ысырмаларының артықшылықтары мен кемшіліктері де сипатталған. Пайдалану жағдайларының әртүрлілігі, сенімділік пен беріктіктің жоғары қажеттілігі, сондай-ақ клапандардың құрылымдық айырмашылықтары нақты жұмыс жағдайлары үшін оңтайлы жабдықты таңдауды қиындатады. Жобалау және беріктігін есептеу процесінде нақты пайдалану параметрін – ағын жылдамдығы, тасымалданатын ортаның температурасы және сынаның

орналасуы сияқты – ескеру қажеттілігіне баса назар аударылады. Беткі қабатқа, қатты тозуға төзімді материалдарға, сондай-ақ тығыздағыш беттердің зақымдалуына төзімділікке баса назар аударылады. Зерттеудің эксперименттік бөлігі қорғаныш газдар ортасында Sv-10x17T балқытуды және балқытылған қабаттың механикалық қасиеттерін бақылауды қамтиды. Жүргізілген есептеулер барысында арматураның тозуға төзімділігін және кавитациялық әсерлерге төзімділігін арттыруда балқыманың тиімділігін растау нәтижелері алынды, бұл әсіресе агрессивті ортада пайдалану жағдайлары үшін маңызды.

Кілтті сөздер: құбыр арматурасы, сыналы ысырма, қаптау, тозуға төзімділік, модельдеу, кернеулі деформацияланған күй.

**Zh. Kassenov¹, *D. A. Iskakova², A. S. Yanushkin³,
A. A. Tkachuk⁴, D. T. Kubdymali⁵**

^{1,2,4,5}Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

³Chuvash State University, Chuvashia, Cheboksary

Received 12.11.24.

Received in revised form 12.11.24.

Accepted for publication 16.11.24.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PIPE SHUT-OFF VALVES

This article reflects the study of the unstable deformed state of pipe shut-off valves, in particular wedge valves, which are used to control the flow of various media in pipeline systems. The paper presents the features of the operation of shut-off valves, the principle of operation of the valve, materials for its manufacture, methods of measuring wear resistance and reliability. The advantages and disadvantages of wedge gate valves are also described. The variety of operating conditions, the high need for reliability and durability, as well as the design differences of the valves complicate the selection of optimal equipment for specific operating conditions. The emphasis is placed on the need to take into account real operational parameters – such as flow velocity, temperature of the transported medium and the position of the wedge – in the design and strength calculation process. The main attention is paid to the issues of surfacing, hard wear-resistant materials, as well as resistance to damage to sealing surfaces. The experimental part of the study includes the deposition of Sv-10X17T in a protective gas environment and observation of the mechanical properties of the deposited layer. In the course of the calculations, the results of confirming the effectiveness of surfacing in increasing the resistance of fittings to wear and resistance to cavitation, which is especially important for operating conditions in aggressive environments.

Keywords: pipeline fittings, wedge gate valve, surfacing, wear resistance, modeling, stress-strain state.

***Б. Ж. Кожазельдиев¹, Ә. Ж. Жанкелді²,
Р. Б. Муканов³, Д. Д. Каражанова⁴**

^{1,2,3,4}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9094-3015>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8174-4209>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9637-0513>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2146-7828>

*e-mail: bekmyrza.k@mail.ru

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБЧАТОЙ ПАРЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ САПР ПРОГРАММ

Система автоматизированного проектирования (САПР) используется в различных отраслях в процессах проектирования и разработок. Данная система позволяет упрощать процессы создания проектов, тем самым экономит время и ресурсы.

В данной статье показаны процессы проектирования и моделирования зубчатых колес для ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. Зубчатые пары представляют собой важные компоненты механических систем и выполняют ключевую функцию в работе различных механизмов. Проектирование и производство зубчатых пар, обеспечивающих передачу крутящего момента, лежат в основе машиностроительной отрасли. Геометрический расчет зубчатых пар может осуществляться с помощью программного обеспечения SolidWorks. Solidworks является программным комплексом САПР для автоматизации работ промышленного предприятия. Используется на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает проектирования изделий любой сложности и предназначения. В программе представляется метод для проектирования зубчатых колес, которое способно проектировать различные типы зубчатых колес на основе исходных геометрических параметров. Естественно, для процесса проектирования необходима компетентность пользователей в отношении теоремы о зубчатом колесе и технологии производства. Разработанные зубчатые пары можно применить в различных областях техники (роботы, рабочие машины, транспортные средства и т.д.).

Ключевые слова: зубчатая пара, проектирование, моделирование, САПР, SolidWorks.

Введение

Зубчатые передачи, изобретенные тысячи лет назад, служат основой для большинства механических систем. Эти передачи состоят из двух или более

зубчатых колес, которые взаимодействуют между собой, обеспечивая передачу движения и силы от двигателя к рабочему механизму.

Цилиндрические с прямозубым зацеплением – простейший и самый универсальный тип шестерни. Обеспечивают плавную и точную передачу вращения между параллельными валами. Данный тип зубчатой передачи используется для передачи силы ветра модульной ветроэнергетической установки (МВЭУ) на генератор (рисунок 1) [1–2].

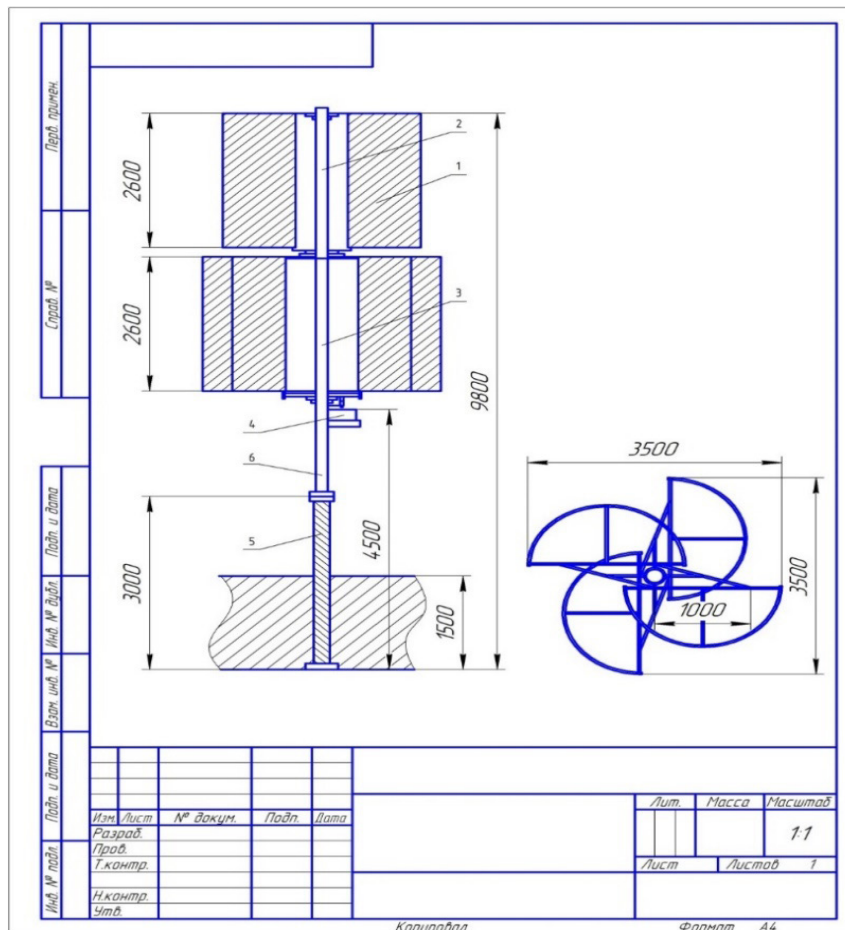


Рисунок 1 – Модульная ветроэнергетическая установка

МВЭУ состоит из пяти модулей:

- 1 Лопасть-полуцилиндр с диаметром 2200 мм, высота 2600 мм;
- 2 Неподвижная ось, длина 2650 мм;
- 3 Нижняя неподвижная ось. Длина 2650 мм;
- 4 Труба для крепления генератора;
- 5 Труба для крепления в фундамент.

Для данной установки выбран тихоходный 3 кВт генератор с оборотами 400 об/мин. Материал шестерни – сталь 45. Передаточное число $u = 10$, то есть 10:1. частота вращения шестерни $n_1 = 40 \text{ мин}^{-1}$, а частота вращения колеса $n_2 = 400 \text{ мин}^{-1}$.

Срок службы передачи при трехсменной работе 3 года. Передача неревверсивная, нагрузка постоянная.

Целью данного исследования является определение геометрических параметров зубчатой пары и быстрое моделирование компьютерным способом для последующего анализа контакта зубьев (ТСА).

Материалы и методы

Расчет конструкции зубчатого колеса.

Используем необходимую теорему о зубчатых колесах, а также математические и производственные навыки, чтобы спроектировать правильное соединение зубчатых пар [3–5]. В настоящее время в мире существует множество стандартов расчета и проектирования зубчатых передач [6–8].

Перед проектированием зубчатой парой делаем проверочный расчет передачи на контактную прочность. В дальнейшем можно проверить зубчатую пару на прочность, динамические нагрузки, долговечность в САЕ-системах. Такие задачи можно выполнить в модулях SolidWorks и Ansys [9-10].

При создании зубчатых колес, которые имеют стандартную геометрию, целесообразно создание математического расчета для облегчения процесса расчета и определения профиля зубчатого колеса (таблица 1).

Таблица 1 – Уравнения для расчета геометрических параметров.

Параметр зацепления	Геометрические зависимости
Межосевое расстояние	$A = m \cdot (Z_1 + Z_2) / 2$
Передаточное число	$i = Z_2 / Z_1$
Высота зуба	$h = 2,25 \cdot m$
Радиальный зазор	$C = 0,25 \cdot m$
Делительные диаметры	$d_1, d_2, (D_1, D_2)$
Начальные диаметры	dw_1, dw_2
Диаметр окружности вершин зубьев	$de = d + 2 \cdot m (De_1, De_2)$
Диаметр окружности впадин	$di = d - 2 \cdot m (Di_1, Di_2)$

Проектирование и моделирование зубчатых колес производились в программе SolidWorks.

Разработка программного обеспечения открыла большой выбор в области проектирования зубов, быстрого и точного САД-моделирования. Зубчатые пары можно исследовать в любом программном обеспечении САД/САЕ, в таких как: САТІА, Inventor и SolidWorks. Оптимизация топологии зубчатого колеса выполняется методом конечных элементов.

В данном примере используется программное обеспечение SolidWorks. С учетом рассчитанных геометрических (таблица 1) параметров могут быть построены модели САПР. Сделанные расчеты вбиваем в «Уравнения, глобальные переменные и размеры» в программе (рисунок 2). В дальнейшем эти уравнения автоматизируют процесс проектирования.

Уравнения, глобальные переменные и размеры

Отфильтровать все полз По умолчанию

Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки
Глобальные переменные			
"m"	= 4	4	
"z"	= 150	150	
"b"	= 85	85	
"a"	= 20 * pi / 180	0.349066	
"D"	= "m" * "z"	600	
"Db"	= "D" * cos ("a")	563.816	
"Da"	= "D" + "m" * 2 * ("X" + 1)	608	
"Df"	= "D" - "m" * 2 * (1.25 - "X")	590	
"S"	= "m" * pi / 2 + 2 * "X" * tan ("a")	6.28319	
"X"	= 0	0	
<i>Добавить глобальную переменную</i>			
Элементы			
"Скругление1"	= IIF ("Df" > "Db", "suppressed", "unsuppressed")	"suppressed"	
"Круговой массив1"	= IIF ("Df" > "Db", "suppressed", "unsuppressed")	"suppressed"	
"Скругление2"	= IIF ("Db" > "Df", "suppressed", "unsuppressed")	"unsuppressed"	
"Круговой массив2"	= IIF ("Db" > "Df", "suppressed", "unsuppressed")	"unsuppressed"	
<i>Добавить погашение элемента</i>			
Уравнения			
"D1@Эскиз1"	= "Df"	590.00мм	
"D2@Эскиз1"	= "Db"	563.82мм	
"D3@Эскиз1"	= "D"	600.00мм	
"D4@Эскиз1"	= "Da"	608.00мм	
"D1@Бобышка-Вытянуть1"	= "b"	85.00мм	
"D1@Бобышка-Вытянуть2"	= "b"	85.00мм	
"D1@Бобышка-Вытянуть3"	= "b"	85.00мм	
"D1@Скругление1"	= "m" * 0.2	0.80мм	
"D1@Круговой массив1"	= "z"	150	
"D1@Скругление2"	= "m" * 0.2	0.80мм	
"D1@Круговой массив2"	= "z"	150	
"D5@Эскиз1"	= "S"	6.28мм	
"D1@Бобышка-Вытянуть4"	= "b"	85.00мм	
"D1@Бобышка-Вытянуть5"	= "b"	85.00мм	
"D1@Хорда зуба"	= "Db"	563.82мм	
"D2@Хорда зуба"	= "D"	600.00мм	
<i>Добавить уравнение</i>			

Перестраивать автоматически Угловые единицы: Автоматический порядок решения
 Связь с внешним файлом:

Рисунок 2 – Уравнения, глобальные переменные и размеры

Полученные результаты можно увидеть на рисуне 3.

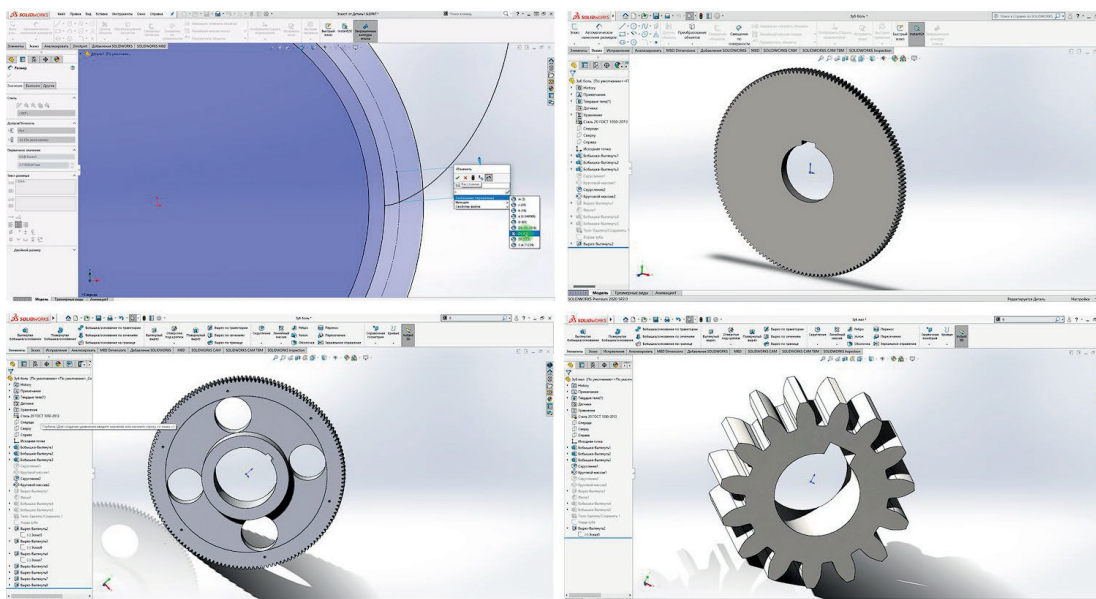


Рисунок 3 – CAD-модель в программе SolidWorks

По предложенным расчетам зубчатой пары реализовано изготовление (рисунок 6).

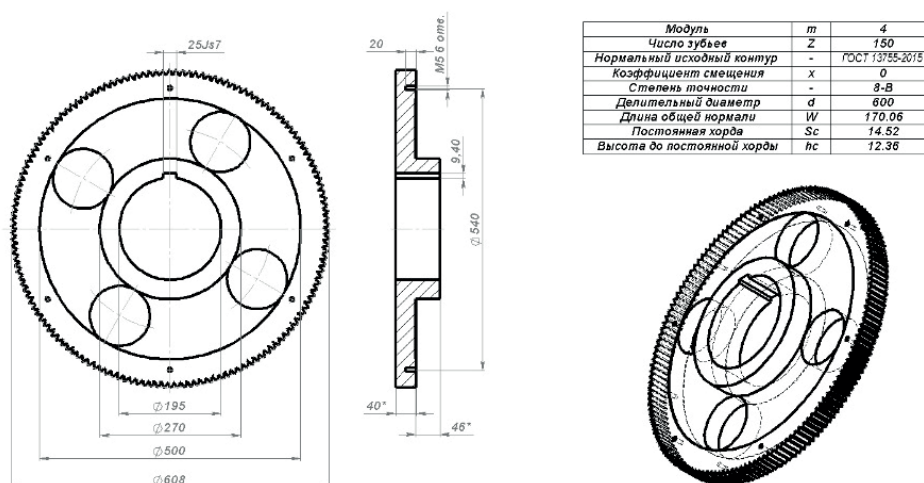


Рисунок 6 – Производственный чертёж

Результаты и обсуждение

В данной работе расчет и проектирование зубчатой пары ветроэнергетической установки представлен в поэтапном виде:

- 1-этап. Расчет конструкции зубчатого колеса;
- 2-этап. Проверочный расчет передачи на контактную прочность.

3-этап. Проектирование и моделирование зубчатых колес в программе SolidWorks;

Результаты данных этапов могут быть использованы для дальнейшего расчета на прочность, динамические нагрузки и долговечность. Также, полученные 3D-модели можно использовать в САМ-системах, отправив проект на изготовление на станках с ЧПУ для получения опытных образцов.

Информация о финансировании

Исследование проведено в рамках выполнения грантовой темы, финансируемой Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан АР13068313 «Разработка новой конструкции модульной ветроэнергетической установки с неподвижной вертикальной осью».

Выводы

В этой публикации показаны процессы проектирования и моделирования зубчатых колес для ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. С помощью данной методики можно разрабатывать зубчатые пары которые можно применить в различных областях промышленности. Данная методика не требует от проектировщика высокой квалификации в данной области. Проверка биения и анализ соединения зубов могут быть выполнены на сохраненных САД-моделях в программе SolidWorks. Эти модели можно использовать для различных исследований контакта зубьев.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Аскаров, Е. С.** Ветровая энергетическая установка с неподвижной осью с мощностью более 10 кВт // Наука и техника Казахстана. – 2019. № 1. – С. 69–73. ISSN 1680-9165.

2 **Аскаров, Е. С.** Инновационный патент Казахстана № 29297 «Ветровая энергоустановка с составной вертикальной осью вращения ветроколеса», Бюл. № 12 от 15.12.2014.

3 **Матюшин, Е. Г., Луцко, А. Н., Телепнев, М. Д.** Расчет закрытой цилиндрической зубчатой передачи: Учебное пособие. – Санкт-Петербург. – 2017.

4 Gear Calculator/Generator. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cgtk.co.uk/metalwork/calculators/gears>.

5 Spur Gear Generator. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://evolventdesign.com/pages/spur-gear-generator>.

6 ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.

7 ISO 1328–1:1995, Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.

8 ISO 1328–2:1997, Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.

9 **Loc, N. H., Anh, L. T.** Contact stress analysis and optimization of spur gears // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1109/1/012004>.

10 **Muhammad, A., Haruna, S. I.** Contact stress analysis of a spur gear using Lewis and Hertz theory. Applied Research and Smart Technology (ARSTech). – 2022. 2(2), P. 41–46.

REFERENCES

1 **Askarov, E. S.** Vetrovaya e`nergeticheskaya ustanovka s nepodvizhnoj os`yu s moshhnost`yu bolee 10 kVt [Fixed-axis wind power plant with a capacity of more than 10 kW] // Science and Technology of Kazakhstan. – 2019. – № 1. – P. 69–73. ISSN 1680–9165.

2 **Askarov, E. S.** Vetrovaya e`nergoustanovka s sostavnoj vertikal`noj os`yu vrashheniya vetrokolesa [Innovative patent of Kazakhstan № 29297 «Wind power plant with a composite vertical axis of rotation of the wind wheel»], Bulletin № 12 dated 15.12.2014.

3 **Matyushin, E. G., Lutsko, A. N., Telepnev, M. D.** Raschet zakry`toj cilindricheskoj zubchatoj peredachi [Calculation of a closed cylindrical gear transmission]: Tutorial. – Saint Petersburg. – 2017.

4 Gear Calculator/Generator. – [Electronic resource]. – URL: <https://www.cgk.co.uk/metalwork/calculators/gears>.

5 Spur Gear Generator. – [Electronic resource]. – URL: <https://evolventdesign.com/pages/spur-gear-generator>.

6 GOST 1643-81. Osnovny`e normy` vzaimozamenyaemosti. Peredachi zubchaty`e cilindricheskie. Dopuski [Basic norms of interchangeability. Cylindrical gear transmissions. Tolerances].

7 ISO 1328–1:1995, Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.

8 ISO 1328–2:1997, Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.

9 **Loc, N. H., Anh, L. T.** Contact stress analysis and optimization of spur gears // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1109/1/012004.

10 **Muhammad, A., Haruna, S. I.** Contact stress analysis of a spur gear using Lewis and Hertz theory. Applied Research and Smart Technology (ARSTech). – 2022. 2(2), P. 41–46.

Поступило в редакцию 09.11.24.

Поступило с исправлениями 10.11.24.

Принято в печать 19.11.2024.

***Б. Ж. Қожасельдиев, Ә. Ж. Жанкелді,**

Р. Б. Муканов, Д. Д. Қаражанова

Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

09.11.24 ж. баспаға түсті.

10.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

19.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЖЖ БАҒДАРЛАМАЛАРЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫҢ ТІСТІ ЖҰБЫНЫҢ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУ ЖӘНЕ ЖОБАЛАУ

Автоматтандырылған жобалау жүйесі (АЖЖ) әртүрлі салаларда жобалау және әзірлеу процестерінде қолданылады. Бұл жүйе жобаларды құру процестерін жеңілдетуге, сол арқылы уақыт пен ресурстарды үнемдеуге мүмкіндік береді.

Бұл мақала тік осьті жел энергетикалық қондырғыға арналған тісті доңғалақтардың жобасы мен модельдеуді көрсетеді. Тісті жұптар механикалық жүйелердің маңызды құрамдас бөліктері болып табылады және әртүрлі механизмдердің жұмысында негізгі функцияны орындайды. Айналдырушы моментті беретін тісті жұптарды құрастыру және өндіру машина жасау саласының негізі болып табылады. Тісті жұптардың геометриялық есебін SolidWorks бағдарламалық құралының көмегімен жүзеге асыруға болады. Solidworks - бұл өнеркәсіптік кәсіпорынның жұмысын автоматтандыруға арналған АЖЖ бағдарламалық пакеті. Өндірісті жобалау және технологиялық дайындау кезеңдерінде қолданылады. Кез келген күрделілік пен мақсаттағы бұйымдардың жобасын қамтамасыз етеді. Бағдарлама бастапқы геометриялық параметрлер негізінде берілістердің әртүрлі түрлерін жобалауға қабілетті берілістерді жобалау әдісін ұсынады. Әрине, жобалау процесі пайдаланушының беріліс теоремасы мен өндіріс технологиясына қатысты құзыреттілігін талап етеді. Жобаланған тісті жұптар технологияның әртүрлі салаларында (роботтар, жұмыс машиналары, көліктер және т.б.) қолдануға болады.

Кілтті сөздер: тісті жұп, жобалау, модельдеу, АЖЖ, SolidWorks.

**B. Zh. Kozhageldiyev, A. Zh. Zhankeldi,*

R. B. Mukanov, D. D. Karazhanova

Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 09.11.24.

Received in revised form 10.11.24.

Accepted for publication 19.11.24.

CALCULATION OF GEOMETRIC PARAMETERS AND DESIGN OF A GEAR PAIR OF A WIND TURBINE USING CAD PROGRAMS

Computer-aided design (CAD) systems are used in various industries in the design and development processes. This system simplifies the design process, thereby saving time and resources.

This article shows the design and modeling processes of gears for a vertical-axis wind turbine. Gear pairs are important components of mechanical systems and perform a key function in the operation of various mechanisms. The design and production of gear pairs that provide torque transmission are the basis of the mechanical engineering industry. Geometric calculation of gear pairs can be carried out using SolidWorks software. Solidworks is a CAD software package for automating the work of an industrial enterprise. It is used at the stages of design and technological preparation of production. Provides design of products of any complexity and purpose. The program presents a method for designing gears, which is capable of designing various types of gears based on the original geometric parameters. Naturally, the design process requires user competence in the gear theorem and manufacturing technology. The developed gear pairs can be used in various fields of technology (robots, working machines, vehicles, etc.).

Keywords: gear pair, design, modeling, CAD, SolidWorks.

Y. Nugman¹, Zh. Turgunov², R. Kaiyrov³, *A. Mustafa⁴, A. Kawalek⁵

^{1,2,4}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty,

^{1,2,4}«RnD Center» LLP, Republic of Kazakhstan, Almaty,

³Karaganda Buketov University, Republic of Kazakhstan, Karaganda,

⁵Czestochowa University Of Technology, Poland, Czestochowa

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1828-397X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0899-4981>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>

*e-mail: mustafa_azamat@mail.ru

DEVELOPMENT OF A METAL 3D PRINTER USING A 3-UPU PARALLEL MANIPULATOR

This paper explores the potential application of a 3-UPU manipulator as a design for a metal 3D printer. To determine the working area of the 3-UPU manipulator, its inverse kinematics were investigated. Using the Denavit-Hartenberg method, the required lengths of the manipulator's prismatic pairs were analytically calculated based on the coordinate system transformation matrices. The obtained results were verified by numerical methods in MATLAB program and the correctness of analytical solutions was confirmed. The study showed that the working area of the 3-UPU manipulator is 800x800x600 mm, which is large enough for metal 3D printers. This work area gives you the ability to print from small parts to large parts as well as body parts. The precise positioning and dexterity of the 3-point manipulator ensures sufficient precision in part production. This working area makes it possible to print from small parts to large parts as well as body parts. The positioning accuracy and dexterity of the 3UPU manipulator provides sufficient accuracy in part production. This accuracy of part fabrication reduces the post-processing time of parts by machining, resulting in less material consumption for chips and wear of cutting tools.

This research work can provide a scientific basis to enable the 3-UPU arm to be used in metal 3D printers. Future research following this work is planned to explore issues such as improving the dynamic model of the manipulator and increasing its efficiency by optimizing control algorithms.

Keywords: 3-UPU manipulator, additive manufacturing, working area, metal 3D printer, inverse kinematic.

Introduction

In recent decades, additive manufacturing has revolutionized production and engineering processes by enabling the fabrication of complex geometries with minimal time and cost requirements [1–3]. Despite its numerous advantages, traditional 3D

printers are limited by their constrained workspace and accuracy, making them less suitable for tasks that demand higher precision and larger build volumes [4–6].

Parallel manipulators, particularly the 3UPU configuration, have emerged as promising solutions to address these challenges by offering superior accuracy and an extended workspace [7–8]. Investigating the kinematic and dynamic properties of 3UPU manipulators is essential for their effective integration into practical manufacturing applications [9–11]. Accurate modeling of the manipulator’s workspace and adapting it for 3D printing have become significant areas of interest in current research [12].

Additionally, the application of metal-based additive manufacturing, which demands high precision and stability, further underscores the necessity of employing advanced robotic systems like the 3UPU manipulator [13–14]. This paper explores the use of the 3UPU manipulator to drive a 3D printer’s print head along a predefined trajectory. The inverse kinematics of the manipulator is calculated to evaluate its workspace and adaptability to additive manufacturing tasks. These findings aim to contribute to the advancement of 3D printing technology, particularly in the context of high-precision and large-scale applications [15].

Materials and methods

Inverse kinematics of a 3-UPU parallel manipulator

A parallel manipulator (PM) 3-UPU (where U stands for universal and P for prismatic kinematic pairs) consists of a triangular fixed base $A_1A_2A_3$ (Fig. 1), a moving platform, and three closed kinematic chains (legs) of the UPU type, which connect the moving platform to the fixed base. The absolute coordinate system $O_0X_0Y_0Z_0$ is attached to the center of the three universal joints $A_1A_2A_3$, located on the fixed base, while the local coordinate system PUVW is fixed at the center of the universal joints connecting the legs to the moving platform and moves along with it.

As stated in [16], this parallel manipulator (PM) has three translational degrees of freedom, meaning that the moving platform of the manipulator will move parallel to the base along the three axes of the absolute coordinate system $O_0X_0Y_0Z_0$.

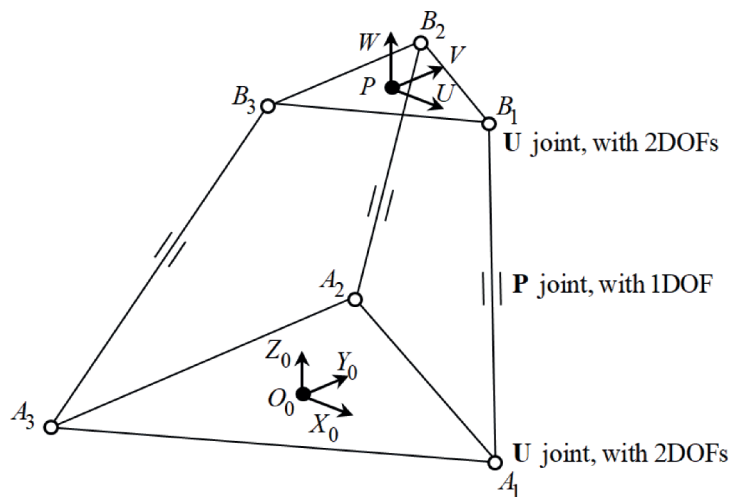


Figure 1 – Kinematic diagram of the 3-UPU PM

To solve the inverse kinematics problem of the PM, the position of the moving platform in space is given, after which the positions of the active prismatic kinematic pairs S_i ($i=1,2,3$) are computed. The closure equations of the vector loops for this manipulator are defined as follows

$$\mathbf{O}_0\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{h}_i = \mathbf{O}_0\mathbf{A}_{1,i} + \mathbf{B}_{1,i}. \tag{1}$$

Fig.2 shows the vectors that are included in equation (1) for one leg of the PM, with the others being defined in a similar manner.

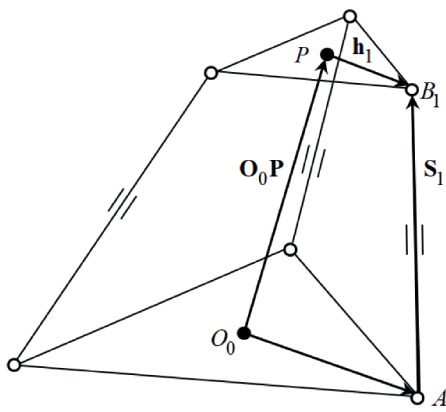


Figure 2 – Closure equations of the vector loops for the 3-UPU PM

In solving the inverse kinematics problem, the left-hand side of equation (1) is given, while the right-hand side is determined by constructing homogeneous transformation matrices of Denavit-Hartenberg [17], which include all the constant and variable parameters of the PM. Both sides of the vector equation (1) define the coordinates of the centers of the universal joints attached to the moving platform.

The left-hand side of the vector equations (1) is defined through the relationship between the absolute $O_0X_0Y_0Z_0$ and local $PUVW$ coordinate systems as follows

$$\begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Y_{B_i} \\ Z_{B_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_P \\ 0 & 1 & 0 & Y_P \\ 0 & 0 & 1 & Z_P \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{B_i} \\ V_{B_i} \\ W_{B_i} \\ 1 \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, \tag{2}$$

where $U_{B_i}, V_{B_i}, W_{B_i}$ – the coordinates of the points B_i in the local coordinate system $PUVW$.

Are determined as follows

$$\begin{bmatrix} U_{B_i} \\ V_{B_i} \\ W_{B_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cdot \cos(\zeta_i) \\ r_b \cdot \sin(\zeta_i) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \zeta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ. \tag{3}$$

To determine the right-hand side of the vector equation (1), we construct the following homogeneous transformation matrices from the absolute coordinate system $O_0X_0Y_0Z_0$ to the local coordinate system $O_{4,i}X_{4,i}Y_{4,i}Z_{4,i}$:

1) $O_0X_0Y_0Z_0 \rightarrow O_1X_1Y_1Z_1$

$$\mathbf{T}_{01,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i & r_A \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & 0 & -\cos \theta_i & r_A \sin \theta_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, i=1,2,3, \theta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ. \quad (4)$$

2) $O_1X_1Y_1Z_1 \rightarrow O_2X_2Y_2Z_2$

$$\mathbf{T}_{02,i} = \mathbf{T}_{01,i} \mathbf{T}_{12,i}, \quad (5)$$

where

$$\mathbf{T}_{12,i} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{1,i} & -\sin \varphi_{1,i} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{1,i} & \cos \varphi_{1,i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, i=1,2,3. \quad (6)$$

3) $O_2X_2Y_2Z_2 \rightarrow O_3X_3Y_3Z_3$

$$\mathbf{T}_{03,i} = \mathbf{T}_{02,i} \mathbf{T}_{23,i}, \quad (7)$$

where

$$\mathbf{T}_{23,i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3) $O_3X_3Y_3Z_3 \rightarrow O_4X_4Y_4Z_4$

$$\mathbf{T}_{04,i} = \mathbf{T}_{03,i} \mathbf{T}_{34,i}, \quad (9)$$

where

$$\mathbf{T}_{34,i} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{2,i} & -\sin \varphi_{2,i} & 0 & S_1 \cos \varphi_{2,i} \\ \sin \varphi_{2,i} & \cos \varphi_{2,i} & 0 & S_1 \sin \varphi_{2,i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, i=1,2,3. \quad (10)$$

From the matrix $\mathbf{T}_{34,i}$, the coordinates of the universal joints are determined as follows

$$\begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Y_{B_i} \\ Z_{B_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{T}_{34,i}. \quad (11)$$

From equation (11), taking into account equations (2), the coordinates of the center of the moving platform can be determined as follows

$$\begin{cases} X_P = r \cdot \cos\theta_i + S_i \cdot \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_{2i} - S_i \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\varphi_{2i} \cdot \sin\varphi_{1i}, \\ Y_P = r \cdot \sin\theta_i - S_i \cdot \cos\theta_i \cdot \sin\varphi_{2i} - S_i \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_{2i} \cdot \sin\varphi_{1i}, \\ Z_P = S_i \cdot \cos\varphi_{1i} \cdot \cos\varphi_{2i}, \end{cases} \quad (12)$$

where $r = r_A - r_B$, r_A, r_B the distances from the centers to the vertices of the base and the movable platform, which have a triangular shape, S_i the input parameters of the stroke of the linear actuators, $\varphi_{1i}, \varphi_{2i}$ the angles of the passive universal joints attached to the base, which determine the orientation of the three legs of the PM.

Numerical examples of solving the inverse kinematics problem

The following constant parameters are given: $r_a = 400$, $r_b = 200$, $X_P = 100$, $Y_P = 100$, $Z_P = 500$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$, $\theta_3 = 240^\circ$. A program was developed that automatically selects the solutions to the equations (16), (17), and (18) for the correct determination of the positions of the PM.

Results and discussion

By adding the first and second equations of the system (12), after multiplying them by $\cos\theta_i$ and $\sin\theta_i$, respectively, we obtain

$$X_P \cdot \sin\theta_i - Y_P \cdot \cos\theta_i = S_i \cdot \sin\varphi_{2i} \quad (13)$$

The system of equations (12) is rewritten in the following form

$$\begin{cases} X_P - r \cdot \cos\theta_i - S_i \cdot \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_{2i} = -S_i \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\varphi_{2i} \cdot \sin\varphi_{1i}, \\ Y_P - r \cdot \sin\theta_i + S_i \cdot \cos\theta_i \cdot \sin\varphi_{2i} = -S_i \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_{2i} \cdot \sin\varphi_{1i}, \\ Z_P = S_i \cdot \cos\varphi_{1i} \cdot \cos\varphi_{2i}. \end{cases} \quad (14)$$

From the sum of the squares of the three equations of the system (14), taking into account the equations (13), we obtain

$$\begin{aligned} S_i^2 \cdot (2 \cdot \sin^2\varphi_{2i} - 1) - 2 \cdot (X_P \cdot \sin\theta_i - Y_P \cdot \cos\theta_i)^2 + \\ r^2 + X_P^2 + Y_P^2 + Z_P^2 - 2 \cdot r \cdot (X_P \cdot \sin\theta_i - Y_P \cdot \cos\theta_i) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

From the equations (13), we determine $\sin\varphi_{2i}$, and substituting this into the equations (15), we obtain a single equation with one unknown S_i . After some straightforward transformations, we obtain the following solutions

$$S_i = \pm \sqrt{r^2 + X_P^2 + Y_P^2 + Z_P^2 - 2 \cdot r \cdot (X_P \cdot \cos\theta_i - Y_P \cdot \sin\theta_i)}. \quad (16)$$

In this problem, the movable platform is positioned in the positive direction of the Z_0 -axis, so only positive values of S_i will be used for the calculations.

Solving the equations (13) for the variables φ_{2i} , we obtain the following two solutions

$$\varphi_{2i(1)} = \arcsin\left(\frac{X_P \cdot \sin\theta_i - Y_P \cdot \cos\theta_i}{S_i}\right), \varphi_{2i(2)} = \pi - \arcsin\left(\frac{X_P \cdot \sin\theta_i - Y_P \cdot \cos\theta_i}{S_i}\right). \quad (17)$$

Solving the third equation of the system (14) for the variable φ_{1i} , we obtain the following solutions

$$\varphi_{1i(1)} = +\arccos\left(\frac{Z_P}{S_i \cdot \cos\varphi_{2i}}\right), \varphi_{1i(2)} = -\arccos\left(\frac{Z_P}{S_i \cdot \cos\varphi_{2i}}\right). \quad (18)$$

In solving the inverse kinematics problem of the parallel robot, the position is specified, i.e., the coordinates of the center of the moving platform X_P, Y_P, Z_P , while the coordinates of the passive universal joints $X_{d,i}, Y_{d,i}, Z_{d,i}$ attached to the movable platform are determined by the equations (2). Based on the equations (16), (17), and (18), the variable parameters $\varphi_{1i}, \varphi_{2i}, S_i$ are determined, as well as the positions of all the moving links. This is how the workspace of a metal 3D printer is defined.

Numerical examples of solving the inverse kinematics problem

The results of numerical methods of problem solving show the reliability of the data obtained analytically. Fig. 3 shows the assembled manipulator based on the solution of the inverse kinematics problem.

Based on the inverse kinematics problem, the workspace of the PM was determined. The values of X_P, Y_P were varied from -400 to 400 with a step of 50, and Z_P was varied from 0 to 600 with a step of 50. Additionally, constraints were set on the minimum and maximum values of the input parameters S_i ($100 \leq S_i \leq 500$)

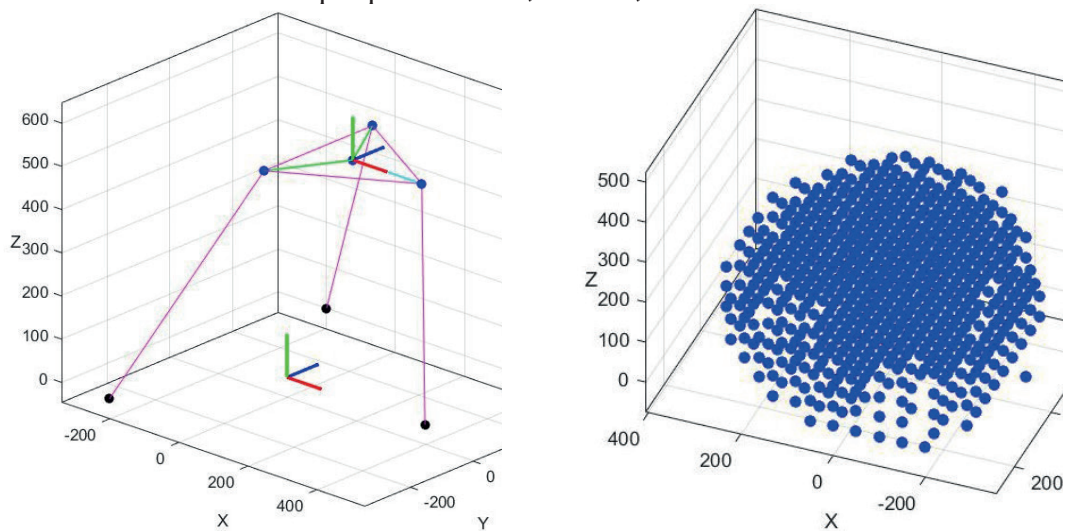


Figure 3 – Solution of the inverse kinematics problem and the workspace

Thus the working area of the 3D printer was defined as 800x800x600 mm. Which is large enough for 3D printers printing metal materials. And also found the geometric parameters of the 3upu manipulator, which is the design of the metal 3D printer.

Financing information

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19679253 – Research and design of a multifunctional mobile metal 3D printer)

Conclusions

This study investigated the feasibility of using the 3-UPU manipulator as a design of a metal 3D printer. Specifically, the potential of the 3-UPU manipulator's movable platform, which has three degrees of freedom, to guide the print head along a preprogrammed digital trajectory for metal additive manufacturing was explored.

Since one of the most critical characteristics of a 3D printer is its workspace, this study focused on determining the workspace of the 3-UPU manipulator.

To achieve this, the inverse kinematics problem of the manipulator was solved. The manipulator's motion characteristics were analyzed using an analytical approach based on vector loop equations. The Denavit-Hartenberg method was employed to calculate the required lengths of the manipulator's prismatic joints (P) through transformation matrices between coordinate systems. This approach enabled precise determination of the manipulator's geometric parameters.

The analytical results were verified using numerical methods in MATLAB. The numerical validation confirmed the accuracy of the analytical calculations. Based on the geometric parameters of the manipulator, its workspace was determined to be 800x800x600 mm. This workspace is significantly large for metal 3D printers and allows for the production of a wide range of parts.

The findings of this study demonstrate the suitability of the 3-UPU manipulator for use in 3D printing applications, particularly for metal additive manufacturing. Future research should focus on improving the dynamic model of the manipulator and optimizing its control algorithms to further enhance its performance and reliability in industrial applications.

REFERENCES

- 1 **Bourell, D. L., Leu, M. C., & Rosen, D. W.** Additive manufacturing: challenges and opportunities // *Annual Review of Materials Research*. – 2017. – Vol. 47, № 1. – P. 365–388. – <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-123928>.
- 2 **Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B.** Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. – 2nd ed. – New York: Springer, 2021. – 498 p. – <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15596-3>.
- 3 **Guo, N., & Leu, M. C.** Additive manufacturing: technology, applications and research needs // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 8, № 3. – P. 215–243. – <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>.
- 4 **Müller, B., et al.** Precision engineering in additive manufacturing // *CIRP Annals*. – 2017. – Vol. 66, № 1. – P. 137–140. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.008>.
- 5 **Hraiech, S. E., et al.** Multi-objective design optimization of the 3-UPU manipulator // *Robotica*. – 2019. – Vol. 37, № 9. – P. 1623–1638. – <https://doi.org/10.1017/S0263574719001292>.
- 6 **Bhutani, G., & Dwarakanath, T. A.** High-precision parallel mechanisms: practical feasibility // *Robotica*. – 2013. – Vol. 31, № 8. – P. 1293–1304. – <https://doi.org/10.1017/S0263574713000696>.
- 7 **Tsai, L.-W.** Mechanics of serial and parallel manipulators. – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 320 p.
- 8 **Taghirad, H. D.** Parallel robots: mechanics and control. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 556 p. – <https://doi.org/10.1201/b16096>.

9 **Hu, B., et al.** Inverse dynamic modeling of 3UPU parallel manipulators // Intelligent Robotics and Applications: Proceedings of the 2nd International Conference. – Berlin: Springer, 2009. – P. 518–525. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-10817-4_58.

10 **Kalani, H., et al.** Dynamic modeling of Gough–Stewart platforms // Nonlinear Dynamics. – 2015. – Vol. 81, № 1–2. – P. 559–574. – <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2489-z>.

11 **Ren, Y., et al.** Optimization of steel structures using multi-objective techniques // Nonlinear Engineering. – 2022. – Vol. 11, № 1. – P. 21–37. – <https://doi.org/10.1515/nleng-2021-0030>.

12 **Staicu, S.** Dynamics of translational 3-UPC manipulator // U.P.B. Scientific Bulletin, Series D. – 2015. – Vol. 77, № 2. – P. 81–92.

13 **Berman, B.** 3D printing: the new industrial revolution // Business Horizons. – 2012. – Vol. 55, № 2. – P. 155–162. – <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.

14 **Thompson, M. K., et al.** Design for Additive Manufacturing // CIRP Annals. – 2016. – Vol. 65, № 2. – P. 737–760. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.

15 **He, L., et al.** Optimization algorithms in manufacturing // Security and Communication Networks. – 2022. – P. 1–12. – <https://doi.org/10.1155/2022/9348711>.

16 **Tsai, L.-W.** Kinematics of A Three-Dof Platform with Three Extensible Limbs // Recent Advances in Robot Kinematics – 1996. – P. 401–410. – https://doi.org/10.1007/978-94-009-1718-7_40.

17 **Fu K. S., Gonzales R. C., C. S. G. Lee.** Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence // New York: Mc Graw - Hill Book Company – 1987 – P. 580.

Received 19.11.24.

Received in revised form 24.11.24.

Accepted for publication 25.11.24.

Е. Нұрман¹, Ж. Турғунов², Р. Кайыров³, *А. Мустафа⁴, А. Кавалиук⁵

^{1,2,4}Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

^{1,2,4}«RnD Center» ЖШС-і, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Букетов университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

⁵Ченстохова технологиялық университеті, Польша, Ченстохова қ.

19.11.24 ж. баспаға түсті.

24.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

25.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

3-УПУ ПАРАЛЛЕЛЬ МАНИПУЛЯТОРЫН МЕТАЛЛ 3D ПРИНТЕРІ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУДЫ ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада 3D металл принтерінің конструкциясы ретінде 3UPU параллель манипуляторын қолдану мүмкіндігі қарастырылады. 3UPU манипуляторының жұмыс аймағын анықтау үшін оның кері кинематикасы зерттелді. Денавит-Хартенберг әдісін қолдана отырып, координаттар жүйесін түрлендіру матрицалары негізінде манипулятордың призмалық

жұптарының қажетті ұзындықтары аналитикалық түрде есептеледі. Алынған нәтижелер MATLAB бағдарламасында сандық әдістермен тексерілді және аналитикалық шешімдердің дұрыстығы расталды. Зерттеу көрсеткендей, 3UPU манипуляторының жұмыс аймағы 800x800x600 мм, бұл металл 3D принтерлер үшін айтарлықтай үлкен болып табылады. Мұндай жұмыс аймағы шағын бөлшектерден үлкен бөлшектерге, сондай-ақ корпус бөлшектеріне дейін басып шығаруға мүмкіндік береді. 3UPU манипуляторының позициялану дәлдігі мен ептілігі бөлшектерді жасаудың жеткілікті дәлдігін қамтамасыз етеді. Бұндай дәлдікпен бөлшектерді өндіру бөлшектерді 3D баспадан кейінгі өңдеу уақытын азайтады, бұл кесу құралдарының тозуы мен жаңқаға кететін материалдар шығынын азайтады.

Бұл зерттеу жұмысы 3-UPU манипуляторын металл 3D принтерлерде қолдануға мүмкіндік беретін ғылыми негізді қамтамасыз ете алады. Бұл жұмыстан кейінгі болашақ зерттеулерде манипулятордың динамикалық моделін жетілдіру және басқару алгоритмдерін оңтайландыру арқылы оның тиімділігін арттыру секілді мәселелер зерттеледі деп жоспарлануда.

Кілтті сөздер: 3UPU манипулятор, аддитивті өндіріс, жұмыс аймағы, металл 3D принтері, кері кинематика.

Е. Нугман¹, Ж. Тургунов², Р. Кайыров³, *А. Мустафа⁴, А. Кавалюк⁵

^{1,2,4}Сатбаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы

^{1,2,4}ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы

³Букетов университет, Республика Казахстан, г. Караганда

⁵Ченстоховский технологический университет, Польша, Ченстохова

Поступило в редакцию 19.11.24.

Поступило с исправлениями 24.11.24.

Принято в печать 25.11.2024.

РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО 3D-ПРИНТЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА 3-UPU

В данной статье рассматривается возможность применения манипулятора 3UPU в качестве конструкции для металлического 3D-принтера. Для определения рабочей зоны манипулятора 3UPU была исследована его обратная кинематика. С помощью метода Денавита-Хартенберга на основе матриц преобразования системы координат аналитически рассчитаны необходимые длины призматических пар манипулятора. Полученные результаты были проверены численными методами в программе MATLAB и подтверждена корректность аналитических решений. Исследование показало, что рабочая зона манипулятора 3UPU составляет 800x800x600 мм, что достаточно большой для металлических 3D-принтеров. Такая рабочая зона дает возможность печатать от маленьких деталей до больших деталей, а также корпусных деталей. Точность позиционирования и ловкость 3UPU манипулятора обеспечивает достаточную точность изготовления деталей. Такая точность изготовления деталей уменьшает время постобработки

деталей механической обработкой, что приводит уменьшению расход материалов на стружку и износ режущих инструментов.

Эта исследовательская работа может обеспечить научную основу, позволяющую использовать манипулятор 3-UPU в металлических 3D-принтерах. Планируется, что в будущих исследованиях после этой работы будут изучены такие вопросы, как совершенствование динамической модели манипулятора и повышение его эффективности за счет оптимизации алгоритмов управления.

Ключевые слова: 3UPU манипулятор, аддитивное производство, рабочая зона, металлический 3D-принтер, обратная кинематика.

**B. K. Smailova¹, *T. M. Buzauova², I. A. Bartenev³,
D. A. Sarbayev⁴, J. Škamat⁵**

^{1,2,3,4}Karaganda Technical University named after Abulkas Saginov,

Karaganda, Kazakhstan

⁵Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4506-6815>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7219-6274>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4516-0699>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8014-6823>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4441-6839>

*e-mail: toty_77@mail.ru

PLANNING AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTROSLAG SURFACING MODE ON THE DEPTH OF PENETRATION OF THE WELDED TEETH

The article focuses on the results of a study of the effect of electroslag surfacing modes on the penetration depth of restored teeth, conducted on the basis of a full factorial experiment (FFE) type 2². The welding current and the voltage on the slag bath were selected as factors. Each experiment was repeated three times, and the results were analyzed to build a regression model that takes into account all interactions of factors. The article describes in detail the process of encoding variable factors, constructing a planning matrix, calculating the coefficients of the regression equation and checking them for significance using the Student's criterion. The adequacy of the experiment was confirmed by calculations using the Fisher criterion ($F_{\text{calculated}} < F_{\text{table}}$). According to the results of the experiment, it was found that the stress on the slag bath has the most significant effect on the total depth of penetration. The optimal mode has been determined (welding current 400 A and voltage on the slag bath 45 V), which provides the required penetration depth (4.63 mm) of a large-modulus tooth. The convergence of the results of the full-scale test with the results of planning a full factor experiment of type 2² was revealed, which made it possible to determine the optimal surfacing mode. This study can be used to optimize the parameters of electroslag surfacing, which will lead to an increase in the quality and efficiency of restoration of worn teeth.

Keywords: electroslag surfacing, surfacing mode, penetration depth, welding current, welded tooth.

Introduction

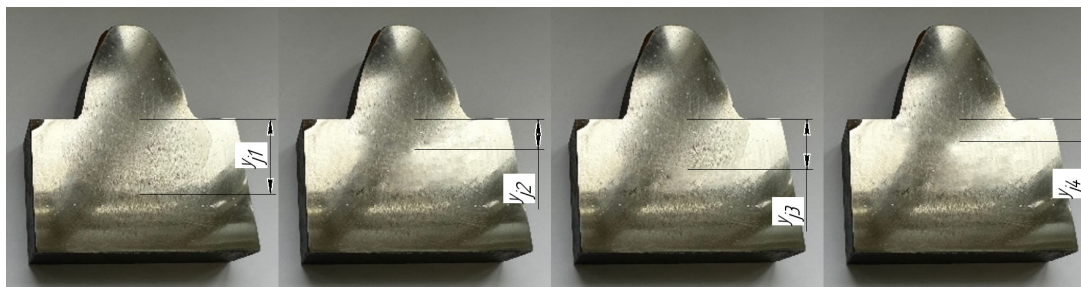
The electroslag surfacing method is used to create products or repair parts [1, 2]. The process of electroslag surfacing is characterized by the use of liquid slag. Liquid slag melts the filler material that is supplied to it and melts the edges of the surface of the product [3, 4]. The molten metal sinks to the bottom of the slag bath and crystallizes,

forming a molten surface. One of the key problems encountered in electroslag surfacing [5, 6] is to ensure the initial process of guiding the slag bath and ensuring the stability of the electroslag process itself. The stability of the electroslag process is also critical to ensure the uniformity and quality of the deposited layer, which affects the durability and reliability of the restored parts [7, 8].

This study examines the optimization of electroslag surfacing modes in order to achieve the required penetration depth of a worn tooth. The main task is to create a mathematical model of the electroslag process, taking into account the influence of various surfacing modes. The model is checked for adequacy using the Fisher criterion, and the results are analyzed and compared with the predictions of the model.

Field experimental studies

To plan a full-scale experiment in the welding laboratory of the Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, an electroslag surfacing unit was manufactured and tested and samples of teeth with a 20 mm module were obtained (Fig.1). Each mode used in the experiment was repeated three times.



1 – 400 A; 50 V; 2 – 350 A; 50 V; 3 – 400 A; 45 V; 4 – 350 A; 45 V
Figure 1 – The results of the experiment

Mathematical modeling

To study the effect of the electroslag surfacing mode on the penetration depth of the deposited teeth, experiments were carried out according to the FFE plan 22 [9]. Welding current (z_1) and slag bath voltage (z_2) are the factors influencing the penetration depth y (mm) [8]. (Table 1)

Table 1 – The initial planning matrix of the FFE 22

Experiment №	Studied factors		Results of the experiments		
	z_1	z_2	y_1	y_2	y_3
1	+	+	46.3	45.8	47
2	-	+	33.7	34,8	31.5
3	+	-	39	41.4	42
4	-	-	20	21.3	22.1

When encoding variables, it is required to indicate the center of the variables, the range of variation and the dependence of the encoded variable x_i on the natural z_i (Table 2).

Table 2 – Coding of factors

Factors	Upper level z_i^+	Bottom level z_i^-	Center z_i^0	Variation interval λ_i	Dependence of the encoded variable on the natural one
z_1	400	350	375	25	$x_1 = \frac{z_1 - 37,5}{25}$
z_2	50	45	47,5	2,5	$x_2 = \frac{z_2 - 47,5}{2,5}$

Average sample results for each experiment is determined with the formula [10]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ji}, j = \overline{1, n}. \tag{1}$$

The results of the construction of the planning matrix in coded variable factors, taking into account paired interactions, are indicated in Table 3.

Table 3 – Planning matrix for processing results
 $\mu_1(t) \cdot \omega_1(t) + \mu_2(t) \cdot \omega_2(t) = \mu T$

Experiment №	Factors		Interactions	Results of the experiments			Average of results
	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_j
1	+	+	+	46,3	45,8	47	46,3
2	-	+	-	33,7	34,8	31,5	36,3
3	+	-	-	39	41,4	42	40,8
4	-	-	+	20	21,3	22,1	21,13

The coefficients of the regression equation show the strength and nature of the influence of independent variables on the dependent variable and characterize the degree of significance of individual variables to improve the accuracy of the model. The coefficients of the regression equation are calculated using the least squares method [10], the calculation results are shown in Table 4:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j, \tag{2}$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j, i = \overline{1, k}, \tag{3}$$

$$b_{r,p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{jp} \bar{y}_j, \quad r < p, \quad r = \overline{1, k}, \quad p = \overline{1, k}. \quad (4)$$

Table 4 – Coefficients of the regression equation

b_0	b_1	b_2	$b_{1,2}$
36,13	7,42	5,17	-2,42

The obtained coefficients are checked for significance using the Student’s criterion; if $|b| > t_{kp} S_{coeff}$ the coefficient of the regression equation is considered significant; if

$|b| < t_{kp} S_{coeff}$ the coefficient is considered insignificant and is assumed to be zero in the regression equation. The critical point t_{cr} is located in the Student’s distribution table [10]. The mean square deviation of the coefficients S_{coeff} depends on the variance of reproducibility of the results for all conducted experiments $S_{\{y\}}^2$ and is calculated by the formula:

$$S_{coeff} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n * m}}. \quad (5)$$

where $S_{\{y\}}^2$ - variance of reproducibility.

To check by the Student’s criterion, we determine the variance of reproducibility $S_{\{y\}}^2$ which characterizes the error of the experiment:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 \quad (6)$$

here, the internal amounts S_j^2 are the sample variances of the experimental results for the j-th experiment ($j=1, \dots, n$). The results of the sample variances are shown in Table 5.

Table 5 – Calculation of sample variances

j	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_j	$(y_{j1} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_j)^2$	S_j^2
1	46,3	45,8	47	46,3	0	0,25	0,49	0,37
2	33,7	34,8	31,5	36,3	6,76	2,25	23,04	16,025
3	39	41,4	42	40,8	3,24	0,36	1,44	2,52
4	20	21,3	22,1	21,13	1,28	0,03	0,94	1,125

Internal amounts S_j^2 :

$$\sum_{j=1}^4 S_j^2 = 20,04.$$

Calculation of the variance of reproducibility by the formula (6):

$$S_{\{y\}}^2 = 5,01.$$

Next, we determine the mean square deviation of the regression coefficients using the formula (5):

$$S_{coeff} = 0,646142$$

From the Student's distribution tables by the number of degrees of 8, at the significance level $\alpha = 0.05$, we find $t_{cr} = 2.31$.

When comparing the obtained value $t_{kp} S_{коэф} = 2,31 * 0,65 = 1,5015$ with the coefficients of the regression equation shown in Table 4, the significance of all coefficients was established. Then the regression equation in the encoded variables takes the form:

$$y = 36,13 + 7,42x_1 + 5,17x_2 - 2,42x_1x_2 \quad (7)$$

The adequacy of the obtained regression equation with significant coefficients is checked using the Fisher criterion: if $F_{calculated} < F_{table}$ the equation is considered adequate; if $F_{calculated} > F_{table}$ the equation is considered inadequate.

The calculated value of the criterion $F_{calculated}$ it is determined by the formula:

$$F_{calculated} = \frac{S_{res}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (8)$$

where S_{res}^2 - residual variance.

The residual variance is determined by the formula:

$$S_{res}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2. \quad (9)$$

The values of the studied parameter are determined according to the obtained regression equation, while taking into account the influencing factors:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= 46,3; \\ \tilde{y}_2 &= 36,3; \\ \tilde{y}_3 &= 40,8; \\ \tilde{y}_4 &= 21,12. \end{aligned}$$

Residual variance:

$$S_{res}^2 = 0,0001.$$

Then, the calculated value of the Fisher criterion:

$$F_{calculated} = 5,99 * 10^{-5}.$$

The tabular value of the Fisher criterion is established from the tables of critical points of the Fisher distribution at the significance level and is accepted by $F_{table} = 5,32$. According to $F_{calculated} < F_{table}$, the regression equation is adequate.

To obtain a mathematical model in natural variables z_i , their expressions from the encoded factor must be substituted into the regression equation instead of x_i . The regression equation is written out in natural variables, substituting their expression z_i instead of the encoded factor and the equation is converted into natural variables:

$$y = -142,2 + 2,13z_1 + 3,52z_2 - 0,04z_1z_2 \quad (10)$$

After obtaining the regression equation in natural quantities, dependences were obtained (Fig.2, 3) that characterize the correlation between the factors and the depth of penetration.

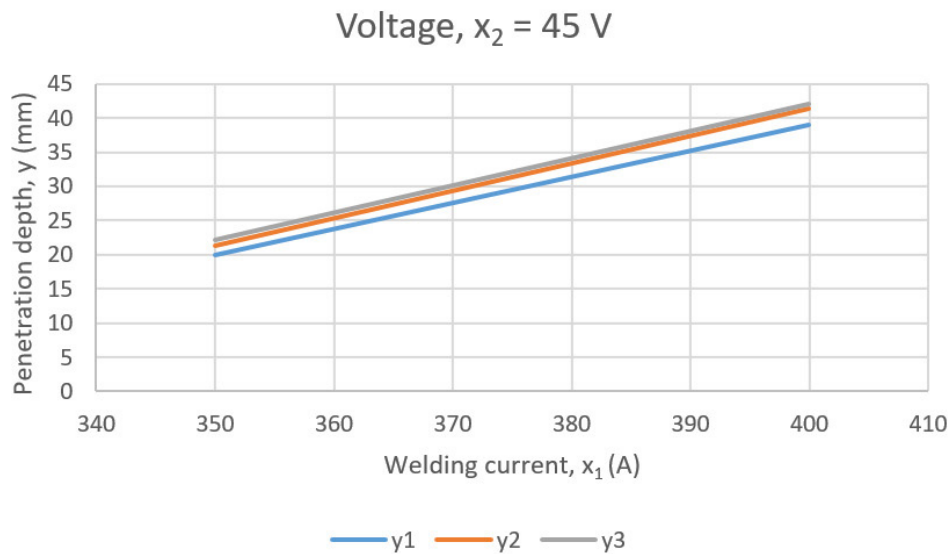


Fig. 2. The dependency between the penetration depth and the welding current at $X_2 = 45$ B

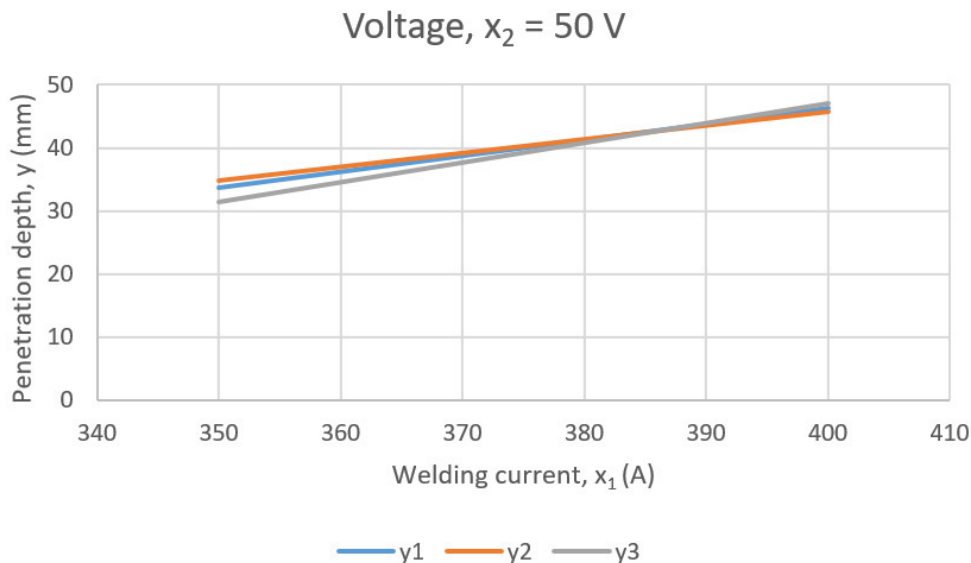


Figure 3 – The dependency between the penetration depth and the welding current at $X_2 = 50$ B

Results and discussion

During the preparation of the article, a comprehensive review of the literature was conducted and a search for similar experiments to compare the results. However, despite careful efforts, it was not possible to find works directly related to the topic under study and using similar methods.

The analysis of the data showed the following: Interpretation of the regression equation (10): the constant -142.2 indicates a displacement of the entire regression function and means that the base level for the variable y is in the absence of z_1 , z_2 effects. The coefficients for z_1 and z_2 (2.13 and 3.52, respectively) show the influence of each independent variable (z_1 and z_2) on the dependent variable y . In this case, the coefficient of 2.13 for z_1 and 3.52 for z_2 means that as z_1 and z_2 increase, y will increase. Considering the coefficients, z_2 has a stronger positive effect on y than z_1 .

The interaction of z_1 , z_2 (-0.04) is negative and indicates that, with an increase in both z_1 and z_2 at the same time, the effect on y will be somewhat weakened. This means that the combination of high values of both parameters leads to a slight decrease in the value of y .

As the parameters of the factors increase (Fig.2, 3), the penetration depth increases. The intersection of the lines on the graph (Fig.3) at $X_2 = 50$ V can be explained by the fact that at high parameters, instability of the electroslag surfacing process occurs.

Conclusions

1 During the study, a mathematical model describing the process of electroslag surfacing was successfully developed, which allows us to take into account the influence of the surfacing parameters (I , U) on the penetration depth of a worn tooth.

2 The regression equation (10) obtained as a result of the analysis shows that both surfacing parameters (z_1 and z_2) have a significant effect on the penetration depth. The coefficients at z_1 and z_2 (2.13 and 3.52, respectively) indicate a positive effect of these parameters on the resulting variable y . However, the parameter z_2 has a more pronounced positive effect on the penetration depth compared to z_1 .

The negative coefficient of interaction between z_1 and z_2 (-0.04) indicates that with a simultaneous increase in both parameters, the effect on the penetration depth will be somewhat weakened. This means that high values of both parameters will not lead to a proportional increase in the penetration depth, but rather, on the contrary, they can reduce it.

3 The developed mathematical model and the established dependencies provide valuable recommendations for practical application in production processes related to the restoration of worn teeth. Based on the interpretation of the model, it was determined that with a welding current of 400 A and a slag bath voltage of 45 V, a penetration depth of 46.3 mm is achieved.

4 To restore large-modulus worn teeth by electroslag surfacing, it is recommended to use welding current modes of 400 A and a slag bath voltage of 45 V. The results obtained can be used to optimize the processes of electroslag surfacing, which will improve the quality of the restored parts, as well as increase their durability and reliability.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Лебедев, В. К., Кучук-Яценко, С. И., Чвертко, А. И. – М. : Машиностроение. Технология сварки, пайки и резки, 2006. – 768 с.

2 Комков, В. Г., Тепляшин, М. В. Восстановление деталей машин электрошлаковой наплавкой // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 1 (28). – С. 20–24.

3 Козулин, С. М., Сушук-Слюсаренко, И. И., Лычко, И. И. Влияние режимов ЭШН на качество восстановленных зубьев шестерен // Автоматическая сварка. – 2006. – № 9 (641). – С. 57–60.

4 Козулин, С. М., Лычко, И. И., Подыма, Г. С. Электрошлаковая наплавка зубьев вал-шестерни вращающейся обжиговой печи // Автоматическая сварка. – 2008. – № 4 (35). – С. 24–30.

5 Ryabtsev, I. et al. Electroslag Surfacing // Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. – Cham: Springer Nature Switzerland. – 2023. – № 11(4). – P. 83–107.

6 Кусков, Ю. М., Евдокимов, А. И. Электрошлаковая наплавка износостойких легированных чугунов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №. 10. – С. 21–24.

7 Errichello, R. How to analyze gear failures. Practical Failure Analysis. – 2002. – № 2. – P. 8–16.

8 Smailova, B., Buzauova, T., Bartenev, I., Davletova, K. Restoration of large modular teeth of ball mill gears by electro-slag surface. Journal of Applied Engineering Science. – 2024. – Vol. – P. 83–98. – <https://doi.org/10.5937/jaes24-33132>.

9 Адлер, Ю. П., Маркова, Е. В., Грановский, Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 282 с.

10 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 10-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.

REFERENCES

1 Lebedev, V. K., Kuchuk-Yacenko, S. I., Chvertko, A. I. Mashinostroenie. E`nciklopediya [Mechanical Engineering. Encyclopedia] / М.: Mashinostroenie. Tekhnologiya svarki, pajki i rezki. T.4; 2006. – 768 p.

2 Komkov, V. G., Teplyashin, M. V. Vosstanovlenie detalej mashin e`lektroshlakovoj naplavkoj [Restoration of Machine Parts by Electroslag Surfacing]. Vestnik TOGU, 2013, № 1 (28). – P. 11–16.

3 Kozulin, S. M., Sushhuk-Slyusarenko, I. I., Ly`chko, I. I. Vliyanie rezhimov E`ShN na kachestvo vosstanovlenny`x zub`ev shesteren [The Impact of Electroslag Surfacing Modes on the Quality of Restored Gear Teeth] / Avtomaticheskaya svarka, 2006, № 9 (641), P. 57–60.

4 Kozulin, S. M., Ly`chko, I. I., Pody`ma, G. S. E`lektroshlakovaya naplavka zub`ev val-shesterni vrashhayushhejsya obzhigovoj pechi [Electroslag Surfacing of Pinion Shaft Teeth in a Rotary Kiln]. Avtomaticheskaya svarka. – 2008. – № 4 (35). – 24–30 p.

5 Ryabtsev, I. et al. Electroslag Surfacing // Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 83–107.

6 Kuskov, Yu. M., Evdokimov, A. I. E`lektroshlakovaya naplavka iznosostojkix legirovanny`x chugunov // Uprochnyayushhie texnologii i pokry`tiya [Electric slag surfacing of wear-resistant alloyed cast irons // Strengthening technologies and coatings]. – 2014. – №. 10. – P. 21–24.

7 Errichello R. How to analyze gear failures. Practical Failure Analysis, 2. 8–16. <https://doi.org/10.1007/BF02715492>. – 2002.

8 Smailova, B., Buzauova, T., Bartenev, I., Davletova, K. Restoration of large modular teeth of ball mill gears by electro-slag surface. Journal of Applied Engineering Science. – 2024. – Vol. 83–98. – <https://doi.org/10.5937/jaes24-33132>.

9 Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. Planirovanie e`ksperimenta pri poiske optimal`ny`x uslovij [Experimental Design for Finding Optimal Conditions]. – М.: Nauka, 1971. – 282 p.

10 Gmurman V. E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie dlya vuzov [Probability Theory and Mathematical Statistics]. – 10-е изд., стер. – М.: Vy`sshaya shkola, 2004. – 479 p.

Received 22.07.24.

Received in revised form 28.07.24.

Accepted for publication 10.09.24.

**Б. К. Смаилова¹, *Т. М. Бузауова², И. А. Бартнев³,
Д. А. Сарбаев⁴, Е. Шкамат⁵**

^{1,2,3,4}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

⁵Гедимин атындағы Вильнюс техникалық университеті, Вильнюс, Литва
22.11.24 ж. баспаға түсті.

28.07.24 ж. түзетулерімен түсті.

10.09.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЭЛЕКТРЛІ ҚОЖДЫ БАЛҚЫТЫЛҒАН ТІСТЕРДІҢ БАЛҚУ ТЕРЕҢДІГІНІҢ МӘЗІРЛЕРІН ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ ТӘЖІРИБЕЛІК ЗЕРТТЕУ

Мақалада 2² типтегі толық факторлы тәжірибе негізінде жүргізілген электрлі қожды балқыту мәзірлерінің тістердің балқу тереңдігіне әсері зерттелген. Факторлар ретінде балқыту тогы және қожды ваннадағы кернеу таңдалды. Әр тәжірибе үш рет қайталанды, ал оның қорытындылары регрессиялық моделді тұрғызу үшін сарапталды және олар факторлардың барлық өзара әсерін ескереді. Мақалада сонымен қатар айнымалы факторларды кодтау, олардың аралық мәндерін таңдау, жоспарлау матрицасын тұрғызу, регрессия теңдеуін құру, регрессия коэффициенттерін есептеу және олардың маңыздылығын Стьюдент критериясы арқылы тексеру толықтай қарастырылып өткен. Жоспарланған толық факторлы тәжірибенің шынайылығы Фишер критериясының көмегімен дәлелденді ($F_{расч.} < F_{табл.}$). Толық факторлы тәжірибе жоспарының қорытындысы бойынша тісті балқытудың қосынды тереңдігіне қожды ваннадағы кернеудің шамасы басымды әсер ететіні белгіленді. Ірі модулды тістің қажетті балқу тереңдігін (4,63 мм) қамтамасыз ететін тиімді мәзір (балқу тогы 400А және қожды ваннадағы кернеу 45В) анықталды. Табиғи тәжірибе қорытындылары 22 типті толық факторлы тәжірибе қорытындысымен ұқсастығы белгілену нәтижесінде балқытудың тиімді мәзірі анықталды. Жүргізілген зерттеулер электрлі қожбен балқыту параметрлерін тиімділеу үшін қолданылуы мүмкін, әрі қайта тозған, қайта қалпына келтірілген ірі модулды тістердің сапасын және тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік етеді.

Кілтті сөздер: электрлі қожбен балқыту, балқыту мәзірлері, балқу тереңдігі, дәнекерлеу тогы, балқытылған тіс.

*Б. К. Смаилова¹, *Т. М. Бузауова¹, И. А. Бартенева¹,
Д. А. Сарбаев⁴, Е. Шкамаев⁵*

^{1,2,3,4}Карагандинский технический университет имени

Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда

²Вильнюсский технический университет Гедимины, Литва, Вильнюс

Поступило в редакцию 22.04.24.

Поступило с исправлениями 28.07.24.

Принято в печать 10.09.2024.

ПЛАНИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ НА ГЛУБИНУ ПРОПЛАВЛЕНИЯ НАПЛАВЛЕННЫХ ЗУБЬЕВ

В статье рассмотрены результаты исследования влияния режимов электрошлаковой наплавки на глубину проплавления восстановленных зубьев, проведенные на основе полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2². В качестве факторов были выбраны сварочный ток и напряжение на шлаковой ванне. Каждый эксперимент был повторен трижды, и результаты были проанализированы для построения регрессионной модели, учитывающей все взаимодействия факторов. В статье подробно описан процесс кодирования переменных факторов, построения матрицы планирования, вычисления коэффициентов уравнения регрессии и их проверка на значимость с использованием критерия Стьюдента. Адекватность проведенного эксперимента подтверждена расчетами с применением критерия Фишера ($F_{расч.} < F_{табл.}$). По результатам эксперимента установлено, что наиболее значительное влияние на суммарную глубину проплавления оказывает напряжение на шлаковой ванне. Определен оптимальный режим (сварочный ток 400 А и напряжение на шлаковой ванне 45 В), обеспечивающий требуемую глубину проплавления (4,63 мм) крупномодульного зуба. Выявлена сходимость результатов натурального испытания с результатами планирования полного факторного эксперимента типа 2², что позволило определить оптимальный режим наплавки. Данное исследование может быть использовано для оптимизации параметров электрошлаковой наплавки, что приведет к повышению качества и эффективности восстановления изношенных зубьев.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, режим наплавки, глубина проплавления, сварочный ток, наплавленный зуб.

***В. Б. Шулятьев**

Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук,

Российская Федерация, г. Новосибирск

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0193-6690>

*e-mail: shulyat@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НЕПРЕРЫВНЫМ И ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ AL-MG-LI

В данной статье представлено исследование процесса лазерной резки авиационных алюминево-литиевых сплавов системы Al-Mg-Li с использованием импульсного и непрерывного излучения. Лазерная резка является высокоэффективным методом обработки металлов, обеспечивающим высокую скорость и качество реза. Однако для алюминиевых сплавов процесс осложняется их высокой теплопроводностью и отражательной способностью. В статье сообщается о результатах механических испытаний образцов из алюминий-литиевого сплава системы Al-Mg-Li, полученных лазерной резкой непрерывным и импульсным излучением. Для резки использовался CO₂-лазер. Резка импульсным излучением производилась при частоте следования импульсов 40 кГц при одновременном воздействии на материал лазерного излучения и плазмы оптического разряда, создаваемого лазерным излучением в струе технологического газа (аргона). Разрезались листы толщиной 1,5 мм при средней мощности лазерного излучения 1,5 кВт и давлении аргона 0,05 МПа. Определен диапазон скоростей резки, в котором зона термического влияния на кромке реза имеет минимальную величину. По результатам испытаний на малоцикловую усталость образцов, вырезанных импульсным излучением, выдержал в 2,6 раза больше циклов нагружения по сравнению с образцом, вырезанным непрерывным излучением при прочих равных условиях. Испытания на растяжение не выявили какого-либо влияния метода резки на прочность.

Ключевые слова: алюминий-литиевый сплав, лазерная резка, зона термического влияния, малоцикловая усталость, импульсное излучение, лазерное излучение.

Введение

При лазерной резке металлов происходит локальное плавление материала сфокусированным лазерным лучом. Образовавшийся расплав удаляется из области взаимодействия потоком технологического газа, при перемещении луча относительно разрезаемого листа образуется рез. Лазерная резка сочетает высокую скорость с высоким качеством обработки. Критерием качества для большинства применений является отсутствие грата (затвердевших капель расплава на нижней

кромке реза) и малая шероховатость поверхности реза. Благодаря высокому качеству, лазерная резка листовых материалов применяется в разных отраслях промышленности в качестве финишной операции изготовления деталей.

Алюминиевые сплавы имеют высокую теплопроводность и высокий коэффициент отражения лазерного излучения, что осложняет их лазерную резку. Во-первых, требуется повышенная мощность лазерного излучения. Кроме того, большой поток тепла в основной материал охлаждает зону реза, что повышает вязкость и коэффициент поверхностного натяжения расплава и затрудняет удаление расплава потоком технологического газа. Для эффективного удаления расплава необходим большой расход газа, и резку даже тонких (1...2 мм) листов алюминиевых сплавов проводят при большом давлении газа, до 1...1,5 МПа [1-3]. Наилучшее качество реза достигается при использовании в качестве технологического газа аргона [4; 5].

Обычно лазерную резку производят непрерывным излучением. В [6, 7] сообщалось о возможности достижения высокого качества реза алюминиевых сплавов при низком давлении аргона, если для резки использовать импульсный CO₂-лазер с модуляцией добротности. В условиях интенсивного испарения материала на расплав действует сила давления отдачи паров. Кроме того, в процессе резки при каждом лазерном импульсе происходит оптический пробой газа и формируется оптический разряд в аргоне [8], при этом создается область высокого давления вблизи поверхности расплава. Дополнительное силовое воздействие на расплав при резке импульсным излучением позволяет понизить давление технологического газа. Разрезались листы авиационных алюминий-литиевых сплавов толщиной до 2 мм, получен рез без грата с малой шероховатостью поверхности реза при давлении аргона 0,05 МПа [6; 7].

Алюминиевые сплавы широко применяются в авиации. Авиационная промышленность предъявляет повышенные требования к механическим характеристикам деталей. В настоящей работе исследуется прочность на растяжение и усталостная долговечность образцов, вырезанных из алюминий-литиевого сплава 1420 системы Al-Mg-Li излучением импульсного CO₂-лазера с модуляцией добротности непрерывного лазера при использовании аргона в качестве технологического газа.

Материалы и методы

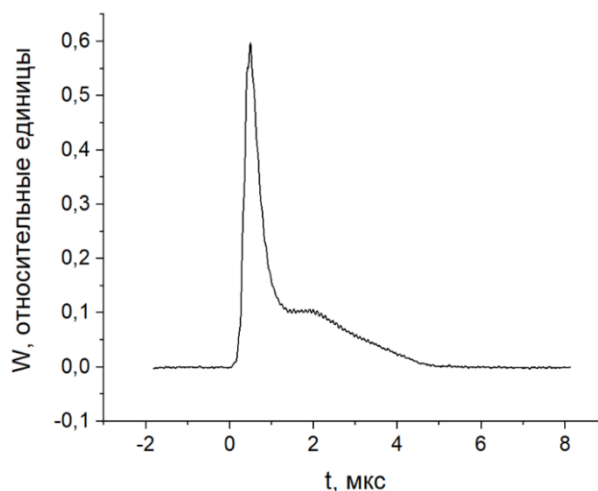
Разрезались листы алюминий-литиевого сплава 1420 системы Al-Mg-Li толщиной t = 1,5 мм. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплава 1420

Массовая доля элементов, %			
Al	Li	Mg	Zr
осн.	2,1	5,2	0,1

Для резки использовался двухкоординатный стол с цифровым программным управлением, делались прямые резы. Резка производилась в струе аргона при давлении 0,05 МПа, струя газа формировалась коническим соплом с выходным диаметром 2,5 мм.

Резка производилась импульсно-периодическим CO_2 -лазером с непрерывной накачкой и механической модуляцией добротности [9; 10] при средней мощности излучения 1,5 кВт и частоте следования импульсов 40 кГц. Качество лазерного пучка близко к TEM_{00} моде, $\text{VPP} = 4,7$ мм · мрад. В качестве модулятора добротности в лазере используется вращающийся медный диск с прорезями. Осциллограмма лазерного импульса показана на рисунке 1. Пиковая мощность импульса равна $(4,2 \dots 4,6) \cdot 10^4$ Вт, результат получен численным интегрированием. Также производились резы при непрерывной лазерной мощности без диска-модулятора.



W — мгновенная лазерная мощность

Рисунок 1 – Осциллограмма лазерного импульса

Лазерный пучок фокусировался линзой с фокусным расстоянием 63,5 мм. Распределение интенсивности по сечению фокального пятна близко к гауссову. Диаметр фокального пятна, рассчитанный как сумма дифракционного размера и уширения из-за сферической aberrации, равен 110 мкм. Этому соответствует усредненная по фокальному пятну интенсивность $4,7 \cdot 10^8$ Вт/см². Интенсивность излучения в фокальном пятне превышает порог оптического пробоя аргона $1,4 \cdot 10^8$ Вт/см², и резка производилась при одновременном воздействии на материал лазерного излучения и плазмы оптического разряда [8] в аргоне. Такой метод отличается как от обычной лазерной резки, так и от плазменной резки, и может быть назван лазерно-плазменной резкой.

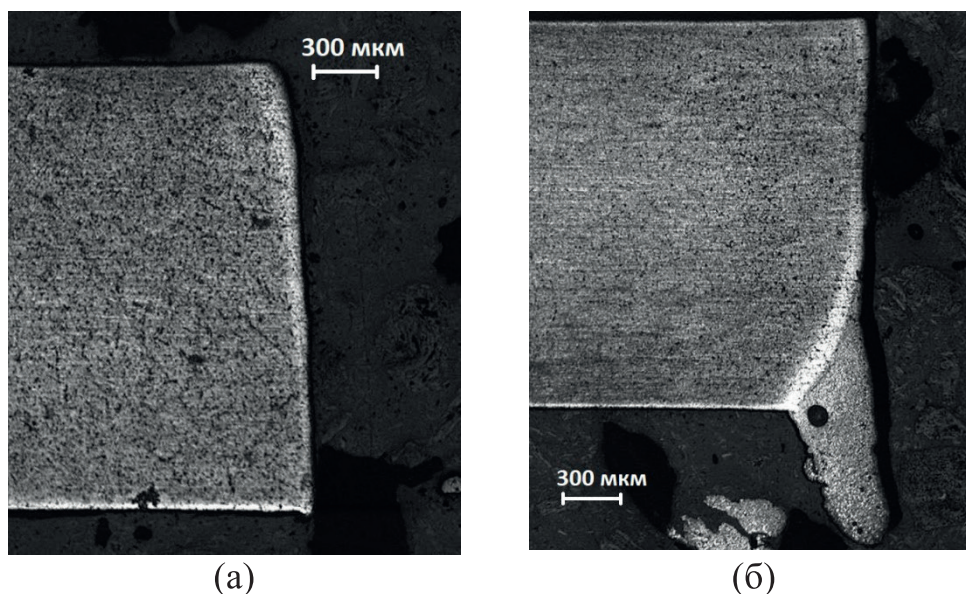
Для выявления зоны термического влияния (ЗТВ) образцы подвергались травлению в растворе Келлера. Измерения шероховатости поверхности реза и ширины ЗТВ производились при помощи лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT. Шероховатость и ширина ЗТВ измерялась в трёх сечениях – на расстоянии 0,2t, 0,5t и 0,8t от верхней поверхности листа, в качестве

характеристики образца принималась средняя величина. Для механических испытаний образцов использовалась электромеханическая универсальная испытательная машина Zwick/RoelZ100.

Результаты и обсуждение

При резке импульсным излучением сплава 1420 толщиной 1,5 мм получен рез без грата при скоростях 2,5...4 м/мин, при меньшей скорости появляется грат, при большей скорости наблюдается непрорез. Шероховатостью поверхности в области безгратового реза не превышает 2.6 мкм. При резке непрерывным излучением также при давлении аргона 0.05 МПа на образцах во всем диапазоне скоростей резки присутствует грат высотой до 0.5...0.6 мм.

На рисунке 2 показаны шлифы резов при резке импульсным и непрерывным излучением. Прочие параметры резки были одинаковыми. Образцы вырезаны при скорости 4 м/мин. На образце, вырезанном непрерывным излучением, виден грат, на образце, вырезанном импульсным излучением, грат отсутствует. Зона термического влияния с измененной структурой проявлена в виде светлых областей вблизи поверхности реза. Зависимость шероховатости R_a поверхности реза от скорости V при резке импульсным излучением показана на рисунке 3.



(а) резка импульсным (а) и непрерывным (б) излучением, технологический газ – аргон

Рисунок 2 – Травленные шлифы кромки реза

На рисунке 4 показана зависимость ширины h ЗТВ от скорости при резке импульсным излучением. Величина зоны термического влияния уменьшается с ростом скорости и при скорости выше 2,8 м/мин изменяется слабо. Таким образом, зона термического влияния имеет минимальную величину вблизи максимальной скорости резки при $V = 3 \dots 4$ м/мин.

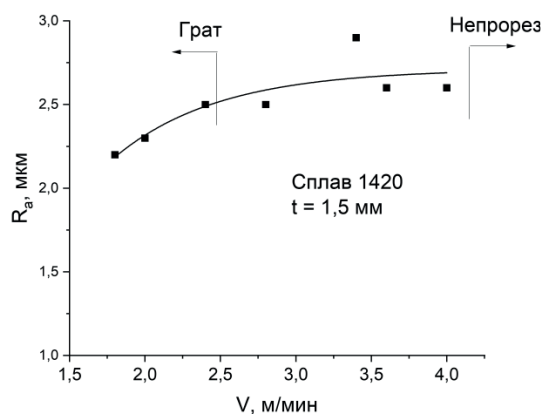


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости R_a поверхности реза от скорости резки

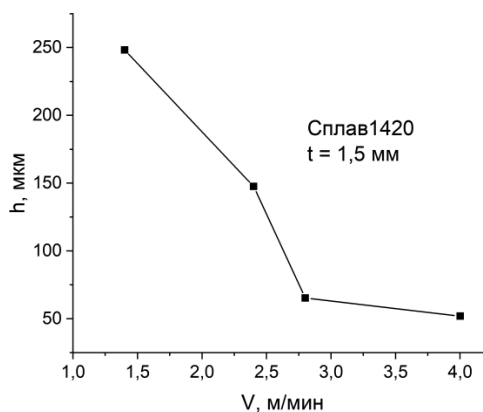
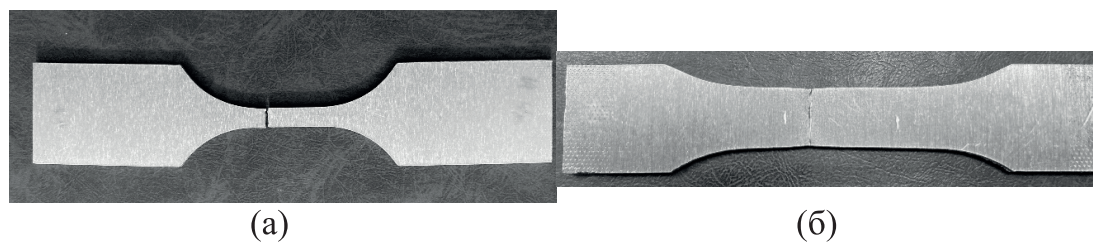


Рисунок 4 – Зависимость ширины h зоны термического влияния от скорости резки

Проведены испытания на малоцикловую усталость и испытания на растяжение образцов, вырезанных импульсным и непрерывным излучением. Образцы для испытаний вырезались при скорости 3,8 м/мин. Эта скорость близка к максимальной, при этом шероховатость поверхности реза и ЗТВ не сильно превышают минимальные величины. На рисунке 5 показаны фото образцов для испытаний. Ширина прямолинейных участков равна 6 мм при испытаниях на малоцикловую усталость и 12 мм при испытаниях на растяжение. Прямолинейные участки образцов с одной стороны были подвергнуты ручной шлифовке на

глубину зоны термического влияния, на другой стороне была сохранена структура лазерного реза. Образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) с той разницей, что одна из боковых кромок была подвергнута шлифовке.



на малоцикловую усталость (а) и на растяжение (б)

Рисунок 5 – Образцы для испытаний

Испытания на малоцикловую усталость проводились при амплитуде нагрузки от 50 до 400 МПа с частотой 0,25 Гц. Такой режим не позволяет определить классическую усталостную долговечность образцов, вырезанных в разных условиях, но дает возможность сравнить их сопротивление усталостному разрушению в пределах нескольких десятков тысяч циклов нагружения. Как показали результаты испытаний (рисунок 6), количество циклов при резке импульсным излучением в 2.62 раза превышает соответствующую величину при резке непрерывным излучением.

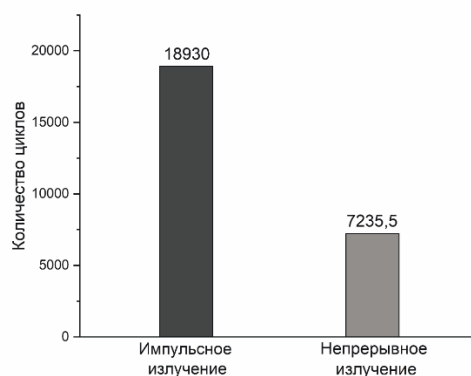
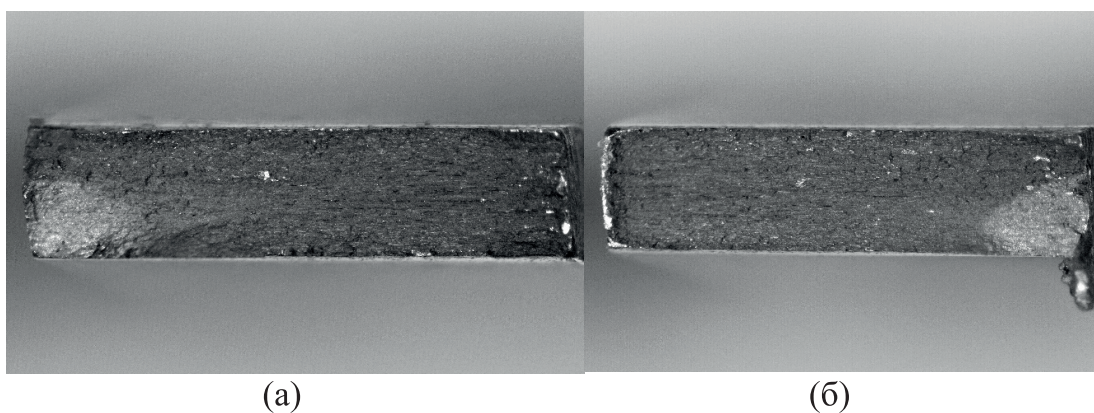


Рисунок 6 – Результаты испытаний на малоцикловую усталость, количество циклов до разрушения

На рисунке 7 показаны поверхности излома при испытаниях на малоцикловую усталость образцов, полученных при резке импульсным и непрерывным излучением. Левая сторона излома соответствует боковой поверхности, которая была перед испытанием подвергнута шлифовке, правая сторона – поверхности, где была сохранена структура лазерного реза (присутствуют характерные

борозды в импульсном режиме, борозды и грат в непрерывном режиме). На поверхностях излома хорошо видны области усталостного разрушения. Они представляют собой округлые светлые пятна, по большей части периметра четко разграниченные с темной зоной долома. Существенным является тот факт, что при лазерно-плазменной резке образцы не только выдерживают значительно больше циклов нагружения, но и разрушаются не от стороны реза, а от той стороны, где слой материала вблизи поверхности реза был удален шлифовкой. В то же время образцы, полученные резкой непрерывным излучением, разрушаются со стороны поверхности лазерного реза, в месте скопления грата. Это дает основание сделать вывод, что создаваемые резкой импульсным излучением изменения структуры материала в зоне термического влияния и изменения поверхности по сравнению с полированной не ухудшают усталостную прочность образца. При резке непрерывным излучением поверхность реза в области скопления грата является источником зарождения усталостной трещины.



(а) – лазерно-плазменная резка; (б) – лазерная резка непрерывным излучением

Рисунок 7 – Изломы при испытаниях на малоцикловую усталость.

Левая сторона образца подвергнута ручной шлифовке,
на правой стороне сохранена поверхность лазерного реза

Статические испытания на разрыв проводились при скорости движения подвижной траверсы 1 мм/мин, деформация измерялась контактным экстензометром. В испытаниях на растяжение диаграммы нагружения образцов, вырезанных импульсным и непрерывным излучением, почти совпадают (рисунок 8). Испытывался также образец, обе стороны которого подвергнуты шлифовке. При этом прочность на растяжение образцов, вырезанных лазером, и прочность шлифованного образца имеют приблизительно одинаковую величину. Таким образом, существенного влияния способа резки (импульсным или непрерывным излучением) не обнаружено.

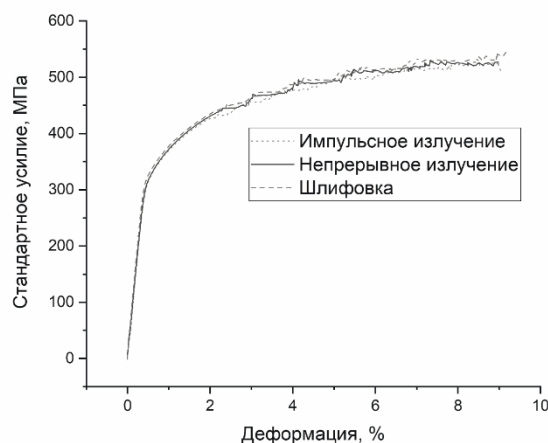


Рисунок 8 – Диаграмма нагружения при испытаниях на растяжение

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (№ гос. регистрации: 124021500015-1). Механические испытания выполнены с использованием оборудования Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

Выводы

Произведено экспериментальное сравнение механических характеристик образцов, вырезанных из сплава системы Al-Mg-Li толщиной 1,5 мм двумя методами – обычной лазерной резкой с использованием непрерывного CO₂-лазера и методом лазерно-плазменной резки, когда резка производится импульсным лазером с модулированной добротностью в струе аргона при одновременном воздействии на материал лазерного излучения и плазмы оптического разряда. В качестве технологического газа использовался аргон при давлении 0,05 МПа.

Метод лазерно-плазменной резки позволил получить образцы без грата, в то время как на образцах, вырезанных непрерывным лазером, всегда присутствовал грат. Ширина зоны термического влияния при лазерно-плазменной резке уменьшается с ростом скорости, при скорости более 3 м/мин зависимость становится слабой, грат отсутствует. Образцы для механических испытаний вырезались при скорости 3,8 м/мин. В испытаниях на растяжение не выявлено какой-либо разницы в прочности образцов, вырезанных двумя методами. При испытаниях на малоцикловую усталость образец, вырезанный лазерно-плазменной резкой, выдержал до разрушения в 2,62 раза больше циклов нагружения по сравнению с образцом, вырезанным непрерывным лазером. При этом усталостная трещина на образце, полученном методом лазерно-плазменной резки, зародилась на стороне образца, где приповерхностный слой был удален шлифовкой. Таким образом, лазерно-плазменная резка не оказывает существенного влияния на усталостную долговечность вырезанного образца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Leone, C., Genna, S., Tagliaferri, V. Cutting of AA6061 by a multimode pulsed Nd:YAG laser with high pressure gas: characterization of kerf geometry and quality // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2018. – V. 94. – P. 925–940.

2 Sharifi, M., Akbarifi, M. Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy // *Optik.* – 2019. – V. 184. – P. 457–463.

3 Ullah, S., Li, X., Guo, G., Rodríguez, A. R., Li, D., Du, J., Cui, Li., Wei, Lina. Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions // *Materials Today Communications.* – 2022. – V. 33. – P. 104236.

4 Riveiro, A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J. Parametric investigation of CO2 laser cutting of 2024-T3 alloy // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2010. – V. 210. – P. 1138–1152.

5 Rivero, A., Quintero, F., del Val, J., Boutinguiza, M., Wallerstein, D., Comesana, R., Lusquinos, F., Pou, J. Laser cutting of aluminum alloy 2024-T3 // *Procedia Manufacturing.* – 2017. – V. 13. – P. 396–401.

6 Шулятьев, В. Б., Маликов, А. Г. Лазерная резка авиационных алюминиевых сплавов в условиях интенсивного испарения материала // *Наука и техника Казахстана.* – 2021. – № 2. – С. 15–29.

7 Шулятьев, В. Б., Гулов, М. А., Карпов, Е. В., Маликов, А. Г., Бойко, К. Р. Лазерная резка алюминиевых сплавов излучением импульсного СО2-лазера в струе аргона в условиях формирования оптического разряда // *Квантовая электроника.* – 2023. – Т. 53. – № 6. – С. 44–443.

8 Прохоров, А. М., Конов, В. И., Урсу, И., Михэилеску, И. Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. – М. : Наука, 1988. – 537 с.

9 Малов, А. Н., Оришич, А. М., Шулятьев, В. Б. Мощный импульсно-периодический СО2-лазер с механической модуляцией добротности и его применение для исследований в аэродинамических установках // *Квантовая электроника.* – 2011. – Т. 41. – № 11. – С. 1027–1032.

10 Shulyatyev, V. B., Orishich, A. M. Generation of a laser beam with a high peak brightness in a CO2 laser with continuous pumping and mechanical Q-switching // *AIP Conference Proceedings.* – 2019. V. 2125. – № 1. – P. 030004.

REFERENCES

1 Leone, C., Genna, S., Tagliaferri, V. Cutting of AA6061 by a multimode pulsed Nd:YAG laser with high pressure gas: characterization of kerf geometry and quality // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2018. – V. 94. – P. 925–940.

2 Sharifi, M., Akbarifi, M. Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy // *Optik.* – 2019. – V. 184. – P. 457–463.

3 Ullah, S., Li, X., Guo, G., Rodríguez, A. R., Li, D., Du, J., Cui, Li., Wei, Lina. Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions // *Materials Today Communications*. – 2022. – V. 33. – P. 104236.

4 Riveiro, A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J. Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – V. 210. – P. 1138–1152.

5 Rivero, A., Quintero, F., del Val, J., Boutinguiza, M., Wallerstein, D., Comesana, R., Lusquinos, F., Pou, J. Laser cutting of aluminum alloy 2024-T3 // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – V. 13. – P. 396–401.

6 Shulyat'ev, V. B., Malikov, A. G. Lazernaya rezka aviacionny'x alyuminievy'x splavov v usloviyax intensivnogo isparenija materiala [Laser cutting of aviation aluminum alloys under conditions of intense evaporation of the material] // *Nauka i texnika Kazaxstana*. – 2021. – № 2. – P. 15–29.

7 Shulyat'ev, V. B., Gulov, M. A., Karpov, E. V., Malikov, A. G., Bojko, K. R. Lazernaya rezka alyuminievy'x splavov izlucheniem impul'snogo SO₂-lazera v strue argona v usloviyax formirovaniya opticheskogo razryada [Laser cutting of aluminum alloys by pulsed CO₂ laser radiation in an argon jet under conditions of optical discharge formation] // *Kvantovaya e'lektronika*. – 2023. – T. 53. – № 6. – P. 44–443.

8 Proxorov, A. M., Konov, V. I., Ursu, I., Mixe'ilesku, I. N. Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s metallami [Interaction of laser radiation with metals]. – M. : Nauka, 1988. – 537 p.

9 Malov, A. N., Orishich, A. M., Shulyat'ev, V. B. Moshhny'j impul'sno-periodicheskij SO₂-lazer s mexanicheskoj modulyaciej dobrotnosti i ego primenenie dlya issledovanij v ae'rodynamiceskix ustanovkax [A powerful pulsed periodic CO₂ laser with mechanical Q-factor modulation and its application for research in aerodynamic installations] // *Kvantovaya e'lektronika*. – 2011. – T. 41. – № 11. – P. 1027–1032.

10 Shulyatyev, V. B., Orishich, A. M. Generation of a laser beam with a high peak brightness in a CO₂ laser with continuous pumping and mechanical Q-switching // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. V. 2125. – № 1. – P. 030004.

Поступило в редакцию 21.11.24.

Поступило с исправлениями 24.11.24.

Принято в печать 24.11.2024.

***В. Б. Шулятьев**

Теориялық және қолданбалы механика институты. С. А. Христианович Ресей Ғылым академиясының Сібір бөлімшесі, Ресей Федерациясы, Новосибирск қ.
21.11.24 ж. баспаға түсті.
24.11.24 ж. түзетулерімен түсті.
24.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҮЗДІКСІЗ ЖӘНЕ ИМПУЛЬСТІК СӘУЛЕ ШЫҒАРУ ЛАЗЕРЛІК КЕСУДІҢ AL-MG-LI ЖҮЙЕСІНІҢ ҚОРЫТПАСЫНАН АЛЫНҒАН ҮЛГІЛЕРДІҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Бұл мақалада импульсті және үздіксіз сәулеленуді қолдана отырып, Al-Mg-Li жүйесінің авиациялық алюминий-литий қорытпаларын лазерлік кесу процесін зерттеу ұсынылған. Лазерлік кесу-жоғары жылдамдықты және кесу сапасын қамтамасыз ететін металдарды өңдеудің жоғары тиімді әдісі. Алайда, алюминий қорытпалары үшін процесс олардың жоғары жылу өткізгіштігімен және шағылысуымен қиындайды. Мақалада al-mg-li жүйесінің алюминий-литий қорытпасынан үздіксіз және импульстік сәулеленумен лазерлік кесу арқылы алынған үлгілерді механикалық сынау нәтижелері туралы айтылады. Кесу үшін CO₂ лазері қолданылды. Импульстік сәулеленумен кесу технологиялық газ (аргон) ағынында лазерлік сәулелену нәтижесінде пайда болатын лазерлік сәулелену мен оптикалық разряд плазмасының материалына бір мезгілде әсер еткенде 40 кГц импульстардың жүру жиілігінде жүргізілді. Орташа лазерлік сәулелену қуаты 1,5 кВт және аргон қысымы 0,05 МПа болған кезде қалыңдығы 1,5 мм парақтар кесілді. Кесу жылдамдығының диапазоны анықталды, онда кесу жиегіндегі термиялық әсер ету аймағы минималды мәнге ие. Төмен циклдік шаршауды сынау нәтижелері бойынша импульстік сәулеленумен кесілген үлгі басқа тең жағдайларда үздіксіз сәулеленумен кесілген үлгімен салыстырғанда 2.6 есе көп жүктеме цикліне төтеп берді. Созылу сынақтары кесу әдісінің беріктікке әсерін анықтаған жоқ.

Кілтті сөздер: алюминий-литий қорытпасы, лазерлік кесу, термиялық әсер ету аймағы, аз циклды шаршау, импульстік сәуле шығару, лазерлік сәуле шығару.

**V. B. Shulyatyev*

S.A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Received 21.11.24.

Received in revised form 24.11.24.

Accepted for publication 24.11.24.

THE EFFECT OF CONTINUOUS AND PULSED LASER CUTTING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AL-MG-LI ALLOY SAMPLES

This article presents a study of the laser cutting process of aviation aluminum-lithium alloys of the Al-Mg-Li system using pulsed and continuous radiation. Laser cutting is a highly efficient metalworking method that ensures high cutting speed and quality. However, for aluminum alloys, the process is complicated by their high thermal conductivity and reflectivity. The article reports on the results of mechanical tests of aluminum-lithium alloy samples of the Al-Mg-Li system obtained by laser cutting with continuous and pulsed radiation. A CO₂ laser was used for cutting. Pulsed cutting was performed at a pulse repetition rate of 40 kHz with simultaneous exposure to laser radiation and plasma of an optical discharge created by laser radiation in a jet of process gas (argon). Sheets with a thickness of 1.5 mm were cut at an average laser radiation power of 1.5 kW and an argon pressure of 0.05 MPa. A range of cutting speeds has been determined in which the zone of thermal influence on the cutting edge has a minimum value. According to the results of low-cycle fatigue tests, the sample cut by pulsed radiation withstood 2.6 times more loading cycles compared to the sample cut by continuous radiation, all other things being equal. Tensile tests have not revealed any effect of the cutting method on strength.

Keywords: aluminum-lithium alloy, laser cutting, zone of thermal influence, low-cycle fatigue, pulsed radiation, laser radiation.

SRSTI 53.37.01

DOI

D. M. Anvarov¹, *M. B. Akramov², I. O. Mirov³¹National University of Science and Technology MISIA, Moscow, Russia²Dushanbe branch of NUST MISIS, Dushanbe, Tajikistan³Tajik State Pedagogical University named after S. Aini, Dushanbe, Tajikistan¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5371-2939>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7641-5922>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1352-5821>*e-mail: akramov60@mail.ru***CHANGE IN THE PROPERTIES OF BRASS LAF 94 -0.5-0.15 DEPENDING ON FROM THE CONTENT OF MODIFYING COMPONENTS***

The article presents the results of a study of changes in the properties of brass LAF 94-0.5-0.15 depending on the content of modifying components. Four samples of brass LAF 94-0.5-0.15 with the addition of aluminum and phosphorus modifiers were obtained by casting. The elemental composition of the obtained samples was determined by atomic emission spectroscopy and X-ray diffractometry. Maps of the distribution of modifiers on the surface of the obtained samples were compiled by electron microscopy. The microhardness of the samples was determined.

It was found that with an increase in the concentration of the modifier - aluminum, the microhardness of the samples decreases. By changing the content of the constituent components of brass and adding modifying elements to it, it is possible to optimize its reflective and mechanical properties. Homogeneous distribution of modifier elements is shown in a photograph in reflected electrons BSE, obtained with a scanning electron microscope, show that the sample is homogeneous and the modifying elements are distributed uniformly over the entire surface of the sample.

Keywords: brass, modifier, microhardness, reflectivity, X-ray diffractometry.

Introduction

It is known that the basis of brass is copper and zinc, and the remaining components are very small and can be classified as impurities. To optimize the mechanical, electrical, light-reflecting, chemical properties of castings, as well as to obtain various brass products, manufacturers sometimes change the concentrations of the constituent elements. Brass has a shiny golden appearance. Therefore, it is a popular material for making art products such as various sculptures, dishes and other products. We obtained samples for analysis by casting. We have studied the casting properties of brass LAF 94-0.5-0.15, which is used as an imitation of gold ZlSrM585-80 for the manufacture of

jewelry and art products by plastic deformation methods quite well [1]. Colored gold alloys, which provide the opportunity to create unique jewelry and decorative elements, are discussed in detail in the works of V.P. Urvachev, V.V. Kochetkov, N.B. Gorin, G. K. Yonemitsu and others [7-9].

Previously, we investigated some optical properties of samples such as diffuse reflection and transmission of brass samples LAF 94 -0.5-0.15 from the content of modifying components depending on the content of modifier components as a gold simulant, which we studied and presented at international conferences [2, 3 and 4]. To continue the research in this article, we will present the results of studies on changing other properties of brass LAF 94 -0.5-0.15 from the content of modifying components.

Materials and methods

The object of the study is brass LAF 94-0.5-0.15 of the following chemical composition, %: 94.1 - 94.5; Cu 3.7 - 7.5 Zn; 0.4 - 0.7 Al; 0.1 - 0.25 P.

The brass was melted in an induction furnace, as well as in a resistance furnace using a graphite-chamotte crucible. Copper grade M1 (99.90% Cu), ligature Cu - 25% Zn, aluminum grade A99 (99.99% Al) and ligature Cu - 10%, phosphorus P were used as charge materials. The charge composition was determined by calculation and samples for research were obtained by casting. Pure copper was loaded into a crucible heated to 600-700 °C, melted under a layer of graphite scrap and overheated to 1150 °C. Then, Cu - P and Cu - Zn ligatures were successively introduced into the copper melt. After their melting, the melt temperature was gradually reduced and at a temperature of 1060 °C it was alloyed with aluminum. The temperature of the liquid metal was measured using a chromel-alumel thermocouple in a steel casing. The finished alloy was poured into molds at a temperature of 1160 °C and cast samples were obtained to study the casting properties.

As a result, to solve the tasks set, we obtained four experimental samples modified with different concentrations of modifiers.

Atomic emission spectroscopy, diffractometry, electron microscopy, spectrophotometry were used in the studies and the microhardness of the samples was determined:

- the chemical composition of the cast samples of brass alloys was determined using atomic emission spectroscopy on the Spectrolab-M, Termo ARL 9900 quantometers;
- an X-ray apparatus, a modernized diffractometer.

DRON-3 with software, was used for a more accurate determination of the chemical composition of the obtained samples.

Using the DRON-3 diffractometer, an X-ray powder diffraction pattern was obtained under the following conditions: copper anode, nickel filter for the beam, , counter speed - 1 degree/min.

To determine the chemical composition, a polished preparation in the form of polished sections was made from the sample. To obtain a diffractogram, a thin powder material was obtained from several small pieces of the sample. Morphology of the obtained samples using a JSM-35 scanning electron microscope under the conditions of analysis $U = 20 \text{ kV}$, $I = 1 \text{ nA}$.

Microhardness of the samples was measured using a PMT-3 device calibrated for NaCl, with a load of 10 g, by 10 measurements, average VHN = 97.2 kg/mm², with a spread of 75 – 122. Polished preparations (in the form of polished sections and checkers) were also studied in reflected light using a Polam P-112 ore (metallographic) microscope.

Diffusion reflectivity of the samples was measured using a Cary – 500 spectrophotometer in the wavelength range of 250 – 2500 nm.

Results and discussion

Modifiers were introduced into the melt based on batch calculations. To determine the chemical composition of the experimental samples, quantometers operating on the basis of atomic emission spectral analysis “Spectrolab -M” “Termo ARL - 9900” and a DRON-3 diffractometer with software were used. The general appearance of the installations and devices is shown in Figure 1.

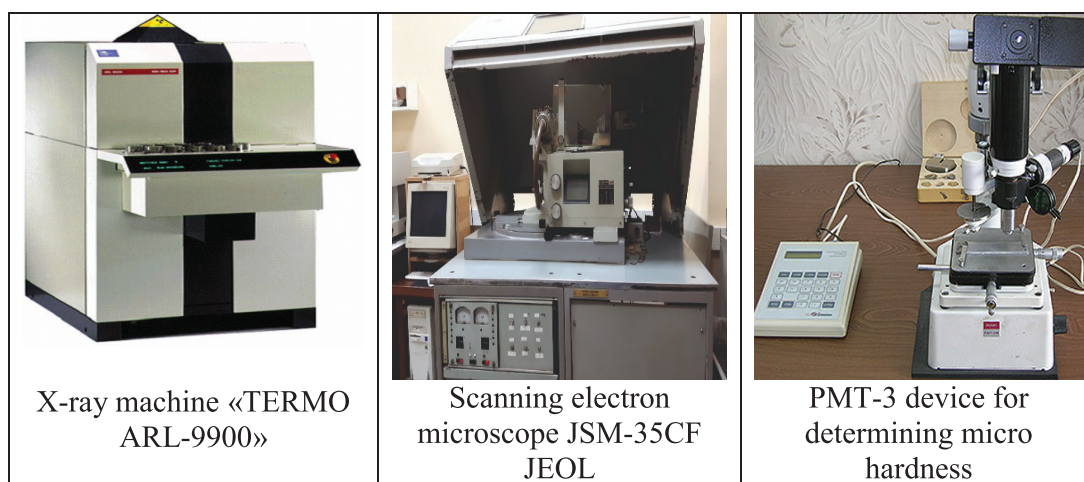


Figure 1 – General view of installations and devices

When preparing the surface of samples for analysis, polishing the grooves is a difficult task. This produces the so-called screening effect, which reduces the fluorescence intensity. As expected, the intensity reduction is more significant for light elements when the primary radiation is perpendicular to the grooves and weaker when they are parallel. To obtain the desired surface finish, special precautions must be taken even during grinding and especially during final polishing. For quantitative analysis, samples must be prepared in the same way as standard samples, i.e. reference samples used to calibrate the spectrometer [5, 6].

The spectrometer has the Analyst Assistant program installed. The program allows you to create an analytical program using the most suitable spectral lines and analytical parameters of the device regarding sensitivity, element selection and possible overlapping of lines. It finds a list of potential problems that arise during analysis and finds solutions to these problems. Those analytical lines of elements that are missing from the memory store of the device are automatically created by the program using the necessary parameters. In addition, a reference template is created that can be used to construct matrix data.

The program “Analyst Assistant” is a program that is based on a knowledge table that contains analytical parameters and potential overlaps for each possible elemental line [6].

The analyzed elements and their detection range of the Termo ARL - 9900 quantometer for copper-based alloys are given in Table 1.

Table 1 – Determination range of the Termo ARL - 9900 quantometer for copper-based alloys

Element	Range of definitions	Selected items
Cu	Base	Cu
Fe	0.0001-5.00	Fe
V	0.0010-0.20	V
Mg	0.00010-11.00	Mg
P	0.0050-1.00	P
Zn	0.00050-12.00	Z n
Ti	0.00050-0.50	T i
Si	0.00010-15.00	Si
Al	0.0010-3.00	Al
Ni	0.0050-3.00	Ni

Usually the work of the quantum meter is overestimated by many factors, such as environmental characteristics and others. Therefore, before analyzing our samples, we have recalibrated the device. After recalibration, the graph of the calibrated device is shown in Figure 2.

The obtained results of the analysis of our samples are given in Table 3.

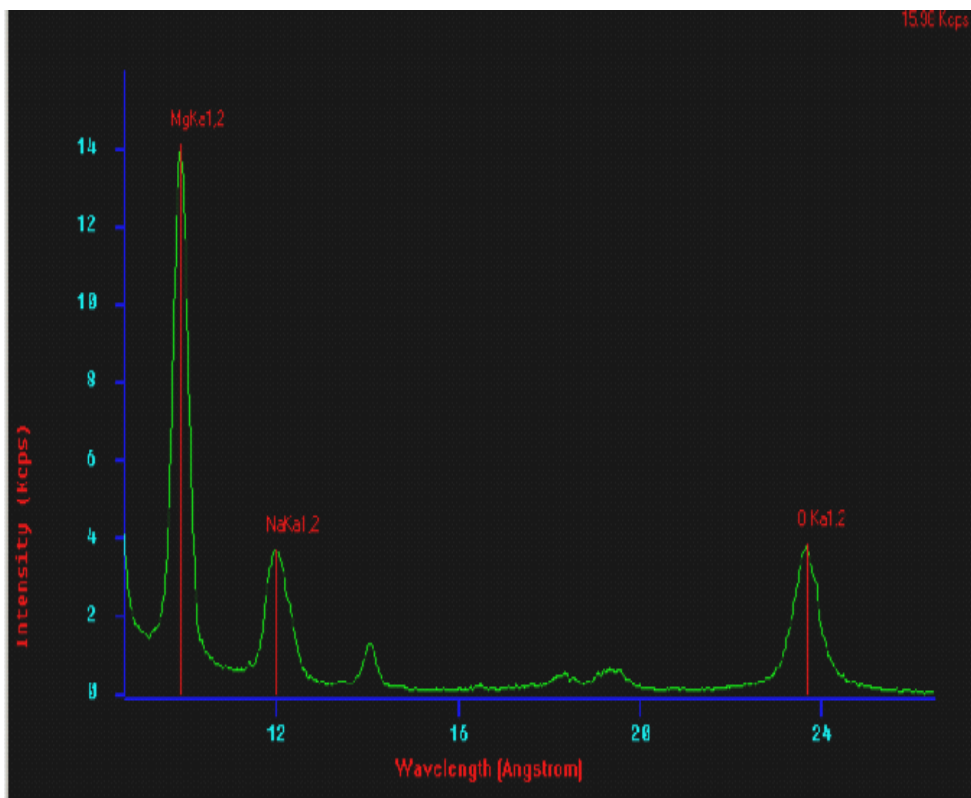


Figure 2 – Graph for calibration of the goniometer spectrometer

The Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of the Russian Federation obtained energy-dispersive spectra of the samples. The energy-dispersive spectrum of sample №1 is shown in Figure 3.

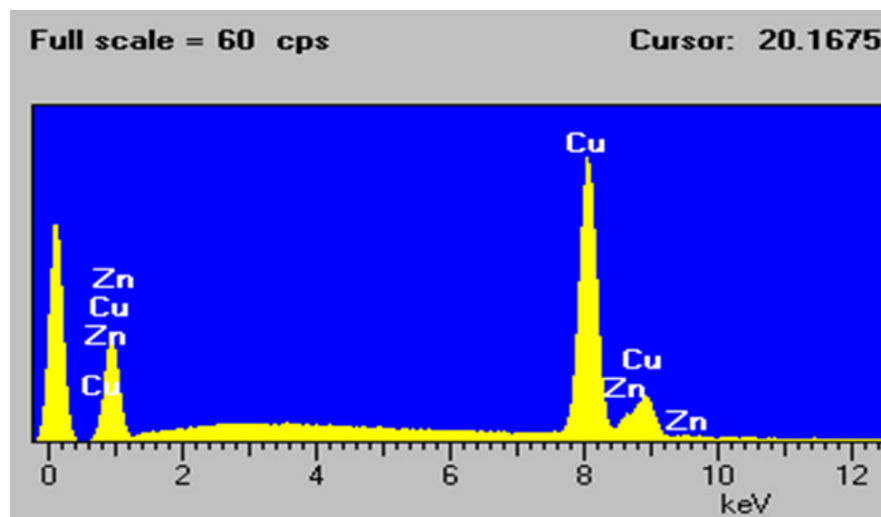


Figure 3 – Energy dispersive spectrum of sample № 1

X-ray diffraction patterns of sample № 3 in comparison with reference samples from the instrument database are shown in Figure 4.

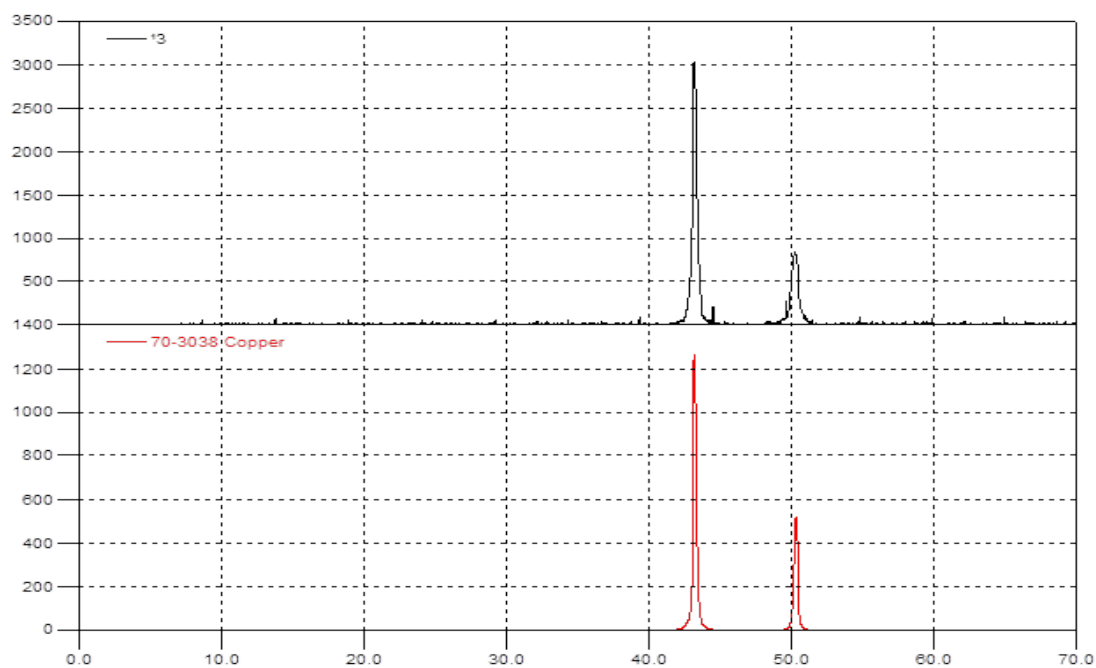


Figure 4 – X-ray diffraction patterns of sample № 3

The distribution of modifying elements on the surface of the analyzed samples can be observed using photographs obtained with an electron microscope. Figure 5 shows a photograph of the distribution of elements on the surface of sample № 4.

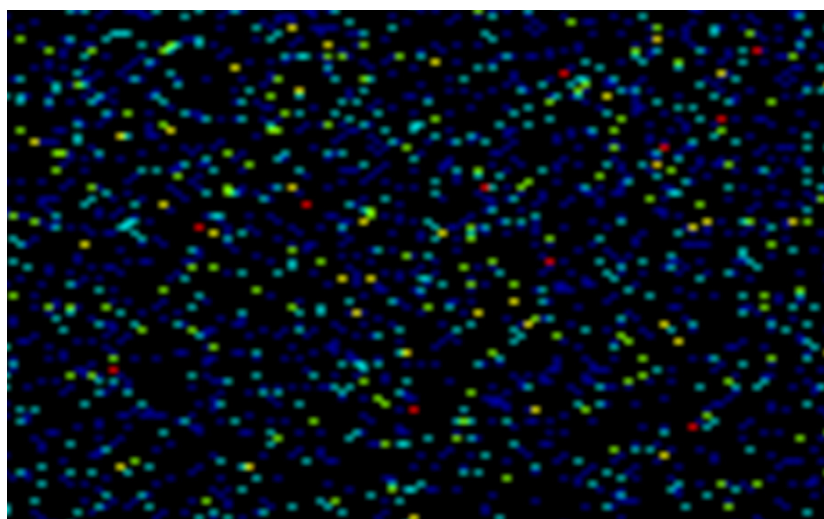


Figure 5 – Map of the distribution of modifier elements on the surface of sample № 4.

The BSE reflected electron image obtained with a scanning electron microscope shows that the sample is homogeneous and the modifying elements are distributed uniformly over the entire surface of the sample.

The microhardness of the samples was measured on a PMT-3 device calibrated for NaCl, with a load of 10 g, for 10 measurements, the average VHN = 97.2 kg/mm², with a spread of 75 - 122 (Fig. 1c). The results of the microhardness analyses are given in Table 3.

The results of the analyses of the obtained samples for the main elements and alloy bases are given in Table 2.

Table 2 – Results of analysis on the DRON-3 diffractometer

Sample № 1				Sample № 2			
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
Cu K	ED	92,95	92,93	Cu K	ED	94,10	94,09
Zn K	ED	6,34	6,28	Zn K	ED	5,30	5,30
AL K	ED	0,53	0,52	AL K	ED	0,50	0,50
P K	ED	0,17	0,18	P K	ED	0,10	0,10
Total		99,99	99,93	Total		99,99	99,93

Sample № 3				Sample № 4			
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
Cu K	ED	94,00	94,00	Cu K	ED	93,60	93,59
Zn K	ED	5,30	5,30	Zn K	ED	5,30	5,30
AL K	ED	0,60	0,60	AL K	ED	1,00	1,00
P K	ED	0,10	0,10	P K	ED	0,17	0,10
Total		99,99	99,93	Total		99,99	99,93

Thus, the complete chemical composition of the obtained experimental samples was determined by spectral and X-ray methods and they are combined in Table No. 3. The measured average value of micro hardness is also included in this table.

Table 3 – Elemental composition of the obtained experimental samples

Cu (Base)	Sample №1	Sample №2	Sample №3	Sample 4
		92,95	94,10	94,00
Fe	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
V	0.0012	0.0012	0.0013	0.0012
Mg	0.0011	0.0011	0.0010	0.0011
P	0,17	0,10	0,10	0,10
Zn	6,34	5,30	5,30	5,30
Ti	0.00050	-	0.00050	-
Si	-	-	-	-
Al	0,53	0,50	0,60	1,00
Ni	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
Micro hardness (VHN)	97,2	92,4	87,3	83,7

For all four samples, the coefficients of diffusion reflection and transmission in the wavelength range from 250 nm to 2500 nm were determined. The influence of aluminum as a modifier on the reflectivity of the experimental samples was established. Figure 6 shows the graphs of the dependence of the reflection coefficient on the energy of incident waves in electron volts and wavelengths in nanometers for the experimental samples. For comparison, the same graph shows the reflectivity of pure gold (Table data). It can be noted that samples No. 1 and No. 3 show the closest reflectivity in the visible range of the spectrum compared to the reflectivity of pure gold. [3].

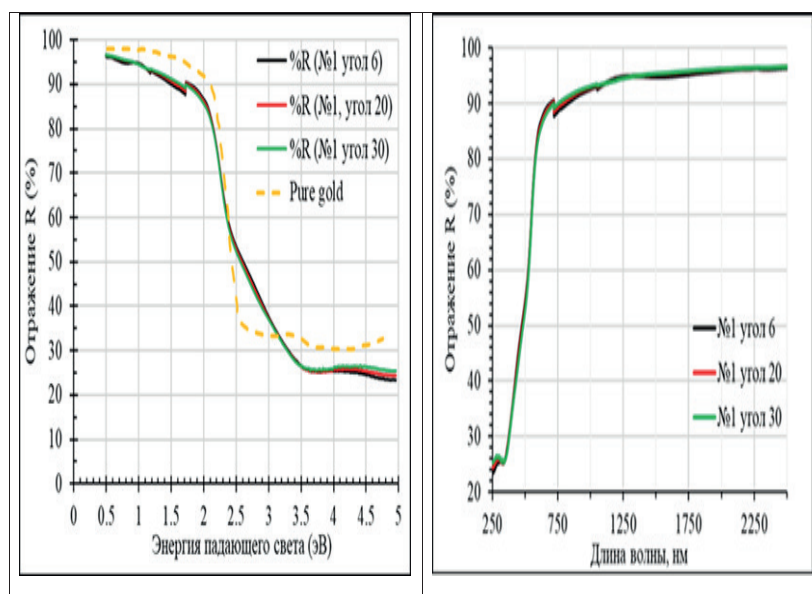


Figure 6 – Comparative graph of the reflection from the energy of incident light of gold (yellow curve) and our objects

Conclusions

Four samples of brass LAF94-0.5-0.15 with the addition of aluminum phosphorus modifiers were obtained by casting. The elemental composition of the obtained samples was determined by atomic emission spectroscopy and X-ray diffractometry. A map of the distribution of modifiers on the surface of the obtained samples was compiled by electron microscopy. The micro hardness of the samples was determined.

It was found that with an increase in the concentration of the modifier - aluminum, the micro hardness of the samples decreases. The modifier elements are distributed over the entire surface of the sample equally.

The addition of aluminum as a modifier in certain concentrations improves the reflectivity of brass LAF94-0.5-0.15.

The aluminum content from 0.4 to 0.6% gives a spectrum very close to the spectrum of gold.

REFERENCES

1 **Anvarov, D. M.** Issledovanie litejnyh svojstv latuni LAF94-0,5-0,15 [Investigation of casting properties of brass LAF94-0.5-0.15][Tekst] / D. M. Anvarov, A. Yu. Titov, E. B. Ten // Litejshchik Rossii, 2020 . – №12 . – P. 24–25.

2 **Anvarov, D. M.** Issledovanie otrazhatel'noj sposobnosti latuni LAF 94 v zavisimosti ot sodержaniya komponentov [Investigation of the reflectivity of brass LAF94 depending on the content of components][Tekst] / D. M. Anvarov, A. Yu. Titov, M. B. Akramov // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «XIII Lomonosovskie chteniya», posvyashchennaya 115-letiyu akademika Bobodziona Gafurova . – Dushanbe: Filial Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni M.V. Lomonosova v gorode Dushanbe, 2023 . – P. 139–144.

3 **Anvarov, D. M.** Koefficient diffuznogo otrazheniya i diffuznogo propuskaniya latuni LAF 94, v zavisimosti ot sodержanii komponentov modifikatorov [The coefficient of diffuse reflection and diffuse transmission of brass LAF94, depending on the content of the modifier components] [Tekst] / D.M. Anvarov, A. Yu. Titov, M. B. Akramov // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Problemy i resheniya effektivnogo ispol'zovaniya al'ternativnyh istochnikov energii» . – Fergana: Ferganskij politekhnicheskij institut, 7–8 noyabrya 2023. – P. 467–470.

4 **Anvarov, D. M.** Vliyanie sodержaniya modifiziruyushchih komponentov na otrazhatel'noj sposobnosti latuni LAF 94 -0,5-0,15 [[The effect of the content of modifying components on the reflectivity of brass LAF94 -0.5-0.15]] [Tekst] / D.M. Anvarov, A. Yu. Titov, M. B. Akramov // Materialy respublikanskoj nauchno-metodicheskoy konferencii. – Kulyab, 2023. – P. 168–171.

5 **Mirov, I. O.** Rentgenospektral'nyj analiz obrazcov do evtecticheskikh splavov alyuminiya sistemy Al – Si – Me [X-ray spectral analysis of samples of pre-eutectic aluminum alloys of the Al - Si – Me system] [Tekst] / I.O.Mirov, Sh. S. Sodatinov, M. B. Akramov // Politekhnicheskij vestnik. – Seriya Intellect. Innovacii. Investicii. – 2022. – № 4 (58). – P. 76–80.

6 **Akramov, M. B.** Kinetika ohlazhdeniya i koefficientov konvektivnogo teplootdachi i teplovogo izlucheniya splavov alyuminiya. [[Kinetics of cooling and coefficients of convective heat transfer and thermal radiation of aluminum alloys]]/ Akramov M.B., Mirov I.O// Mat. Vserossijskoj nauchno-issledovatel'skaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem «Lomonosovskie chteniya - 2023».- STI NITU «MISiS».- S 656-561

7 **Urvachyov, V. P., Kochetkov, V. V., Gorina, N. B.** Yuvelirnoe i hudozhestvennoe lit'e po vyplavlyaemym modelyam splavov medi. [Jewelry and artistic casting based on smelted models of copper alloys.] – CHelyabinsk: Metallurgiya, 1991. –168 p.

8 **Rapson, W. S.** in 'Intermetallic Compounds. Principles and Practice', eds. J.H.Westbrook and R.L. Fleischer, John Wiley & Sons, Chichester, 1994, 2, 559

9 **Yonemitsu, K.** in 'Precious Metals Science and Technology', eds. L.S. Benner, T. Suzuki, K. Meguro and S. Tanaka, International Precious Metals Institute, Allentown, 1991, p. 13.

10 **Gulyaev, A. P.** Metallovedenie [Metal science] / A. P. Gulyaev. M.: Metallurgiya, 1986. 544 p.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Анваров, Д. М.** Исследование литейных свойств латуни ЛАФ94-0,5-0,15 [Текст] / Д.М. Анваров, А.Ю. Титов, Э.Б. Тен //Литейщик России, 2020 . – № 12. – С. 24–25.

2 **Анваров, Д. М.** Исследование отражательной способности латуни ЛАФ 94 в зависимости от содержания компонентов [Текст] / Д. М. Анваров, А. Ю. Титов, М. Б. Акрамов // Международная научно-практическая конференция «XIII Ломоносовские чтения», посвященная 115-летию академика Бободжона Гафурова . –Душанбе: Филиал Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе, 2023 . – С 139–144.

3 **Анваров, Д. М.** Коэффициент диффузного отражения и диффузного пропускания латуни ЛАФ 94, в зависимости от содержания компонентов модификаторов [Текст] / Д. М. Анваров, А.Ю. Титов, М. Б. Акрамов // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы и решения эффективного использования альтернативных источников энергии» . – Фергана: Ферганский политехнический институт, 7 – 8 ноября 2023. – С. 467–470.

4 **Анваров, Д. М.** Влияние содержания модифицирующих компонентов на отражательной способности латуни ЛАФ 94 -0,5-0,15 [The effect of the content of modifying components on the reflectivity of brass LAF94 -0.5-0.15] [Текст] / Д. М. Анваров, А. Ю. Титов, М. Б. Акрамов // Материалы республиканской научно-методической конференции. – Куляб, 2023. – С. 168–171.

5 **Миров, И. О.** Рентгеноспектральный анализ образцов до эвтектических сплавов алюминия системы Al – Si – Me [Текст] /И. О.Миров, Ш. С. Содатдинов, М. Б. Акрамов// Политехнический вестник. – Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 4 (58). – С 76–80.

6 **Акрамов, М. Б.** Кинетика охлаждения и коэффициентов конвективного теплоотдачи и теплового излучения сплавов алюминия. / Акрамов М. Б., Мирон И. О// Мат. Всероссийской научно-исследовательской конференции с международным участием «Ломоносовские чтения. – 2023». – СТИ НИТУ «МИСиС». – С. 656–661.

7 **Урвачёв, В. П., Кочетков, В. В., Горина, Н. Б.** Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди. – Челябинск: Металлургия, 1991. – 168 с.

8 **Rapson, W. S.** in ‘Intermetallic Compounds. Principles and Practice’, eds. J. H. Westbrook and R. L. Fleischer, John Wiley & Sons, Chichester, 1994, 2, 559.

9 **Yonemitsu, K.** in ‘Precious Metals Science and Technology’, eds. L. S. Benner, T. Suzuki, K. Meguro and S. Tanaka, International Precious Metals Institute, Allentown, 1991, P. 13.

10 **Гуляев, А. П.** Металловедение / А. П. Гуляев. М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

Д. М. Анваров¹, *М. Б. Акрамов², И. О. Мирон³

¹НИТУ «МИСиС», Российская Федерация, г. Москва

²НИТУ МИСИС, Таджикистан, г. Душанбе

³ТГУ имени Садриддина Айни, Республика Таджикистан, г. Душанбе

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ЛАТУНИ LAF 94 -0.5-0.15 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ

В статье представлены результаты исследования изменения свойств латуни LAF 94-0.5-0.15 в зависимости от содержания модифицирующих компонентов. Методом литья были получены четыре образца латуни LAF 94-0,5-0,15 с добавлением модификаторов алюминия и фосфора. Элементный состав полученных образцов был определен методами атомно-эмиссионной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Методом электронной микроскопии были составлены карты распределения модификаторов на поверхности полученных образцов. Была определена микротвердость образцов. Установлено, что с увеличением концентрации модификатора - алюминия микротвердость образцов снижается. Изменяя содержание составляющих компонентов латуни и добавляя в нее модифицирующие элементы, можно оптимизировать ее отражательные и механические свойства. Однородное распределение элементов-модификаторов, показанное на фотографии в отраженных электронах BSE, полученной с помощью сканирующего электронного микроскопа, показывает, что образец однороден и модифицирующие элементы равномерно распределены по всей поверхности образца.

Ключевые слова: латунь, модификатор, микротвердость, отражательная способность, рентгеновская дифрактометрия.

*Д. М. Анваров¹, *М. Б. Акрамов², И. О. Мирон³*

¹НИТУ «МИСИС», Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.

²НИТУ МИСиС, Тәжікстан Республикасы, Душанбе қ.

³Садриддин Айни атындағы ТМУ, Тәжікстан Республикасы, Душанбе қ.

LAf 94-0.5-0.15 ЖЕЗІНІҢ ҚАСИЕТТЕРІН ӨЗГЕРТУ МОДИФИКАЦИЯЛАУШЫ КОМПОНЕНТТЕРДІҢ МАЗМҰНЫНА БАЙЛАНЫСТЫ

Мақалада өзгертуші компоненттердің мазмұнына байланысты laf 94-0.5-0.15 жез қасиеттерінің өзгеруін зерттеу нәтижелері келтірілген. Құю арқылы алюминий мен фосфор модификаторлары қосылған laf 94-0,5-0, 15 жезден төрт үлгі алынды. Алынған үлгілердің элементтік құрамы атомдық эмиссиялық спектроскопия және рентгендік дифрактометрия әдістерімен анықталды. Электрондық микроскопия әдісімен алынған үлгілердің бетіне модификаторлардың таралу карталары жасалды. Үлгілердің микроқаттылығы анықталды. Модификатор - алюминий концентрациясының жоғарылауымен үлгілердің микроқаттылығы төмендейтіні анықталды. Жездің құрамдас бөліктерінің мазмұнын өзгерту және оған өзгертуші элементтерді қосу арқылы оның шағылыстыратын және механикалық қасиеттерін оңтайландыруға болады. Сканерлеуші электронды микроскоп арқылы алынған шағылысқан BSE электрондарындағы фотосуретте көрсетілген модификатор элементтерінің біркелкі таралуы үлгінің біркелкі екенін және модификатор элементтерінің үлгінің бүкіл бетіне біркелкі бөлінгенін көрсетеді.

Кілтті сөздер: жез, модификатор, микроқаттылық, шағылысу, рентгендік дифрактометрия.

**B. N. Azamatov¹, P. S. Varbanov², *M. A. Sadenova³,
A. A. Borisov⁴, B. Maratuly⁵**

^{1,3,4,5}D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

²Széchenyi István University, Hungary, Győr

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6381-5846>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5261-1645>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6464-0512>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2870-6668>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2506-2545>

*e-mail: MSadenova@edu.ektu.kz

FEATURES OF OBTAINING A MAGNETRON COATING ON TI-6AL-4V ALLOY WITH VARIOUS COPPER CONTENT

*In the modern world, metals play an invaluable role in various industries. Medical engineering has become an important area of development in modern metallurgy. The disadvantage of Ti-6Al-4V alloy is microbial colonization on its surface, as well as the release of toxic aluminum and vanadium metals into the surrounding tissues, so research on improving the anti-corrosion and antibacterial properties of Ti6Al4V alloy is currently a serious problem. Two-component metal coatings based on Cu-Ta and Cu-Nb were obtained by magnetron sputtering with joint spraying of targets made of pure metals Cu, Nb, Ta. It was found that coatings with a thickness of 10 microns demonstrated a different degree of antimicrobial efficacy during two days of testing: the maximum inhibition zone of the Ta-Cu coating reached 24.0 mm for *S. Aureus* and 17.0 mm for *C. Albicans*. For the Nb-Cu coating with a thickness of 10 microns, the maximum inhibition zone reached 25.0 mm for *S. Aureus* and 15.5 mm for *C. Albicans*. It has been shown that with the same thickness, Ta-Cu coatings are better suited to protect the endoprosthe-sis from microbial infections than Nb-Cu coatings.*

Keywords: magnetron; metals; alloy; coating; copper.

Introduction

In the modern world, metals play an invaluable role in various industries. Medical engineering has become an important area of development in modern metallurgy. The emerging metal processing technologies have given a powerful impetus to innovations in this industry. One of them is based on the emergence of five-axis machines and carbide tools based on tungsten carbide. The second is associated with the emergence of additive technologies based on principles that are completely new to metallurgy.

The active use of metals and their alloys as materials for implantation is due to their high strength and load-bearing capacity. They are commonly used to replace some load-bearing applications, such as hip joints, plates, knee prostheses, pins, dental materials,

screws and cardiovascular applications [1]. At the same time, metal implants do not always fully meet the requirements of corrosion resistance. The destruction of a metal implant occurs at the implant-tissue interface due to poor adhesion at the interface, which leads to the formation of a non-adhesive layer and movement at the tissue-implant interface. Chemically inert platinum and gold are expensive, so a special role is given to rare metals and alloys based on them. Ti alloys, which do not contain any cytotoxic elements, are considered promising. Among the important mechanical properties, special attention is paid to alloys with low Young's modulus to avoid stress shielding after implantation. Many Ti alloys have been developed, consisting of biocompatible elements such as Zr, Nb, Mo and Ta, which have shown excellent mechanical properties and low Young's modulus [2]. In order to reduce the cost of products, low-cost alloys are being developed that have a minimum amount of rare earth elements such as Ta, Nb, Mo and W, which tend to be partially replaced by Fe, Mn, Sn and Si.

Titanium alloy Ti-6Al-4V is one of the most widely used in medical implants due to its excellent biocompatibility, good fatigue strength and low Young's modulus, as well as its weight, which is almost half that of stainless medical steel. Commonly used titanium alloys are divided into three main categories: alpha and near-alpha/alpha+beta/beta and near-beta. Another popular multi-component titanium alloy is the Ti-6Al-7Nb variant. This is an α - β alloy originally developed for orthopedics, which has excellent mechanical properties compared to pure Ti [3]. This alloy with niobium is resistant to corrosion, and its biological properties are acceptable due to the absence of vanadium.

The disadvantage of the Ti-6Al-4V alloy is microbial colonization on its surface, as well as the release of toxic aluminum and vanadium metals into the surrounding tissues, therefore, research on improving the anti-corrosion and antibacterial properties of the Ti-6Al-4V alloy is currently a serious problem. To prevent these phenomena, multifunctional coatings with bactericidal and barrier-protective properties are used [4]. The use of magnetron sputtering of protective coatings on the surface of implants and other medical products can create a solution to this problem. Coatings obtained by magnetron sputtering in a vacuum have high purity indicators, which is especially important for medical products. Magnetron sputtering is a flexible technology that allows you to control the sputtering process and obtain coatings with specified physical properties.

The article [5] reports the antibacterial effect of titanium and copper (Ti-Cu) thin films obtained by three different plasma-assisted magnetron sputtering methods: direct current magnetron sputtering (dc-MS), dual magnetron sputtering (dual-MS), and dual high-power pulsed magnetron sputtering (dual-HiPIMS). The antimicrobial effect is due to the release of copper from the Ti-Cu metallic films, which was measured by atomic absorption spectroscopy. The aim of this study is to obtain single-layer two-component Cu-Ta and Cu-Nb coatings of different thicknesses on Ti-6Al-4V titanium alloy substrates.

Materials and methods

Magnetron sputtering of Cu-Ta and Cu-Nb coatings on titanium alloy disks was performed using an EPOS-PVD-440 setup (EPOS-Engineering, Russia) equipped with

three direct current magnetrons (magnetron-479, Beams&Plasmas) and an II-400 ion source (Beams&Plasmas, Russia). The targets were made of pure copper, tantalum and niobium and had the following dimensions: 472×132×18. Monolayer coatings were sputtered using simultaneous co-sputtering of two direct current magnetrons. The modes and conditions of magnetron sputtering were as follows: argon was used as the working gas; the flow rate of the working gas (argon) was 62 ml/min; the base pressure in the chamber was $7 \cdot 10^{-6}$ mbar; the working pressure in the chamber was $2 \cdot 10^{-3}$ mbar. The distance H from each of the targets to the substrate was the same – 210 mm (Figure 1).

The Cu-Ta and Cu-Nb coatings were deposited for 90 and 180 minutes to obtain coatings 2 and 10 μm thick, respectively. The modes for Cu-Ta coatings were: For a tantalum target, the discharge current was 3.0 A; discharge voltage was 315 V. For a copper target, the discharge current was 0.6 A; discharge voltage was 400 V. The modes for Cu-Nb coatings were: For a niobium target, the discharge current was 3.0 A; discharge voltage was 285 V. For a copper target, the current was 0.6 A; discharge voltage – 374 V. Titanium alloy Ti-6Al-4V was used as a substrate, in the form of rods in the delivery condition with a diameter of 10 mm, from which disks with a thickness of 2 mm were cut on a CTX 510 ecoline CNC machine (DMG MORI AG, Germany).

Immediately before magnetron sputtering, the samples were cleaned in distilled water in a Stegler 22DT ultrasonic bath (Shenzhen Bestman Instrument Co., Ltd., China) for 30 minutes and dried in air for 40-60 minutes, then cleaned with an II-400 ion source (Beams&Plasmas, Russia) installed in the vacuum chamber of the magnetron setup, with the following parameters: base pressure in the chamber - $7 \cdot 10^{-6}$ mbar; working pressure in the chamber - $1.8 \cdot 10^{-3}$ mbar; working gas flow rate (argon) - 124 ml/min; discharge voltage - 280 V, discharge current - 1.7 A, distance from the ion source to the sample - 350 mm; processing time - 20 minutes, after which magnetron sputtering was carried out.

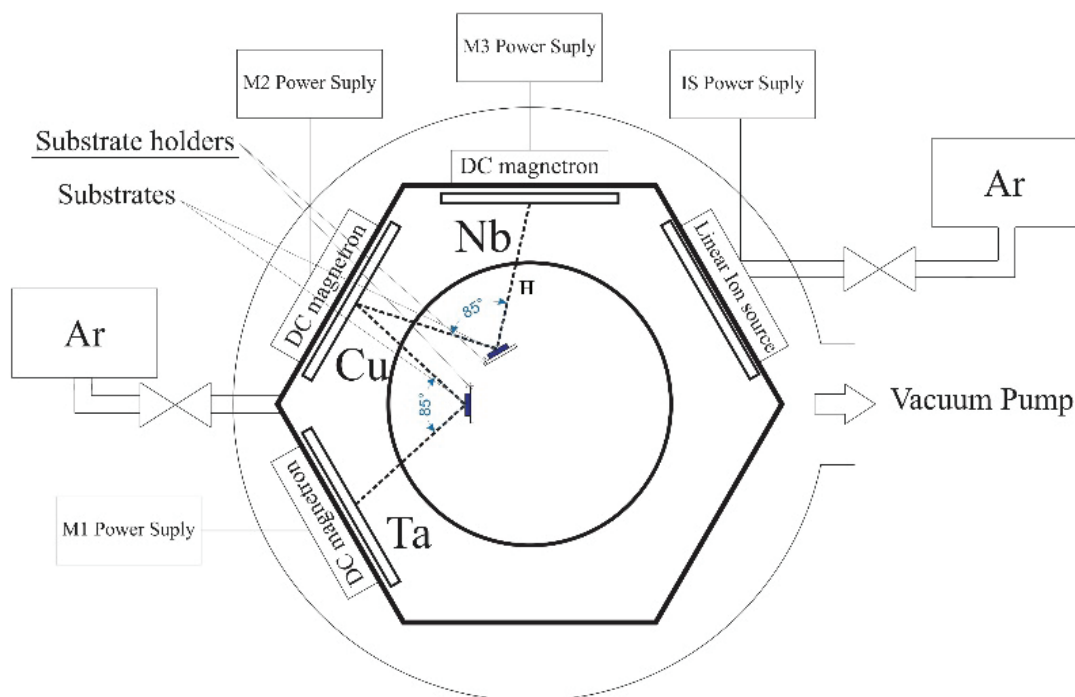


Figure 1 – Experimental setup diagram

The effectiveness of the obtained protective copper coatings was assessed using the example of the impact of two types of bacteria:

- Staphylococcus aureus (latin name Staphylococcus aureus, hereinafter referred to as S. Aureus) is a type of spherical gram-positive bacteria from the genus Staphylococcus;
- Candida albicans (latin name hereinafter referred to as C. Albicans) is a diploid fungus (a form of yeast-like fungi). The antimicrobial activity of the samples against C. Albicans and S. Aureus strains was determined as follows:

1) The test strains were initially cultured in meat-peptone broth (MPB). MPB is a nutrient medium used in microbiology for culturing microorganisms. It is prepared from meat extract, water, peptone and sodium chloride. The finished MPB is a transparent, light yellow liquid.;

2) incubated at 37°C for 24 hours in a thermostat;

3) a fresh suspension was prepared with a cell concentration of $3 \cdot 10^{-7}$ colony-forming units per ml (CFU ml⁻¹) for Staphylococcus aureus and $1 \cdot 10^{-6}$ CFU ml⁻¹ for Candida albicans. These concentrations correspond to the bacterial turbidity standard of 0.5 according to McFarland;

4) the resulting suspension was evenly distributed in the form of a «ga-zone» over the surface of a Petri dish containing 0.1 ml of a nutrient medium - meat-peptone agar (MPA), using a sterile microbiological spatula. MPA is a general-purpose medium that is non-selective and suitable for cultivating a wide range of undemanding microorganisms.

Results and discussion

It is known that titanium alloy VT6 belongs to the titanium – aluminum (6%) – vanadium (4%) system [6]. Chemical composition of grade VT6 in % according to GOST 19807-91: Ti (titanium) 86.45-90.9; Fe (iron) up to 0.6; C (carbon) up to 0.1; Si (silicon) up to 0.1; V (vanadium) 3.5-5.3; N (nitrogen) up to 0.05; Al (aluminum) 5.3-6.8; Zr (zirconium) up to 0.3; O (oxygen) up to 0.2; H (hydrogen) up to 0.015. It is a deformable two-phase $\alpha+\beta$ alloy, where α is a solid solution of aluminum (and vanadium) in α -Ti with an hcp lattice; β – solid solution of aluminum (and vanadium) in β -Ti with a bcc lattice Titanium is a polymorphic metal. Alloying the VT6 alloy with aluminum strengthens and stabilizes the α -phase, increases the Ac3 temperature, and reduces the specific gravity of the alloy. Vanadium is a β -stabilizer. It reduces the temperature of the $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ -transition, which for the VT6 alloy is 960–1000 °C. The Ti6Al4V alloy is the most common titanium alloy, has excellent mechanical properties, and is considered the strongest and toughest titanium alloy [7]. Titanium alloy VT6 belongs to the Ti-Al-V system alloys, the most important ternary system underlying most industrial general-purpose titanium alloys. In this case, aluminum provides high strength and heat resistance, and vanadium, in addition, increases ductility. The results of the study of the antimicrobial activity of the titanium alloy after applying a copper coating of varying thickness are presented in Tables 1 and 2. The efficiency of the obtained Ta-Cu and Nb-Cu coatings was assessed using the example of suppressing the growth of bacterial strains of various natures. According to the data in Table 1, when obtaining a coating 2 μm thick, an inhibition zone of more than 20 mm is observed on the Ta-Cu sample, while there is no inhibition on the Nb-Cu sample, as well as on the control sample.

Table 1 – Zones of growth inhibition of two-day test cultures of S. Aureus bacteria

Samples of tests	Inhibition zones, mm
Ta-Cu 2 μm	20.010
Ta-Cu 10 μm	24.010
Nb-Cu 2 μm	0
Nb-Cu 10 μm	25.0
Control PP	No inhibition

Table 2 – Zones of growth inhibition of two-day test cultures of *C. Albicans*

Samples of tests	Inhibition zones, mm
Ta-Cu 2 мкм	12,0
Ta-Cu 10 мкм	17,0
Nb-Cu 2 мкм	0
Nb-Cu 10 мкм	15,5
Control PP	No inhibition

Photographic visualization of the growth of test bacterial strains on metal disks with the coatings under study, including images of the control polypropylene (PP) disk, is shown in Figure 2.

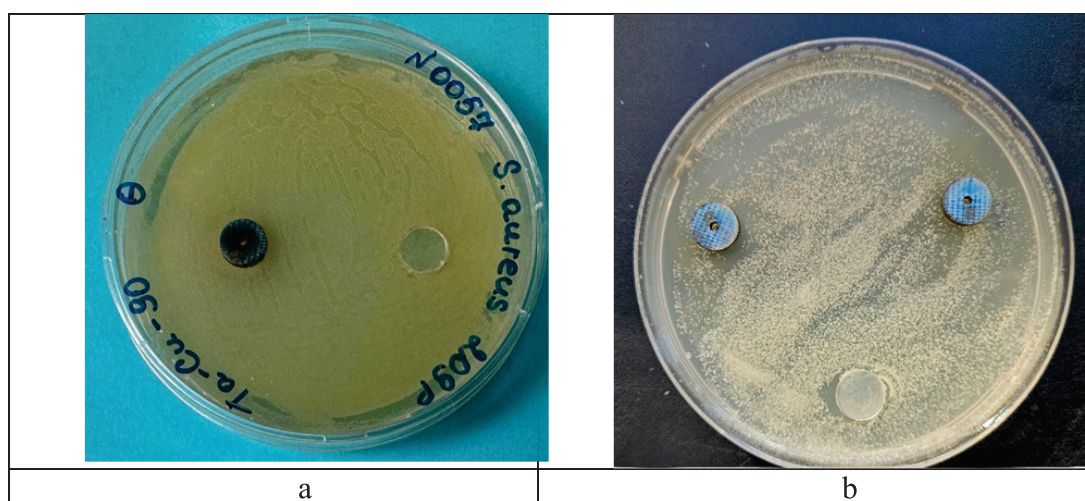


Figure 2 - Ta-Cu coating on a Ti-6Al-4V alloy disc and a control poly-propylene disc in a nutrient solution of *S. Aureus* (a) and *C. Albicans* (b)

The *Staphylococcus aureus* inhibition zones observed in this experiment for the 10 μm coatings were up to 24.0 mm for Ta-Cu and up to 25.0 mm for Nb-Cu. For the 2 μm coatings, the *Staphylococcus aureus* inhibition zones were up to 20 mm for Ta-Cu and 0 mm for Nb-Cu. For *Candida albicans*, the 2 μm Ta-Cu coatings showed a significant antifungal effect, creating a delayed inhibition zone up to 12 mm long. The 10 μm Ta-Cu coatings were even more effective, with inhibition zones ranging from 13.0 to 17.0 mm. The 10 μm Nb-Cu coatings showed a moderate antifungal effect against *Candida albicans* strains, creating a delayed inhibition zone up to 15.5 mm long. Nb-Cu coatings with a thickness of 2 μm did not exhibit any antifungal activity against *Candida albicans*.

The results of the study of the Ti-Al-V surface morphology after the study on the effect of *S. Aureus* bacterial strains using scanning electron microscopy are presented in Figure 3.

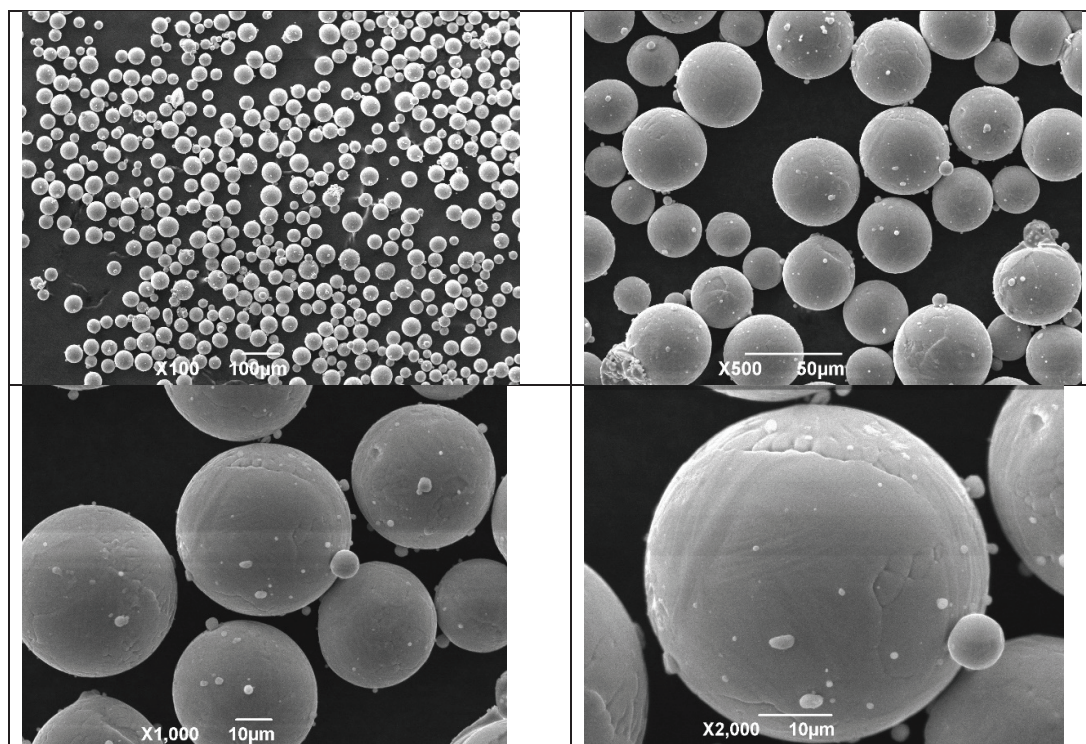


Figure 3 – Scanning electron microscope images of the Ti-Al-V alloy sample surface with magnification varied in the range from 100 to 2000x

The images of the titanium alloy sample surface are shown with magnification varied in the range from 100 to 2000x. It is evident that the particle size varied with different magnifications from 10 to 100 μm , and the surface of the studied samples is represented by spherical concretions with ideally balanced loads. The influence of the protective coating thickness on the degree of bacterial growth during longer exposure to an aggressive environment will be continued and presented in the following publications of these authors.

Financing information

This study is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan within the framework of the implementation of BR24992786 Development of technology for manufacturing samples of domestic medical instruments and medical products

Conclusion

The results of the study of the surface morphology of Ti-6Al-4V alloy with applied antibacterial coatings in the form of Cu-Nb and Cu-Ta of different thicknesses on substrates made of biomedical titanium alloy are shown. The properties with respect to *Staphylococcus aureus* and *Candida albicans* (in vitro) for the applied coatings were assessed. Comparison of the inhibition zones of *Staphylococcus aureus* bacteria observed in this experiment for coatings with a thickness of 10 μm : up to 24.0 mm for Ta-Cu and up to 25.0 mm for Nb-Cu showed that for coatings with a thickness of 2 μm the inhibition zones were up to 20 mm for Ta-Cu and 0 for Nb-Cu. Ta-Cu coatings with a thickness

of 2 microns effectively inhibited the growth of bacteria up to 20.0 mm and fungi up to 12.0 mm, while Nb-Cu coatings of the same thickness did not have an inhibitory effect on either bacteria or fungi. Part of the study was previously described in detail in the authors' previous work in [8]. The obtained results are consistent with the results of [9, 10], and are promising for the development of technologies for obtaining coatings for medical implants with increased bactericidal and biocompatible surface properties.

REFERENCES

- 1 **Wilson, J.** Metallic biomaterials: State of the art and new challenges. In *Fundamental Biomaterials: Metals*; Woodhead Publishing Series in Biomaterials; Woodhead Publishing: Shaston, UK. – 2018. – P. 1–33. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102205-4.00001-5>.
- 2 **Gepreel, M. A-H., Niinomi, M.** Biocompatibility of Ti alloys for long term implantation. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 20 (2013) 407-415; <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.11.014>.
- 3 **Nicholson, J. W.** Titanium Alloys for Dental Implants: A Review. *Prosthesis* 2, 2020. – P. 100–116; <https://doi.org/10.3390/prosthesis2020011>.
- 4 **Liu, W., Liu, S., Wang, L.** Surface Modification of Biomedical Titanium Alloy: Micromorphology, Microstructure Evolution and Biomedical Applications. *Coatings* 9, 2019. – P. 249. – <https://doi.org/10.3390/coatings9040249>.
- 5 **Stranak, V., Wulf, H., Rebl, H., Zietz, C., Arndt, K., Bogdanowicz, R., Nebe, B., Bader, R., Podbielski, A., Hubicka, Z., Hippler, R.** Deposition of thin titanium–copper films with antimicrobial effect by advanced magnetron sputtering methods (V. Stranak et al. / *Materials Science and Engineering*. – P. 31. – 2011. – P. 1512–1519. – <https://doi.org/10.1016/j.msec.2011.06.009>.
- 6 **Dmitriyeva, M. O., Mel'nikov, A. A., Nosova, Ye. A., Kyarimov, R. R., Krzhevitskiy, G. Ye.** Issledovaniye formirovaniya mikrostruktury titanovogo splava VT6 pri izgotovlenii kryl'chatki kompressora malorazmernogo gazoturbinnoyego dvigatelya metodami additivnykh tekhnologiy // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. – 2023. – T. 30. – № 2. – P. 196–203. – <https://doi.org/10.34759/vst-2023-2-196-203>.
- 7 **Lekarev, A. V., Yurchuk, L. I., Merkulova, G. A.** [Study of the influence of alphonon on the structure and properties of the alloy BT6]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 589–604. – <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2023-24-3-589-604>.
- 8 **Azamatov, B. N., Borisov, A.A., Dzhes, A.V., Kaliyev, D., Maratuly, B.** Antibakterial'nyye svoystva monosloynnykh pokrytiy Cu-Nb i Cu-Ta, nanesennykh na biomeditsinskiy splav Ti-6Al-4V metodom magnetronnogo raspyleniya // *Tvorchestvo molodykh – innovatsionnomu razvitiyu Kazakhstana: Materialy KH Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, doktorantov i molodykh uchenykh*, 11, 12 aprelya 2024 g. – Öskemen: SHK,TU, 2024. – Í b. – P. 8 – 13 (In Russia).

9 **Ke, D., Vu, A. A., Bandyopadhyay, A., Bose, S.** Compositionally graded doped hydroxyapatite coating on titanium using laser and plasma spray deposition for bone implants. *Acta Biomater* 84. – 2019. – P. 414–423. – <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.11.041>.

10 **Ataee, A., Li, Y., Wen, C.** A comparative study on the nanoindentation behavior, wear resistance and in vitro biocompatibility of SLM manufactured CP–Ti and EBM manufactured Ti64 gyroidscaffolds. *Acta Biomaterialia*. – 97. – 2019. – P. 587–596 <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.08.008>.

REFERENCES

1 **Wilson, J.** Metallic biomaterials: State of the art and new challenges. In *Fundamental Biomaterials: Metals*; Woodhead Publishing Series in Biomaterials; Woodhead Publishing: Shaston, UK. – 2018. – P. 1–33. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102205-4.00001-5>.

2 **Gepreel, M. A-H., Niinomi, M.** Biocompatibility of Ti alloys for long term implantation. *J. Mech. Behav. – Biomed. – Mater.* – 20. – 2013. – P. 407–415. – <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.11.014>.

3 **Nicholson J. W.** Titanium Alloys for Dental Implants: A Review. *Prosthesis* 2. – 2020. – P. 100–116. – <https://doi.org/10.3390/prosthesis2020011>.

4 **Liu W., Liu S., Wang L.** Surface Modification of Biomedical Titanium Alloy: Micromorphology, Microstructure Evolution and Biomedical Applications. *Coatings* 9. – 2019. – 249. – <https://doi.org/10.3390/coatings9040249>.

5 **Stranak V., Wulf H., Rebl H., Zietz C., Arndt K., Bogdanowicz R., Nebe B., Bader R., Podbielski A., Hubicka Z., Hippler R.** Deposition of thin titanium–copper films with antimicrobial effect by advanced magnetron sputtering methods (V. Stranak et al. / *Materials Science and Engineering*. C 31. – 2011. – P. 1512–1519. – <https://doi.org/10.1016/j.msec.2011.06.009>.

6 **Дмитриева, М. О., Мельников, А. А., Носова, Е. А., Кяримов, Р. Р., Кржевицкий, Г. Е.** Исследование формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при изготовлении крыльчатки компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя методами аддитивных технологий // *Вестник Московского авиационного института*. – 2023. – Т. 30. – № 2. – С. 196–203. – <https://doi.org/10.34759/vst-2023-2-196-203>.

7 **Lekarev A. V., Yurchuk L. I., Merkulova G. A.** [Study of the influence of alphoning on the structure and properties of the alloy ВТ6]. *Siberian Aerospace Journal*. – 2023. – Vol. 24. – № 3. – P. 589–604. – <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2023-24-3-589-604>.

8 **Азаматов Б. Н., Борисов А.А., Джес А.В., Калиев Д., Маратұлы Б.** Антибактериальные свойства монослойных покрытий Cu-Nb и Cu-Ta, нанесенных на биомедицинский сплав Ti-6Al-4V методом магнетронного распыления // *Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана: Материалы X Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов,*

докторантов и молодых ученых, 11, 12 апреля 2024 г. – Өскемен: ШҚТУ, 2024. – I б. – С. 8–13.

9 Ke, D., Vu, A. A., Bandyopadhyay, A., Bose, S. Compositionally graded doped hydroxyapatite coating on titanium using laser and plasma spray deposition for bone implants. *Acta Biomater* 84. – 2019. – P. 414–423. – <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.11.041>.

10 Ataee, A., Li Y., Wen, C. A comparative study on the nanoindentation behavior, wear resistance and in vitro biocompatibility of SLM manufactured CP–Ti and EBM manufactured Ti64 gyroidscaffolds. *Acta Biomaterialia*. – 97. – 2019. – P. 587–596. – <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.08.008>.

Received 23.11.24.

Received in revised form 24.11.24.

Accepted for publication 25.11.24.

Б. Н. Азаматов¹, П. С. Варбанов², *М. А. Саденова³,

⁴А. А. Борисов, ⁵Б. Маратұлы

^{1,3,4,5}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

²Széchenyi István университеті, Венгрия, Дьер қ.

23.11.24 ж. баспаға түсті.

24.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

25.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

МЫС ҚҰРАМЫ ТҮРЛІ ТҮРЛІ ТІ-6АІ-4V ҚОРЫМАСЫНА МАГНЕТРОНДЫҚ ЖАБЫНУ АЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

*Қазіргі әлемде металдар әртүрлі салаларда баға жетпес рөл атқарады. Медициналық машина жасау қазіргі металлургияның маңызды даму саласына айналды. Ti-6Al-4V қорытпасының кемшілігі оның бетіндегі микробтардың колонизациясы, сондай-ақ қоршаған тіндерге улы алюминий мен ванадий металдарының бөлінуі болып табылады, сондықтан Ti6Al4V қорытпасының коррозияға қарсы және бактерияға қарсы қасиеттерін жақсарту бойынша зерттеулер қазіргі уақытта күрделі мәселе болып табылады. мәселе. Си, Nb, Та таза металдардан жасалған нысаналарды біріктіріп бүркі арқылы магнетронды шашырату арқылы Си-Та және Си-Nb негізіндегі екі компонентті металл жабындары алынды. Қалыңдығы 10 микрон болатын жабындар екі күндік сынақ барысында микробқа қарсы әсердің басқа дәрежесін көрсеткені анықталды: Та-Си жабынының максималды тежелу аймағы *S. Aureus* үшін 24,0 мм-ге және *S. Albicans* үшін 17,0 мм-ге жетті. Қалыңдығы 10 микрон болатын Nb-Си жабыны үшін максималды тежеу аймағы *S. Aureus* үшін 25,0 мм-ге және *S. Albicans* үшін 15,5 мм-ге жетті. Дәл осындай қалыңдықтағы Та-Си жабындары Nb-Си жабындарына қарағанда эндопротезді микробтық инфекциялардан қорғауға жақсырақ болатыны көрсетілді.*

Кілтті сөздер: магнетрон; металдар; қорытпа; жабын; мыс.

Б. Н. Азаматов¹, П. С. Варбанов², *М. А. Саденова³,

⁴А. А. Борисов, ⁵Б. Маратулы

^{1,3,4,5}«Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск

²университет Иштвана Сечени, Венгрия, г. Дьёр

Поступило в редакцию 23.11.24.

Поступило с исправлениями 24.11.24.

Принято в печать 25.11.2024.

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНЕТРОННОГО ПОКРЫТИЯ НА СПЛАВЕ Ti-6Al-4V С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕДИ

*В современном мире металлы играют неоценимую роль в различных отраслях промышленности. Медицинская техника стала важным направлением развития современной металлургии. Недостатком сплава Ti-6Al-4V является микробная колонизация на его поверхности, а также выделение в окружающие ткани токсичных металлов алюминия и ванадия, поэтому исследования по улучшению антикоррозионных и антибактериальных свойств сплава Ti6Al4V в настоящее время являются серьезной проблемой. Двухкомпонентные металлические покрытия на основе Cu-Ta и Cu-Nb были получены методом магнетронного распыления с совместным распылением мишеней из чистых металлов Cu, Nb, Ta. Установлено, что покрытия толщиной 10 мкм продемонстрировали различную степень антимикробной эффективности в течение двух суток испытаний: максимальная зона ингибирования покрытия Ta-Cu достигала 24,0 мм для *S. Aureus* и 17,0 мм для *C. Albicans*. Для покрытия Nb-Cu толщиной 10 мкм максимальная зона ингибирования достигала 25,0 мм для *S. Aureus* и 15,5 мм для *C. Albicans*. Показано, что при одинаковой толщине покрытия Ta-Cu лучше подходят для защиты эндопротеза от микробных инфекций, чем покрытия Nb-Cu.*

Ключевые слова: магнетрон; металлы; сплав; покрытие, медь.

***Г. Е. Ахметова¹, Е. А. Панин², А. В. Кудря³, К. Туысхан⁴**

^{1,2,4}Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау

³МИСиС ғылым және технологиялар университеті, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8244-5027>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6830-0630>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4272-2637>

*e-mail: agulzhajnat@bk.ru

КЕСКІНДЕРДІ БИНАРИЗАЦИЯЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ СЫНАУ

Бұл мақалада қолданыстағы бинаризациялау кескіндерін талдау әдістері ұсынылған. Қазіргі ғалымдар жасаған бинаризациялау кескіндердің әртүрлі әдістерін анықтау және сипаттау бойынша деректер жүйеленген. Зерттеудің мақсаты болаттың құрылымдық маркаларының үлгілері мысалында металдар мен қорытпалардың микроқұрылымдарының кескіндерін бинаризациялаудың оңтайлы әдістерін анықтау және заманауи бинаризациялау әдістерін сынау болды. Бинаризациялаудың келесі әдістері қарастырылады: орташа әдісімен бинаризациялау, С-тәрізді қисық арқылы бинаризациялау, Оңу (Отса немесе Отсу) әдісі, мульти-Оңу әдісі, адаптивті бинаризациялау, жергілікті бинаризациялау әдісі, медиана әдісі, Niblack алгоритмі, Sauvola әдісі және Bernsen әдісі. Осы бинаризациялау әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері сипатталған. Ақпараттық-цифрлық металлографиялық талдауда одан әрі қолдану мақсатында құрылымдық болат үлгілерінің мысалында болаттар мен қорытпалардың микроқұрылымдарының кескіндерін өңдеу үшін бірқатар қолданыстағы бинаризациялау әдістемелерін қолданып сынақтан өткізілген. Бинаризациялаудың әртүрлі әдістерін қолдана отырып, алынған кескіндердің сапасы бойынша зерттеу нәтижелері ұсынылған. Болаттар мен қорытпаларды ақпараттық-цифрлық талдауда одан әрі қолдану мақсатында болаттардың микроқұрылымдарының кескіндерін бинаризациялаудың ең қолайлы оңтайлы әдістері анықталды. Зерттеулер металдар мен қорытпаларды металлографиялық талдау әдістерін одан әрі цифрландыру үшін перспективалы болып табылады.

Кілтті сөздер: бинаризациялау, кескін, болат, құрылым, ақпараттық-цифрлық талдау.

Кіріспе

Металл сапасын бақылаудың негізгі түрлерінің бірі металл сапасын құрылымы бойынша бақылау болып табылады, өйткені металл құрылымы металдың механикалық қасиеттерінің соңғы кешеніне жауапты негізгі көрсеткіштердің бірі болып табылады. Металл құрылымының бақылау көрсеткіштерінің негізі ретінде

түйіршіктердің өлшемдері (түйіршіктің баллы), оның біркелкілігі (түйіршіктердің созылуының және жолақтардың немесе сызықтардың болмауы), металл емес қосындылар мен карбидтердің (немесе нитридтердің) болуы болып табылады. Көрсетілген параметрлерді бақылау әдістемесі келесі МЕМСТ-да тиісті шетелдік аналогтармен бірге ұсынылған: 5639-82; 1778-70; 54570-2011; 21073-75 және R ISO 643-2015. Барлық әдістердің негізінде оптикалық немесе сканерлеуші (растрлық) микроскоп арқылы алынған металл құрылымдарының кескіндерімен (микрофотосуреттермен) жұмыс істеуге негізделген.

Оператор-бақылаушылардың субъективті қол еңбегінен құрылымды бейнелеу бойынша металл сапасын бақылаудың автоматтандырылған цифрлық форматына көшуді қамтамасыз ету мақсатында жұмыс авторлары металдар мен қорытпалардың құрылымдарын ақпараттық-цифрлық талдау әдістемесін әзірледі. Бұл бақылауды жүзеге асыру үшін негізгі шарт металл құрылымының барабар цифрлық кескінін алу және өңдеу болып табылады, мұнда кескін қарқындылығы функциясы екі айнымалының математикалық функциясы ретінде қарастырылады. Осы шартты сақтай отырып, компьютерлік бағдарламалық қамтамасыз етудің барлық математикалық аппаратын, оның ішінде Matlab-ты қолдану мүмкіндіктері ашылады.

Бинарлық морфология (бинаризарлық кескін) кез-келген математикалық талдауға мүмкіндік береді. Тиісінше, металл құрылымының дәстүрлі кескінін толық түсті немесе сұр реңкті қара-ақ форматқа аударған кезде кескіндік сандық математикалық талдау мүмкін болады. Осы мақсаттар үшін бинаризациялау процедурасы қолданылады.

Құрылымдардың кескіндерін бинаризациялау – бұл қараңғы және ашық пикселдерден тұратын бинарлық (екі түсті: қара пен ақ) кескінге құрылымдардың түрлі-түсті немесе сұр микрофотосуреттер (кескіндерін) аудару процедурасы. Бинаризациялау процесіне дейін микроскоптан алынған толық түсті (түрлі түсті) кескінді сұр реңктерге аудару операциясы жасалады.

Әртүрлі нысандарды іздеу, сәйкестендіру, қадағалау және бақылау сияқты процедураларда компьютерлік көру операцияларын кеңінен қолдану мен енгізуді ескере отырып, бинаризациялау әдістерін әзірлеу мен жетілдірудің үлкен қажеттілігі туындады.

Сонымен, компьютерлік көру аясында бинаризациялау объектінің шекараларын және оның пішінін дәл анықтау процесі болып табылады. Осылайша, дұрыс бинаризациялау механизмін таңдап алған өлшеу нәтижелерінің дәлдігін қамтамасыз етеді. [1,2].

Материалдар мен әдістер

Зерттелетін материалдар ретінде сынама дайындаудан өткен конструкциялық болат маркаларының болат үлгілері болды. Сынама дайындау үлгіні престеу, сондай-ақ оны тегістеу, жылтырату және улау операцияларынан тұрды. Үлгіні престеу SimpliMet 1000 (Buehler) престеу машинасында жүргізілді. Тегістеуге дайын үлгі Struers TegraPol-11 құрылғысында тегістелді және жылтыратылды. Микроқұрылымды анықтау үшін этил спирті мен азот қышқылының 3 пайыздық

ерітіндісінен жасалған реактив пайдаланылды. Болаттардың микроқұрылымдарын зерттеу және олардың кескіндерінің микрофотосуреттерін алу JEOL JSM-5910 (Жапония) сканерлеу микроскопының көмегімен жүргізілді. Әрі қарай, сканерлеуші микроскоптың көмегімен алынған микроқұрылымдардың кескіндері болат құрылымдарын ақпараттық-цифрлық талдаудың онтайлы әдісін анықтау үшін әртүрлі бинаризациялау әдістеріне ұшырады.

Нәтижелер және талқылау

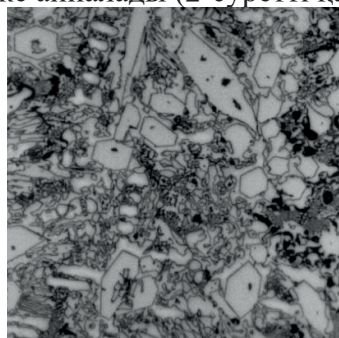
Жалпы, адаптивті бинаризациялау, жаһандық бинаризациялау және нейрондық желілер негізінде кескінді бинаризациялаудың негізгі алгоритмдері анықталды.

Жаһандық бинаризациялау алгоритмінде шекті бет тұрақты жарық шегі бар жазықтық болып табылады және шекті мән бүкіл кескіннің гистограммасын талдау негізінде анықталады және бастапқы кескіннің барлық пикселдері үшін бірдей болады. Жаһандық бинаризациялаудың айтарлықтай кемшілігі бар: біркелкі емес жарықтандыруда кескіннің нашар жарықтандырылған аймақтары мен бүкіл кескін алдыңғы қатарда тұрған сияқты анықталады. Жергілікті бинаризациялау кезінде шекті мән белгілі бір нүкте орналасқан аймақтың белгілі бір белгілеріне негізделген кескіннің белгілі бір нүктесі үшін өзгереді. Мұндай түрлендіру алгоритмінің кемшілігі кескіннің әр нүктесі үшін шекті мәндерді қайта есептеуге байланысты төмен жұмыс жылдамдығы болып табылады.

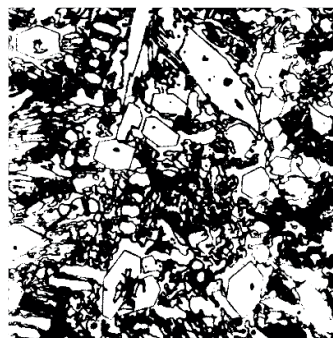
Бинаризациялауға әсер ететін маңызды аспектілерге микрошлифті дайындау сапасы, микрошлифті кескіндеу морфологиясы, үлгіні улаудың жиілігі және микрофототүсірілімнің дәлдігі, сондай-ақ таңдалған микроскоп жатады. 1-суретте сұр реңкті микроскоппен алынған дайындықпен микроқұрылымның кескіні көрсетілген.

Орташа әдіспен бинаризациялау – бұл кескіннің барлық пикселдерінің жарықтығының орташа мәнін таңдауға негізделген ең қарапайым және кең таралған әдісі.

Барлық пикселдердің қарқындылығының белгілі бір орташа мәні анықталады, ал орташа мәннен үлкен қарқындылық ақ түске, ал орташа қарқындылық қара түске айналады (2-суретті қараңыз).



а)

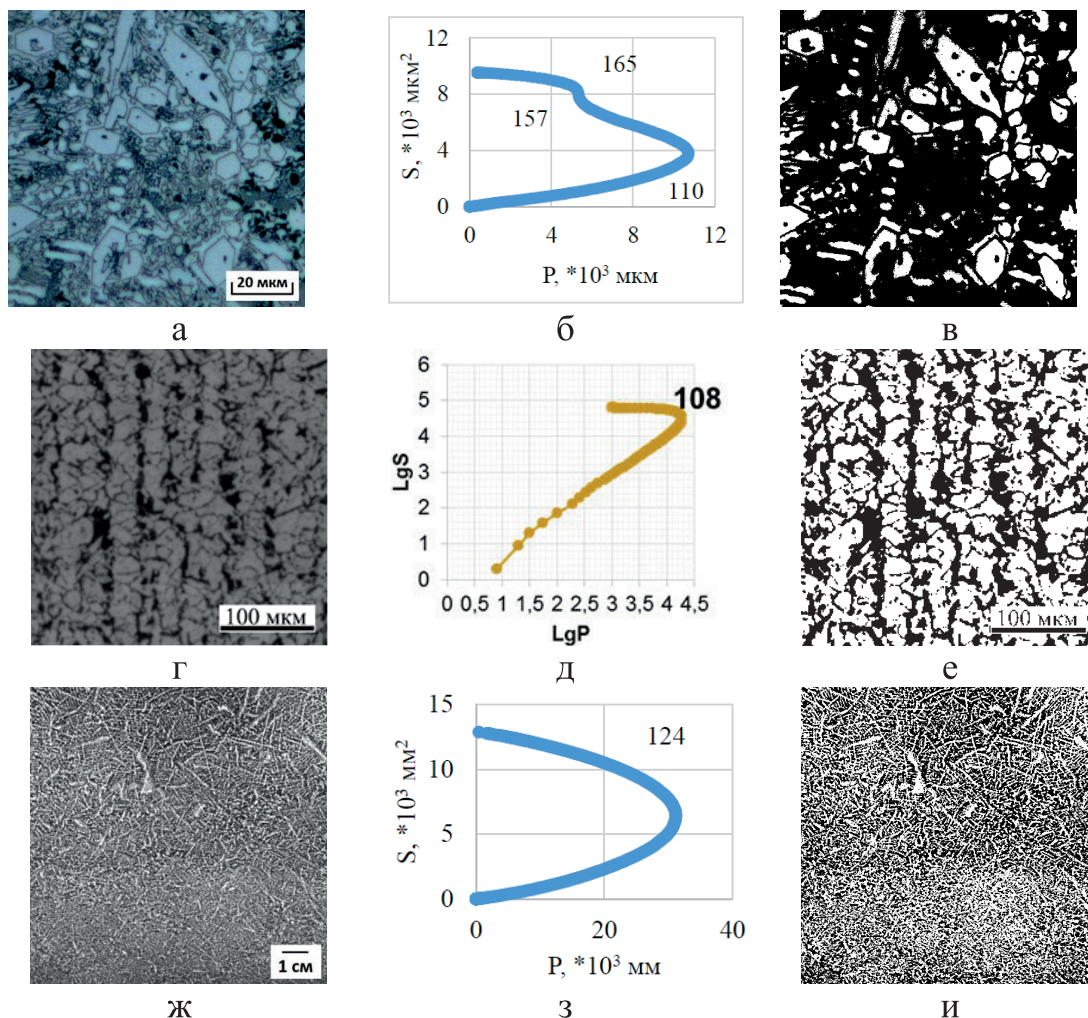


б)

Сурет 1 – а) Сұр реңктердегі дайындықпен
микроқұрылымның кескіні

Сурет 2 – б) Орташа әдіспен бинаризациялау кескіні

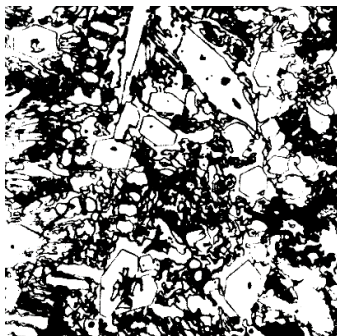
С-тәрізді қисық әдісі – S объектілерінің ауданының олардың P периметріне графикалық тәуелділігі (3-суретті қараңыз), сұрдың бүкіл диапазоны арқылы белгілі бір k қадамымен бинаризациялау шегінің дәйекті өзгеруімен анықталады [3]. Қисықтағы максимум (қисықтың иілу шыңы) бинаризациялаудың критикалық деңгейі болып табылады.



а, г, ж – құрылымдардың бастапқы кескіндері; б, д, з – С-тәрізді қисықтар;
 в, е, и – С-тәрізді қисық әдісімен бинаризацияланған кескіндері;
 Сурет 3 – С-тәрізді қисық әдісімен бинаризацияланған кескіндер

Оцу (Отса немесе Отсу) әдісі үлгіні тану және кескінді өңдеу үшін компьютерлік технологияларда қолданылатын жартылай реңкті кескін үшін бинаризациялау шекті анықтауға мүмкіндік беретін алгоритм болып табылады.

Бұл алгоритм пикселдерді екі санатқа бөлуге мүмкіндік береді – «пайдалы» және «фондық», класс ішіндегі дисперсия минималды болатын шекті есептейді (4-суретті қараңыз).



Сурет 4 – Оцу әдісімен бинаризацияланған кескін

Оцу әдісі класс ішіндегі дисперсияны азайтатын шекті табады. Бұл дисперсия екі класс дисперсияларының өлшенген қосындысы ретінде анықталады:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t) \cdot \sigma_1^2(t) + \omega_2(t) \cdot \sigma_2^2(t) \tag{1}$$

мұнда ω_i – бұл t шегімен бөлінген екі кластың ықтималдығы;
 σ_i^2 – осы кластардың дисперсиясы.

$$\omega_1(t) + \omega_2(t) = 1 \tag{2}$$

$$\tag{3}$$

Оцу класс ішіндегі дисперсияны азайту кластар арасындағы дисперсияны максимизациялауға тең екенін көрсетті:

$$\sigma_b^2(t) = \sigma^2 - \sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t) \cdot [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2 \tag{4}$$

ол ω_i ықтималдығы және μ_i класының арифметикалық орташа мәні арқылы өрнектеледі.

Оцу әдісінің мәні келесідей: сұр ренктердегі G монохромды кескіні бар, оны келесі жолмен талдау керек.

Кескіндердің қарқындылығының әр деңгейі үшін $p(i)$ кескін гистограммасы және $N(i)$ жиілігі есептеледі:

$$N_T = \sum_{i=0}^{\max(G)} p(i) \tag{5}$$

$\omega_1(0)$, $\omega_2(0)$, $\mu_1(0)$, $\mu_2(0)$ бастапқы мәндері анықталады.

Әрбір t - жартылай тон мәні үшін ω_1 , ω_2 , μ_1 , μ_2 жаңа мәндері есептеледі.

$$\omega_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} p(i)}{N_T} = \sum_{i=0}^{t-1} * N(i) \tag{6}$$

$$\omega_2(t) = 1 - \omega_1(t) \tag{7}$$

$$\mu_T = \frac{\sum_{i=0}^{\max(G)} i * p(i)}{N_T} = \sum_{i=0}^{\max(G)} i * N(i) \quad (8)$$

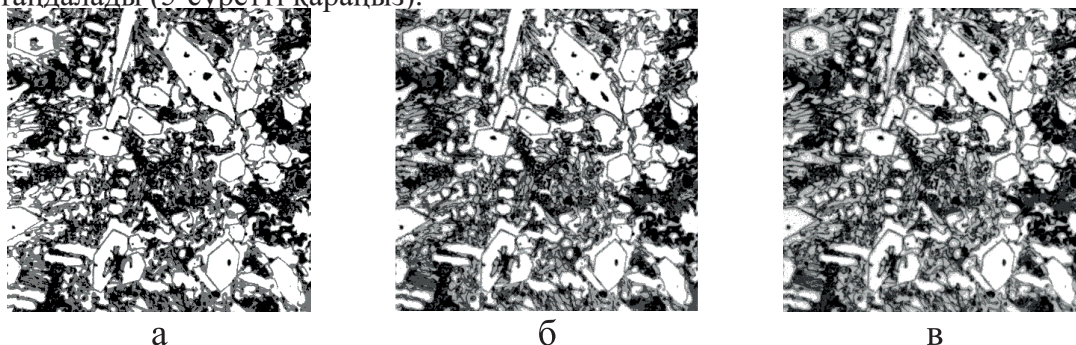
$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} i * p(i)}{N_T * \omega_1(t)} = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} * N(i)}{\omega_1(t)} \quad (9)$$

$$\mu_2(t) = \frac{\mu_T - \mu_1(t) * \omega_1(t)}{\omega_2(t)} \quad (10)$$

Содан кейін, $\sigma_b^2(t)$ есептеледі, ол бастапқы мәнге қатысты үлкен шамада сәйкес t шегіндегі кластар арасындағы дисперсияның максимумы болып табылады [4].

Мульти-Оцу әдісі – кескіннің бірнеше деңгейін ұстап тұруға мүмкіндік беретін Оцу әдісінің жетілдірілген нұсқасы.

Кескінді M кластарына ұқсас бөлуді жүзеге асыру үшін $M - 1$ шегі анықталады $\{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$: $C_1 [1, \dots, t_1]$, $C_2 [t_1 + 1, \dots, t_2]$, ..., $C_i [t_{i-1} + 1, \dots, t_i]$, ..., және $C_M [t_{M-1} + 1, \dots, L]$, оңтайлы шектер $\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\}$ сол схема бойынша σ_b^2 максимизациялау әдісімен таңдалады (5-суретті қараңыз).



а – 3 класс; б – 4 класс; в – 5 класс
Сурет 5 – мульти-Оцу әдісімен бинаризацияланған кескіндер

Адаптивті бинаризациялау (6-суретті қараңыз) сапасыз жартылай тонды кескіндерді (сканерленген кескіндер) өңдеу үшін ұсынылуы мүмкін, мұнда әдеттегі бинаризациялау біркелкі емес фонға байланысты нашар нәтиже береді. Кәдімгі бинаризациялаудан айырмашылығы, онда кескіннің барлық аймақтары пайдаланушы белгілеген бір шекті мәнге бинаризацияланады, адаптивті бинаризациялау кезінде бағдарлама кескіннің әртүрлі аймақтарын талдайды. Нәтижесінде адаптивті бинаризациялаудағы кескінді тегістеу функциясы қосымша сүзгілерді пайдаланбай қанағаттанарлық нәтиже береді.

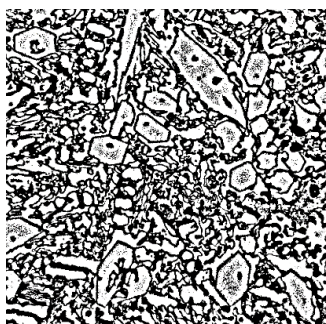
$I(x, y)$ кескіннің әр пикселі үшін келесі алгоритм орындалады:

1. Жеке шекті есептеу T : r радиусы бар пиксель маңында берілген пиксельге тән T шегі есептеледі.

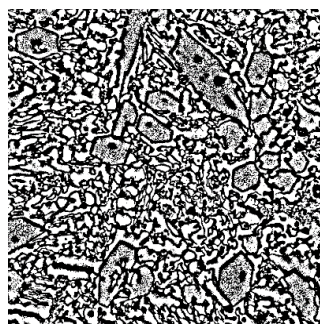
2. Бинаризациялау: Егер $I(x, y)$ пиксель жарықтығының мәні T шегі мен S тұрақтысының қосындысынан асып кетсе, онда нәтижеге 1, әйтпесе 0 мәні беріледі.

Жергілікті бинаризациялаудың қарапайым әдістерінің бірі – орташа әдіс (6-суретті қараңыз). Ол r радиусындағы берілген пиксельдің $(x; y)$ квадрат маңындағы пиксель жарықтығының орташа мәнін анықтайды (жергілікті әдістерге арналған мысалдарда стандартты радиус 15 пайдаланылады).

Медианалық әдіс орташа әдіске ұқсас. Алайда, берілген r радиусы бар пиксельдің $(x; y)$ айналасы үшін орташа арифметикалық мәнің орнына медианалық мән есептеледі, содан кейін бинаризациялау кескіні үшін қолданылады (7-суретті қараңыз).



Сурет 6 – Жергілікті орташа әдісімен бинаризацияланған кескін



Сурет 7 – Жергілікті медианалық әдісімен бинаризацияланған кескін

Сырғымалы шекке негізделген бинаризациялауды таңдаудағы негізгі мәселе жарықтылық гистограммасын құру үшін оңтайлы көршілес өлшемді анықтау. Егер бұл параметр дұрыс таңдалмаса, фондық пикселдердің бинаризациялауына байланысты жалған нысандар пайда болуы мүмкін, олардың айналасына нақты объектілердің пикселдері кірмейді.

Мұндай жалған нысандарды сегменттеу кезеңінде олардың кездейсоқ сипатына байланысты алып тастауға болатынына қарамастан, көршілес аймақтың оңтайлы өлшемін таңдау көбінесе нақты жағдайлардың өкілі болып табылатын сынақ кескіндерін қолдана отырып, эксперименттік тәсілді қажет етеді.

Бинаризациялаудың мамандандырылған әдістері бар, олар әрдайым толық болмаса да, шу мен жалған заттардың пайда болуын азайтуға мүмкіндік береді. Бұл әдістер әр әдіске тән нақты коэффициенттері бар теңдеуге қосымша терминдер қосу арқылы стандарттыдан ерекшеленеді. Дәл осы айырмашылықтар оларға басқа негізгі әдістерден артықшылық береді.

Niblack алгоритмі ең танымал жергілікті бинаризациялау әдістерінің бірі болып табылады [5]. Бұл әдістің мәні жергілікті стандартты ауытқу негізінде кескін жарықтығының шекті мәнін нүктеден нүктеге динамикалық өзгерту арқылы анықтау болып табылады (8-суретті қараңыз).

(x, y) координаттары бар нүкте үшін жарықтық шегін есептеу келесі формула 11 бойынша жүзеге асырылады:

$$B(x, y) = \mu(x, y) + k * s(x, y) \quad (11)$$

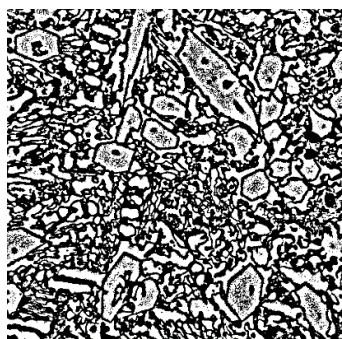
мұнда $\mu(x, y)$ – орташа, ал $s(x, y)$ – кейбір үшін үлгінің орташа квадраттық ауытқуы көршілік нүктелері.

Жергілікті адаптивті бинаризациялаудың Niblack әдісі кескінді өңдеудің жоғары жылдамдығын қамтамасыз ететін іске асырудың қарапайымдылығымен сипатталады. Бұл әдіс жоғары шу мен жарықтылықтың тегіс ауысулары жоқ кескіндердегі контрастты объектілерді жылдам таңдау үшін практикалық тапсырмаларда қолданылады.

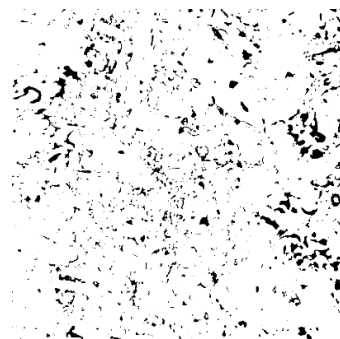
Диафрагманың оңтайлы өлшемін шудың әсерін азайта отырып, жергілікті кескін бөлшектерінің сақталуын қамтамасыз ететіндей таңдау керек. k параметрі объектінің өзі ретінде жіктелетін объект шекарасының үлесін анықтайды. $k=-0,2$ мәні қара нысандардың тиімді бөлінуін қамтамасыз етеді, ал $k=+0,2$ мәні ақ нысандар үшін жарамды [6].

Тегіс жарықтық ауысулары бар жерлерде әдіс жалған, төмен шу объектілеріне әкелуі мүмкін. Тәжірибеде әдістің кең таралуы оның кейінгі өңдеу кезеңімен интеграциялануына байланысты, ол өңдеу жылдамдығын үш есе төмендетсе де, қателер санын 20% - ға азайтуға мүмкіндік береді [7].

Sauvola әдісі – Niblack әдісінің жетілдірілген нұсқасы, ол шудың объектіге әсерін болдырмауға және оның фондық таңдауының дәлдігін арттыруға бағытталған (9-суретті қараңыз).



Сурет 8 – Niblack жергілікті әдісімен бинаризацияланған кескін



Сурет 9 – Sauvola жергілікті әдісімен бинаризацияланған кескін

Әдіс негізінен R радиусы бар концентрлі терезені пайдаланып кескінді өңдеуге негізделген, ол әдетте шаршы пішінді. Терезе кескіннің бойымен солдан оңға және жоғарыдан төменге қарай дәйекті түрде жылжиды, бұл қадам терезенің диаметріне тең. Терезе үшін T шегі формула бойынша анықталады:

$$T = m * \left(1 - k * \left(1 - \left(\frac{s}{R} \right) \right) \right) \tag{12}$$

мұнда k нысанның бар екенін анықтайды, тұрақты және жиі 0.5 мәнін алады. R – динамикалық мән, кескінді өңдеу радиусы; әдетте 128-ге тең.

Sauvola әдісі айқын және қарама-қарсы кескіндермен жұмыс істеу кезінде Niblack әдісімен салыстырғанда жоғары өңдеу жылдамдығын көрсетсе де, жарық жеткіліксіз кескіндерді өңдеуде қиындықтарға тап болады. Мұндай жағдайларда, әсіресе объектінің пиксель мәндері бір-біріне жақын болған кезде, әдістің дәлдігі төмендейді. Сонымен қатар, жіңішке қиылысатын сызықтарды өңдеу кезінде үзілістер пайда болуы мүмкін, бұл оның ұсақ бөлшектері бар объектілерге қолданылуын шектейді [8].

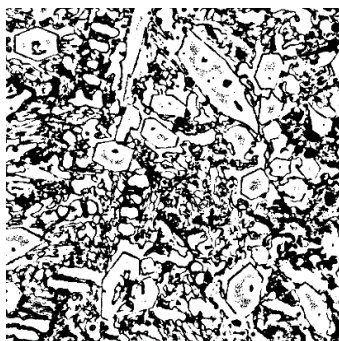
Бұл мәселені шешу үшін кескіннің контрастын және шуын қалыпқа келтіру арқылы жергілікті шекті мәнді анықтайтын Christian әдісі ұсынылды:

$$T = (1 - k) * m + k * M + k * \left(\frac{s}{R} \right) * (m - M) \tag{13}$$

мұнда k=0,5; M - бүкіл кескіннің минималды сұр мәні; R - жергілікті терезеден сұр мәнің максималды орташа квадраттық ауытқуы, олар гистограмма негізінде анықталады.

Бұл әдіс жоғарыда сипатталған үш жергілікті шекті әдістердің ішінде ең жақсы бинаризациялау нәтижелерге қол жеткізеді. Алайда, Christian әдісінде сұр фондық мәндердің айтарлықтай өзгеруімен кескіндегі тиімділігі айтарлықтай төмендейді [9].

Bernsen әдісі схемалық және картографиялық кескіндер үшін кеңінен қолданылды (10-суретті қараңыз).



Сурет 10 – Bernsen жергілікті әдісімен бинаризацияланған кескін

Әр пиксель үшін (x; y) жарықтық шегі таңдалады:

$$T = (T_{\max} + T_{\min}) / 2 \tag{14}$$

мұнда T_{\max} , T_{\min} – тиісінше, пиксельдің квадрат айналасынан (x; y) пиксель жарықтығының ең төменгі және ең жоғары деңгейі. Бұл әдісті жүзеге асыруға аз уақыт кетеді, бұл оны басқа әдістер арасында өте тиімді етеді.

Әдістің бірқатар кемшіліктері бар. Біркелкі жарықтығы бар аймақтарды өңдеу айтарлықтай паразиттік кедергілерге, сондай-ақ кейбір жағдайларда жалған қараңғы аймақтардың пайда болуына әкелуі мүмкін. Бұл кемшіліктерді азайту үшін қосымша өңдеу (кейінгі өңдеу) қолданылуы мүмкін. Осыған қарамастан, бұл әдіс кейінгі өңдеу қажеттілігін ескере отырып, басқалармен салыстырғанда ең жылдам болып қала береді [10].

Болаттар мен қорытпалардың құрылымдарының кескіндеріне қатысты бинаризациялаудың заманауи әдістерін талдау және сынақтан өткізу көрсеткендей:

– қараңғы нысандарды дәлірек таңдау үшін жаһандық бинаризациялауды қолдану керек;

– нысандарды түсі бойынша дәлірек таңдау үшін мультиризациялау әдісі қолданылады;

– түйіршік мөлшерін дәлірек анықтау үшін – объектілердің шекараларын қайталау және бөлу үшін жергілікті бинаризациялау әдісі оңтайлы болып табылады.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Осы мақалада келтірілген зерттеулердің нәтижелерін Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант № AP15473350).

Қорытынды

Бинаризациялау бейнеде де, фотокескінде де кескіндерді ақпараттық-цифрлық талдаудың негізгі құралы болып табылады. Осыған байланысты оператордың алдында тұрған тапсырмаға байланысты кескінді бинаризациялау әдісін дұрыс таңдау маңызды.

Ғылыми мақалада қолданыстағы бинаризациялау әдістеріне талдау жасалды, болат үлгілерінің мысалында қорытпалардың микроқұрылымдарының кескіндерін өңдеу мақсатында бинаризациялау әдістерінің белгілі бір түрлері таңдалды және сыналды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы әртүрлі ғалымдар ұсынған бинаризациялау әдістерін жүйелеу; осы әдістердің оң және теріс жақтары анықталды және оларды әрі қарай ақпараттық-цифрлық талдау үшін болаттар мен қорытпалардың микроқұрылымдарының кескіндерін бинаризациялау мәселесін шешу үшін оңтайлы бинаризациялау әдістері таңдалды. Жұмыстың практикалық маңыздылығы металдар мен қорытпалардың құрылымдарын ақпараттық-цифрлық металлографиялық талдау әдістемесін жетілдіру мүмкіндігінен тұрады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Компьютерное зрение. – [Электронный ресурс] / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2013. – 752 с.

2 **Исрафилов, Х. С.** Исследование методов бинаризации изображений // Вестник науки и образования. – 2017. – № 6 (30). – Том 2. – 43 с.

3 **Соколовская, Э. А.** О воспроизводимости результатов измерений структур и изломов с использованием компьютеризированных процедур // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 4. – 143 с.

4 **Otsu, N.** A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, 1. – 62 p.

5 **Ping-Sung, L., Tse-Sheng, Ch. and Pau-Choo Ch.** A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding., J. Inf. Sci. Eng., – 2001. – № 17. – 713 p.

6 **Niblack, W.** An Introduction to Image Processing, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ. – 1986. – 115 p.

7 **Николаев, Д. П., Сараев, А. А.** Критерии оценки качества в задаче автоматизированной настройки алгоритмов бинаризации // Труды ИСА РАН. – 2013. – Том 63.3. – 85 с.

8 **Sauvola, J., Petikainen, M.** Adaptive document image binarization, Pattern recognition, 2000. – 225 p.

9 **Christian, W., Jean-Michel, J. and Francoise, Ch.** Localization, Enhancement and Binarization in Multimedia Documents Proceedings // International Conference on Pattern Recognition (ICPR), IEEE Computer Society. August 11th-15th, Quebec City, Canada. – 2002. – Volume 4. – 1037 p.

10 **Bernsen, J.** Dynamic thresholding of grey-level images, Proceedings of the Eighth ICPR. – 1986. – 1251 p.

REFERENCES

1 Комп`ютерное зрение [E`lektronny`j resurs] [Computer vision] / L. Shapiro, Dzh. Stokman; per. s angl. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy. – 2013. – 752 p.

2 **Israfilov, H. S.** Issledovanie metodov binarizacii izobrazhenij [Investigation of image binarization methods] // Vestnik nauki i obrazovaniya. – 2017. – № 6 (30). – Том 2. – 43 p.

3 **Sokolovskaya, E. A.** O vosproizvodimosti rezul`tatov izmerenij struktur i izlomov s ispol`zovaniem komp`yuterizirovanny`x procedur [On the reproducibility of results of measurements of structures and fractures using computerized procedures] // Voprosy` materialovedeniya. – 2013. – № 4. – 143 p.

4 **Otsu, N. A.** threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, 1. – 62 p.

5 **Ping-Sung, L., Tse-Sheng, Ch. and Pau-Choo Ch.** A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding., J. Inf. Sci. Eng., – 2001. – № 17. – 713 p.

6 **Niblack, W.** An Introduction to Image Processing, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ. – 1986. – 115 p.

7 **Nikolaev, D. P., Saraev, A. A.** Kriterii ocenki kachestva v zadache avtomatizirovannoj nastrojki algoritmov binarizacii [Quality assessment criteria in the

task of automated tuning of binarization algorithms] // Trudy` ISA RAN. – 2013. – Т. 63.3. – 85 p.

8 **Sauvola, J., Petikainen, M.** Adaptive document image binarization, Pattern recognition, 2000. – 225 p.

9 **Christian, W., Jean-Michel, J. and Francoise, Ch.** Localization, Enhancement and Binarization in Multimedia Documents Proceedings // International Conference on Pattern Recognition (ICPR), IEEE Computer Society. August 11th-15th, Quebec City, Canada. – 2002. – Volume 4. – 1037 p.

10 **Bernsen, J.** Dynamic thresholding of grey-level images, Proceedings of the Eighth ICPR. – 1986. – 1251 p.

22.10.24 ж. баспаға түсті.

25.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

16.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Г. Е. Ахметова¹, Е. А. Панин², А. В. Кудря³, К. Туысхан⁴**

^{1,2,4}Қарагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, Темиртау

³Университет науки и технологий МИСИС, Российская Федерация, г. Москва

Поступило в редакцию 22.10.24.

Поступило с исправлениями 25.10.24.

Принято в печать 16.11.2024.

АНАЛИЗ И АПРОБАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ БИНАРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В данной статье представлен анализ существующих методов бинаризации изображений. Систематизированы данные по определению и описанию различных методик бинаризации изображений, разработанных современными учеными. Целью исследований служили апробация современных методов бинаризации и определение оптимальных методов бинаризации изображений микроструктур металлов и сплавов на примере образцов конструкционных марок сталей. Рассмотрены следующие методы бинаризации: бинаризация методом среднего, бинаризация с помощью S-образной кривой, метод Оцу (Отса или Отсу), метод мульти-Оцу, адаптивная бинаризация, метод локальной бинаризации, метод медиан, алгоритм Niblack, метод Sauvola и метод Bernsen. Описаны достоинства и недостатки данных методик бинаризации. Проведена апробация применения ряда существующих методик бинаризации для обработки изображений микроструктур сталей и сплавов на примере образцов конструкционных сталей с целью дальнейшего их применения в информационно-цифровом металлографическом анализе. Представлены результаты исследований по качеству получаемых изображений с использованием различных методик бинаризации. Определены наиболее подходящие оптимальные методики бинаризации изображений микроструктур сталей с целью их дальнейшего применения в информационно-цифровом анализе сталей и сплавов. Исследования перспективны для

дальнейшей цифровизации методов металлографического анализа металлов и сплавов.

Ключевые слова: бинаризация, изображение, сталь, структура, информационно-цифровой анализ.

***G. E. Akhmetova¹, E. A. Panin², A. V. Kudrya⁴, K. Tuyskhan⁴**

^{1,2,4}Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau

⁴University of Science and Technology MISIS, Russian Federation, Moscow

Received 22.10.24.

Received in revised form 25.10.24.

Accepted for publication 16.11.24.

ANALYSIS AND TESTING OF MODERN IMAGE BINARIZATION METHODS

This article presents an analysis of existing methods of image binarization. It systematizes data on the definition and description of various methods of image binarization developed by modern scientists. The aim of the research was to test modern binarization methods and determine optimal methods for binarization of images of microstructures of metals and alloys using samples of structural steel grades as an example. The following binarization methods are considered: binarization by the mean method, binarization using the C-shaped curve, Otsu's method (Ots or Otsu), multi-Otsu method, adaptive binarization, local binarization method, median method, Niblack algorithm, Sauvola method and Bernsen method. The advantages and disadvantages of these binarization methods are described. A test was carried out to apply a number of existing binarization methods for processing images of microstructures of steels and alloys using samples of structural steels for the purpose of their further application in information-digital metallographic analysis. The results of studies on the quality of the obtained images using various binarization methods are presented. The most suitable optimal methods of binarization of images of steel microstructures are determined for their further use in information and digital analysis of steels and alloys. The research is promising for further digitalization of metallographic analysis methods for metals and alloys.

Keywords: binarization, image, steel, structure, information-digital analysis.

**P. O. Bykov¹, * R. A. Begaliev², A. B. Kuandykov³,
M. M. Suyundikov⁴, E. Siemens⁵**

¹²³⁴Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁵Anhalt University of Applied Sciences, Federal Republic of Germany, Köthen

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7540-7882>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1112-6322>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6075-1603>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1352-5821>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2986-3614>

*e-mail: rustem_begaliev_pvl@mail.ru

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS IN THE SMELTING OF LOW-ALLOY STEEL ON RESISTANCE TO HYDROGEN CRACKING

In the last decade, the oil and gas industry has been in dire need of seamless steel pipes resistant to corrosion destruction, which is associated with the development of oil production containing large amounts of hydrogen sulfide and other aggressive impurities.

A key role in achieving high indicators of resistance to hydrogen cracking is given to the development and use of methods for controlling the type, quantity, size and morphology of non-metallic inclusions, forms of impurity presence, precipitation of non-metallic excess phases or strengthening structural components.

The authors analyzed the current technology for smelting and casting of 13HFA steel at the KSP Steel PB LLP enterprise and developed a set of technological measures for smelting, extra-furnace treatment and casting of 13HFA steel, ensuring a high level of resistance to hydrogen cracking.

A series of melts carried out according to the developed technological indicators ensured the achievement of the main HIC indicators at the level of CLR and CTR = 0%.

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 the project AP23487674 «Complex processing of bauxites of Kazakhstan with additional extraction of iron by alternative reducing agents in the implementation of the low-carbon development strategy».

Keywords: low-alloy steel, hydrogen cracking, smelting, out-of-furnace processing, continuous casting.

Introduction

In the last decade, the oil and gas industry has been in dire need of seamless steel pipes resistant to corrosion destruction, which is associated with the development of oil production containing large amounts of hydrogen sulfide and other aggressive impurities [1 - 4].

In Kazakhstan, the urgency of this problem was clearly demonstrated during the organization of oil production at the Kashagan field [1].

Analysis of the literature [5, 6] shows that in recent years, the requirements for the quality of products manufactured from high-quality mass steel grades have increased significantly. The requirements for the level and stability of the service properties of steel are constantly growing. There has been a multiple increase in the requirements for corrosion resistance, cold resistance, operational reliability and other service properties, provided that they are weldable. It is possible to note another important tendency, that if earlier, during development of steel, requirements were imposed mainly on the level of one of the properties, then at present and, especially, in the future, it is necessary to increase to the highest possible level the whole complex of properties, as a rule, difficult to combine, for example, strength, plasticity and stampability, strength and corrosion resistance [6].

The above-mentioned tendencies have led to the necessity of using fundamentally new approaches to achieve the required structural state, high indicators of technological, mechanical, physicochemical characteristics of metal. The key role among them is given to the development and use of methods for controlling the type, quantity, size and morphology of non-metallic inclusions, forms of presence of impurities, precipitation of non-metallic excess phases or strengthening structural components, which should provide [6]:

- a sharp decrease in the content of traditional non-metallic inclusions;
- elimination of the possibility of formation of non-metallic inclusions, which have a negative impact on technological, service properties of steel, including its corrosion resistance and sorting by various types of defects;
- obtaining non-metallic precipitates that provide an increase in the level and stability of mechanical and other service properties of steel;
- ensuring the required content and forms of presence of harmful non-ferrous and uncontrolled impurities.

It is important to note that the formation of certain non-metallic inclusions is largely determined by the adopted technological scheme of production, the type of charge materials and the type of manufactured metal products. For example, the formation of corrosion-active non-metallic inclusions (CANI) is associated with the technology of extra-furnace treatment, namely the conditions of the deoxidation and modification processes.

The mechanism of CANI formation is described in [5–12]. When introducing large portions of aluminum into overoxidized steel at the outlet, all possible combinations of aluminum and oxygen concentrations arise in various zones of the melt, leading to the formation of not only corundum inclusions, but also a large number of herzenite

inclusions $\text{FeO Al}_2\text{O}_3$ with high adhesion to the melt and extremely difficult to remove during subsequent extra-furnace treatment. When aluminum and silicon are simultaneously introduced into the overoxidized metal at the outlet, not only an excess amount of herzenite inclusions is formed, but also a large number of difficult-to-remove mullite inclusions $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$.

Despite the fact that herzenite and mullite inclusions, under certain optimal parameters of modifying treatment with calcium-containing materials, are transformed at the final stage of extra-furnace treatment with the formation of inclusions of calcium aluminates $\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ and $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, which are liquid at the temperatures of steelmaking processes and should be easily removed from the steel into slag, the required degree of metal purity for corrosion-active inclusions such as calcium aluminates is not achieved due to their significant quantity and the lack of time required for their enlargement and removal from the melt [8]. As a result, in the metal of continuously cast billets (CCB) and rolled products, CANVs of the composition $\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ and $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ are found, which, despite the favorable morphology, did not have time to be removed from the melt. Also, large portions of lump aluminum, released at the tap, actively interact with the ladle lining to form magnesia spinels $\text{MgO Al}_2\text{O}_3$. Magnesia spinels, solid at the temperatures of steelmaking processes, are also poorly removed during out-of-furnace processing. On the surface of magnesia spinels, calcium aluminates are released at subsequent stages of phase formation, and at the last stages of solidification, sulfide inclusions precipitate on the surface of such multiphase inclusions, as on the substrate. Such conglomerates are corrosive and in this form are often found in NLZ and rolled metal [5–9]. Based on the above, it can be concluded that at present in Kazakhstan there is an urgent problem of developing a technology for producing high-quality rolled products and pipes that satisfy the entire range of properties required by consumers of these products.

Materials and methods

The authors analyzed the current technology of steel smelting and casting at the enterprise PB LLP “KSP Steel”. The object of the study was steel grade 13HFA, regulated by GOST 8732 and GOST 8731.

Table 1 – Chemical composition of steel 13HFA, %

Chemical elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Al	N ₂
min	0,13	0,17	0,45	–	–	0,50	–	–	0,05	0,020	–
max	0,16	0,23	0,51	0,013	0,010	0,56	0,20	0,20	0,08	0,040	0,008

Steel was smelted in 60-ton electric arc furnaces (EAF) using a single-slag process with steel finishing in a ladle-furnace unit (LFU) and a ladle vacuum degasser.

The 60-ton electric arc furnaces were equipped with wall-mounted oxy-fuel burners, coal tuyeres, an eccentric bottom discharge system, and a system of bins for storing, weighing, and adding the necessary materials when tapping metal from the furnace. The lining of the furnace working layer is made of periclase-carbon refractory materials,

which ensure a service life of more than 250 melts between repairs. If necessary, the lining of the walls is gunned with refractory masses using a special gunning machine.

The LFU was used to finish the steel according to chemical composition and temperature, desulfurize the steel, remove non-metallic inclusions, homogenize, modify, and microalloy. The plant was equipped with a system of bunkers for storing, weighing and adding ferroalloys, tribological devices for introducing wire with various powder fillers into the metal, a unit for blowing powdered materials (coke, lime) into the metal and onto the slag. For supplying argon for mixing, 2 slotted blow-off plugs are installed in the bottom of the steel-pouring ladle. The lining of the steel ladles is made of individual periclase-carbon products.

The metal charge for the EAF is received and processed in the charge preparation shop (CPS).

The following are used for carburizing the metal: carbon-containing material; coke breeze according to GOST 11255–75; electrode scrap (pieces no larger than 50 mm); scrap of cast iron parts.

Iron ore pellets with an iron content of at least 60 % are used as an oxidizer. Freshly fired lime with a content of active oxides CaO+MgO of at least 85 %, fluorspar according to GOST 29220 are used as slag-forming agents. It is permitted to use broken fireclay bricks that have been in use (crumbs, fraction 0–5 mm).

For deoxidation and alloying, ferrosilicon manganese according to GOST 4756 (FeMnSi), ferrosilicon according to GOST 1415 (FeSi 75A11), silicocalcium according to GOST 4762 (SK20, etc.) are used. For pipe steel grades, the following are also used: ferromanganese according to GOST 4755, aluminum AB - 97 GOST 295, screenings AKS (aluminum-corundum mixture), silicon carbide SiC, aluminum rod GOST 13843.

The fraction of materials fed through their feed system is 5–50 mm. The moisture content in slag-forming materials and solid oxidizers is no more than 1.5 %. The moisture content in ferroalloys and coke breeze is no more than 0.5 %.

The melt is charged based on obtaining a carbon content in the metal by the beginning of the oxidation period above the lower limit of the specified steel grade by 0.20–0.30 %.

To obtain the required carbon content in the metal upon melting in the furnace, coke nut (coke breeze) is added before the first batch. The total amount of lime and carbonaceous material added during the melting period is 30–35 kg per ton of metal charge. After 90–95 % of the metal charge has melted, a metal sample is taken for a complete chemical analysis.

After the wells have melted, the slag is foamed by blowing carbonaceous material through a tuyere or by adding carbonaceous material while simultaneously blowing the slag with oxygen. The fluidity of the slag is maintained by adding fluorspar.

The primary slag is removed at a temperature of 1520–1540 °C. At this temperature, 60–70 % of the furnace slag is removed.

With a low carbon content upon melting, the metal is carburized by blowing graphite (coke fines) in a stream of nitrogen, or by adding electrode scrap, graphite, or coke to the furnace.

The beginning of the oxidation period is considered to be the moment when the bath temperature reaches 1540–1560 °C.

Carbon oxidation is performed with gaseous oxygen introduced into the furnace through oxygen tuyeres. During the oxygen blowing process, the foamed slag is maximally removed by gravity, preventing metal from coming off.

The duration of the oxidation period and the intensity of decarburization were determined based on obtaining the carbon content specified for a given steel grade at a temperature of 1630–1650 °C.

The mass fraction of sulfur and phosphorus in the metal before tapping was within the limits for the given steel grade.

After obtaining the specified carbon content and temperature, the melt was tapped. The metal was tapped from the furnace without slag.

The temperature of the metal before tapping was within the range of 1620–1635 °C (1650 °C during the first melt). The metal was tapped from the DSP with subsequent vacuumization at a temperature of 1650–1660 °C.

The addition of ferroalloys and slag-forming materials was carried out during the tapping of the melt through the bulk material feed system. Alloying of steel at tapping was carried out to the lower limit of the alloying element content.

The addition of ferroalloys began after the tapping of 3–5 tons of metal for DSP-60. The addition of slag-forming materials was carried out after the addition of ferroalloys. To direct slag under the metal stream during tapping, lime in the amount of 200–300 kg and fluorspar in the amount of 40–80 kg were added. The slag thickness in the ladle was maintained at 80–100 mm.

The metal temperature before the start of melt processing on the ACP was maintained at 1560–1580 °C.

Metal processing on the ACP was carried out to adjust the metal by temperature and chemical composition, average the metal by temperature and chemical composition in the ladle volume, remove sulfur and non-metallic inclusions, degass the steel, and coordinate the operation of the EAF and CCM. The metal processing time was 30–40 minutes. Argon purging was carried out throughout the entire metal processing cycle.

The arc heating stage of the ACP was selected based on the required metal heating rate. When blowing without arc heating, the temperature decrease was 0.5–1.0 °C/min.

The refining slag was induced by adding lime and fluorspar, and additionally, AKS was used. Coke powder was applied to the slag surface for deoxidation and foaming. Lump silicocalcium was used as a slag deoxidizer in an amount of up to 1.0 kg/ton of liquid steel. The slag basicity was maintained at a level of at least 2.2.

The metal composition was adjusted in the following order: homogeneous liquid-mobile slag was obtained in a ladle, ferroalloys were added, and the carbon content in the metal was adjusted by adding coke breeze, USM, or graphite.

The element assimilation coefficients were as follows: manganese 100 %; silicon 90 %; coke carbon 50 %.

Aluminum rod was fed through a trib-apparatus, through which powder wire was also fed to adjust the chemical composition for other alloying elements (vanadium, etc.).

After the introduction of aluminum, the metal was averaged by argon blowing for 3-4 minutes, after which the metal was processed with silicocalcium wire.

The temperature of the steel in the ladle was monitored after the start of blowing the metal. The last temperature measurement was made immediately before feeding the ladle for pouring. Intermediate control of the metal temperature was carried out every 5–10 minutes of operation under current, and after 10 minutes, when working without arc heating.

3–5 minutes before the end of steel processing on the ACP, the metal was overheated by 3–5 °C above the set temperature, arc heating was turned off and the metal was cooled to the set temperature by blowing with argon.

At the end of the processing, a slag sample was taken for chemical analysis. After processing on the ACP, the steel is processed on a ladle vacuumizer. During the vacuuming process, the steel is purged with argon.

The processing mode included 4 stages:

- reducing the pressure to 175 mbar;
- reducing the pressure to 65 mbar. When the metal “boiled”, the pressure was maintained at about 133 mbar until the bath calmed down;
- reducing the pressure to 5 mbar. During boiling, the pressure was maintained at about 27 mbar (20 Torr) or the pump was switched to the previous position in order to prevent the steel ladle from overflowing;
- reducing the pressure to a level below 1.33 mbar. The argon flow rate was 270 NI/min to maintain the maximum possible foaming. The processing time was from 20 to 25 minutes to remove as much hydrogen, nitrogen, and oxygen from the steel as possible.

After vacuuming, the shut-off valve was closed and the pump was turned off. To dilute the CO accumulated in the chamber, nitrogen was pumped into the chamber. After the nitrogen was pumped into the tank, air was introduced until atmospheric pressure was reached. The argon consumption for the purge plug was reduced to 60 NI/min.

Then the temperature was measured and the oxygen content was determined.

The final finishing of the metal was carried out by adding aluminum rod and wire with powder fillers using a tribapparatus.

After adding the wire, the metal was purged with argon for at least 5–7 minutes, with the flow rate set at 30 NI/min or less, preventing the metal surface from being exposed.

The temperature was measured, the hydrogen content in the metal was measured, the argon supply was turned off, the metal surface in the steel-pouring ladle was covered with a heat-insulating mixture in the amount of 40-60 kg, after which the ladle was sent to the continuous casting machine.

A radial continuous casting machine with a bending sector radius of 10,000 mm was used. The cross-section of the cast blanks was a circle from 150 to 300 mm. The length of the blanks was from 5 to 12 meters. Continuous casting was carried out using the “melt on melt” method through submerged nozzles with a closed stream.

When pouring steel with a flooded stream through submerged nozzles, a slag-forming mixture (SFS) was introduced onto the metal surface in the crystallizer. The surface temperature of the workpiece after drawing before the shears was 900 – 950 °C.

Results and discussion

Analysis of the influence of technological parameters of melting and casting of 13HFA steel on resistance to hydrogen cracking showed the following results.

At the stage of melting steel in the EAF, the following melting parameters were changed:

- oxygen content in steel before tapping from the EAF was reduced to 1300 ppm;
- lime and fluorspar feed was increased at the tapping of metal from the EAF.

The main technological parameters and the achieved results in melting steel in the EAF are given in Table 2 and Table 3.

Table 2 – Chemical composition of metal’s output from EAF

Melt number	Chemical composition of metal’s output from EAF, %								Temperature of metal’s output from EAF, °C
	C	Si	Mn	P	S	N ₂	Cu	Mo	
5160162	0,03	0,01	0,05	0,08	0,15	0,008	0,17	0,15	1641
5160163	0,04	0,02	0,04	0,07	0,18	0,011	0,16	0,019	1641
5160164	0,04	0,01	0,04	0,06	0,13	0,008	0,16	0,016	1644
5160165	0,04	0,01	0,05	0,07	0,14	0,0059	0,17	0,014	1647
5160166	0,03	0,01	0,06	0,06	0,14	0,0077	0,17	0,019	1638
5160167	0,03	0,01	0,06	0,07	0,14	0,0077	0,18	0,014	1643
5160168	0,03	0,01	0,04	0,07	0,14	0,0071	0,19	0,023	1643
6160154	0,06	0,01	0,05	0,06	0,19	0,013	0,16	0,11	1631
6160155	0,05	0,01	0,05	0,07	0,23	0,012	0,15	0,014	1629
6160156	0,04	0,01	0,05	0,06	0,27	0,0077	0,14	0,013	1632
6160157	0,04	0,01	0,05	0,06	0,3	0,01	0,15	0,011	1625
6160158	0,06	0,01	0,05	0,07	0,24	0,0085	0,15	0,016	1626

Таблица 3 – Quantity of materials added to the ladle metal’s output from EAF, kg

Melt number	CaO	FOMI	FeSiMn	SiAl	FeCr
5160162	301	50	304	204	313
5160163	303	51	304	204	312
5160164	301	51	307	207	310
5160165	301	52	275	202	312
5160166	301	52	305	203	310
5160167	302	51	310	204	317
5160168	301	52	307	202	299
6160154	304	58	264	203	301
6160155	308	55	266	202	300
6160156	306	57	229	233	251
6160157	308	57	259	235	251
6160158	306	55	260	235	252

These measures allowed to reduce the content of non-metallic inclusions in steel, reduce the consumption of lime and fluorspar during the period of secondary treatment, and as a result improve the results in terms of resistance to hydrogen cracking.

During the metal processing at the LCP, the following secondary treatment parameters were observed:

- the duration of metal stay in the ladle was reduced to 160 minutes (from the release of steel from the EAF to feeding to the continuous casting machine);
- the calcium content in the steel before feeding to the continuous casting machine was maintained at a level of at least 0.0020 % (with the recommended ratio of Ca/S = 1.5–2.0).

These measures allowed to reduce the contact time of the metal with the ladle lining, which led to a decrease in the content of magnesium oxide inclusions. It should be noted that during steel smelting, the ratio of Ca/S = 1.5–2.0 was not always maintained.

The main steel processing indicators are given in Tables 4–7.

Table 4 – Quantity of materials fed to the ALF, kg

Melt number	CaO	CaF ₂	FeSi	MT	Al	FeV
5160162	501	40	38	8		60
5160163	502	44	56	18		70
5160164	503	40	46	8		60
5160165	503	42	46	8		70
5160166	501	44	50	8		70
5160167	502	40	51	8		68
5160168	502	46			120	60
6160154	405	30	32	8		60
6160155	403	23	32	8		45
6160156	403	46		6		
6160157	406	44		6		
6160158	406	48		6		

Table 5 – Treatment parameters on the automatic transmission

Melt number	Duration of metal stay in ladle, min.	Durability of s/k, number of heats	Temperature of metal before sending to vacuum machine, °C
5160162	73	53	1725
5160163	74	25	1685
5160164	235	13	1695
5160165	88	54	1676
5160166	79	26	1689
5160167	86	24	1685
5160168	100	14	1685
6160154	76	25	1734
6160155	99	27	1729

6160156	97	6	1730
6160157	103	40	1725
6160158	78	26	1725

Table 6 – Parameters of processing in a ladle vacuum degasser

Melt number	Vacuuming duration, min	Achieved vacuum, mbar	The amount of materials added to the ladle on the vacuumizer, m		Total duration of processing on the vacuum machine, min.
			After vacuuming		
			SiCA	Alwr	
5160162	22	0,88	55		60
5160163	20	0,84	55	40	65
5160164	20	0,86	60		59
5160165	20	0,88	60		48
5160166	20	0,82	60		57
5160167	20	0,88	60		41
5160168	20	0,87	65	10	54
6160154	31	0,9	150	47	72
6160155	30	0,91	150	45	58
6160156	35	0,95	140	44	55
6160157	30	0,95	130	45	56
6160158	30	0,85	130	42	61

Table 7 – Chemical composition of steel after processing in a ladle vacuum degasser, %

Melt number	Chemical composition of steel after vacuum treatment									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ca	Al	N ₂
5160162	0,13	0,2	0,47	0,09	0,09	0,51	0,052	0,0024	0,024	0,008
5160163	0,16	0,19	0,49	0,09	0,05	0,54	0,058	0,0025	0,031	0,0064
5160164	0,15	0,21	0,48	0,08	0,04	0,53	0,057	0,0034	0,032	0,0076
5160165	0,15	0,23	0,48	0,07	0,06	0,56	0,058	0,0023	0,029	0,006
5160166	0,13	0,2	0,46	0,06	0,07	0,51	0,058	0,0025	0,027	0,0067
5160167	0,15	0,22	0,5	0,09	0,08	0,53	0,062	0,0016	0,029	0,0074
5160168	0,14	0,19	0,47	0,07	0,04	0,52	0,07	0,0022	0,024	0,0071
6160154	0,13	0,3	0,45	0,07	0,07	0,53	0,054	0,0032	0,027	0,0076
6160155	0,14	0,31	0,47	0,08	0,08	0,5	0,052	0,003	0,027	0,0065
6160156	0,14	0,29	0,45	0,09	0,05	0,53	0,056	0,0038	0,031	0,0075
6160157	0,14	0,3	0,45	0,07	0,1	0,53	0,054	0,0034	0,029	0,0081
6160158	0,13	0,28	0,45	0,06	0,06	0,53	0,054	0,0036	0,029	0,005

Steel casting on the continuous casting machine was carried out with the following parameters changed:

– the parameters of the secondary cooling of the continuous casting machine were changed, with the aim of uniform cooling of the billet and reducing the temperature heterogeneity of the billet surface to 40°C.

The main indicators of continuous casting are given in tables 8–10.

Table 8 – Continuous Casting Machine Casting Parameters

Melt number	Industrial ladle temperature, °C	Liquidus temperature, °C	Section of the work-piece D, mm	Temperature of metal in tundish, °C			Pouring time, min
				Start of pouring	End of pouring	Δt	
5160162	1050	1518	210	1548	1338	10	18
5160163	1102	1518	210	1565	1558	7	73
5160164		1516	210	1548	1548	0	44
5160165		1517	210	1545	1543	2	73
5160166		1517	210	1545	1547	2	72
5160167		1518	210	1542	1544	2	54
5160168		1518	210	1550	1542	8	85
6160154	1139	1518	300	1565	1540	25	84
6160155		1517	300	1543	1553	10	52
6160156		1518	300	1545	1540	5	61
6160157		1517	300	1552	1540	12	73
6160158		1518	300	1553	1549	4	74

Table 9 – Technological parameters for casting 13HFA steel

Primary water: ~1800 l/min (Ø300). Water pressure 6.0 bar					
section	0.3 m/min	0,6 m/min	0,9 m/min	1,2 m/min	1,5 m/min
Ø300 mm					
1 zone	29 l/min	60 l/min	90 l/min	120 l/min	151 l/min
2 zone	18 l/min	40 l/min	58 l/min	77 l/min	98 l/min
3 zone	14 l/min	28 l/min	41 l/min	77 l/min	68 l/min
Application of the SFM				SFM BF18AT	
The pouring speed is set depending on the temperature of the metal in the tundish within the range:				Temp. in s/c, °C	Casting speed, m/min
automatic mode of adjustment of the casting speed, the casting speed is set according to the results of discrete temperature measurements				1534-1540	0,4-0,55
- section Ø300 mm					

Further in the work the data on the content of non-metallic inclusions and HIC indices in seamless pipes obtained from steel grade 13HFA of experimental melts were analyzed. The analysis of the macrostructure is given in Table 10. The main characteristics of the pipes are given in Table 11.

Table 10 – Analysis of the macrostructure of the CCB

Melt number	Macrostructure, score				
	CP	OHN	CCT		KTZ
			by section	axial	
5160162	0	1	0	0	0
5160163	0	1	0	0,5	0
5160164	0	0,5	0	0,5	0
5160165	1	1	0,5	0,5	0,5
5160166	1	1	0,5	0,5	0,5
5160167	0	1,5	1	1	0,5
5160168	0	1	0	0,5	0
6160154	0	1	0	0,5	0
6160155	0	1	0	0,5	0,5
6160156	0	1	0	0,5	0
6160157	0	1	0	1	0,5
6160158	1	1,5	0	0,5	0,5

Table 11 – Pipe characteristics

Melt number	Metallographic examination of pipes (non-metallic inclusions according to GOST 1778)									Corrosion testing		
	SO	PO	BS	PS	NDS	S	SN	PN	AlN	CSR, %	CLR, %	CTR, %
5160162	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,25	1,5	1,5	1,5	0	0	0
5160163	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,25	1,5	1,5	1,5	0	0	0
5160164	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,25	1,5	1,5	1,5	0	0	0
5160165	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,25	1,5	1,5	1,5	0	0	0
5160166	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,25	1,5	1,5	1,5	0	0	0
5160167	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,25	1,5	1,5	1,5	0	0	0
5160168	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
6160154	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
6160155	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
6160156	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
6160157	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
6160158	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0

String oxides SO, Point oxides PO, Brittle silicates BS, Plastic silicates PS, Non-deformable silicates NDS, Sulfides S, String nitrides and carbonitrides SN, Point nitrides and carbonitrides PN, Aluminum nitrides AlN

Conclusions

Thus, in the course of the work performed, a set of technological measures for smelting, extra-furnace treatment and casting of 13HFA steel was developed, ensuring a high level of resistance to hydrogen cracking.

A series of smelts carried out according to the developed technological indicators ensured the achievement of the main HIC indicators at the level of CLR and CTR = 0%.

The recommended parameters for smelting steel in the EAF are:

- reducing the oxygen content in steel before tapping from the EAF to 1300 ppm;
- feeding lime and fluorspar when tapping metal from the EAF.

These measures made it possible to reduce the content of non-metallic inclusions in steel, reduce the consumption of lime and fluorspar during extra-furnace treatment, and, as a result, improve the results in resistance to hydrogen cracking.

The recommended parameters for extra-furnace treatment are:

- reducing the duration of metal residence in the ladle to 160 minutes (from the tapping of steel from the EAF to feeding to the continuous caster).
- the calcium content in steel before feeding to the continuous casting machine should be at least 0.0020 % (with a recommended ratio of Ca/S = 1.5 - 2.0).

These measures made it possible to reduce the contact time of the metal with the ladle lining, which led to a decrease in the content of magnesium oxide inclusions.

It should be noted that when smelting steel, the ratio of Ca/S = 1.5 - 2.0 was not always maintained.

The recommended parameters for continuous casting are:

- changing the parameters of the secondary cooling of the continuous casting machine, in order to uniformly cool the billet and reduce the temperature heterogeneity of the billet surface to 40 °C.

Funding information

The research was carried out 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 the project AP23487674 «Complex processing of bauxites of Kazakhstan with additional extraction of iron by alternative reducing agents in the implementation of the low-carbon development strategy».

REFERENCES

1 Концепция развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20 декабря 2018 года № 846.

2 Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121.

3 Казахстан 2022: Добровольный национальный обзор о реализации Повестки до 2030 года в области устойчивого развития, 2022. – 258 с.

4 Диагностика горнорудного сектора – Казахстан: Отчет. – The World Bank, 2023. – 123 с.

5 Шахпазов, Е. Х., Зайцев, А. И. Современные тенденции развития металлургической технологии для обеспечения требований к уровню и

стабильности свойств, эксплуатационной надежности стали. – Труды научно–технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург : УрО РАН, 2011. – С. 26 – 31.

6 **Ровнушкин, В. А., Смирнов, Л. А.** Состояние и задачи развития электросталеплавильного производства. – Труды научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург : УрО РАН, 2011. – С. 70–77.

7 **Милейковский, А. Б., Малахов, Н. В.** Разработка технологии внепечной обработки низколегированных трубных сталей повышенной коррозионной стойкости. – Труды научно–технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург : УрО РАН, 2011. – С. 130–138.

8 **Зайцев, А. И., Родионова, И. Г., Семернин, Г. В., Шапошников, Н. Г., Казанков, А. Ю.** Новые типы неблагоприятных неметаллических включений на основе MgO–Al₂O₃ и металлургические факторы, определяющие их содержание в металле. Ч. 1. Причины и механизмы образования в стали неметаллических включений на основе алюмомагниевого шпинели // Металлург. – 2011. – № 2. – С. 50 – 55.

9 **Белый, А. П., Исаев, О. Б., Матросов, Ю. И., Носоченко, А. О.** Центральная сегрегационная неоднородность в непрерывнолитых листовых заготовках и толстолистовом прокате. – М. : Metallurgizdat, 2005. – 136 с.

10 **Одесский, П. Д.** Микролегированные стали для северных и уникальных металлических конструкций / П. Д. Одесский, Л. А. Смирнов, Д. В. Кулик. Учебное пособие. – М. : Интернет инженеринг, 2006. – 176 с.

11 **Мурсенков, Е. С., Кудашов, Д. В., Семернин, Г. В., Тарвид, Д. С.** Совершенствование технологии производства в условиях ЛПК ОАО «ОМК-Сталь» (филиал г. Выкса) трубных марок стали (09ГСФ, 13ХФА) : Сборник трудов XIII международного конгресса сталеплавателей. – Москва - Полевской, 2014. – С. 59–64.

12 **Михайлов, Г. Г., Леонович, Б. И., Кузнецов, Ю. С.** Термодинамика металлургических процессов и систем. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2009. – 520 с.

REFERENCES

1 *Konceptsiya razvitiya obrabatyvayusheii promyshlennosti Respubliki Kazakhstan na 2023 – 2029 gody* [The concept of development of the manufacturing industry of the Republic of Kazakhstan for 2023-2029] [Text], utverzhennaya Pravitelstvom Respubliki Kazakhstan ot 20 decabriya 2018 goda № 846.

2 *Strategiya dostizheniya uglerodnoi ntitalnosti Respubliki Kazakhstan do 2060 goda* [On approval of the Strategy for achieving Carbon Neutrality of the Republic

of Kazakhstan until 2060] [Text], utverzhennaya Ukazom Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 2 fevraliya 2023 goda № 121.

3 Kazakhstan 2022: Dobrovolnyi nacionalnyi obzor o realizacii Povestki do 2030 goda v oblasti ustoichivogo razvitiya [Kazakhstan 2022: Voluntary national review on the implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development] [Text], 2022. – 258 p.

4 Diagnostika gornorydnogo sektora – Kazakhstan: Otchet [Diagnostics of the mining sector – Kazakhstan: Report] [Text]. – The World Bank, 2023. – 123 p.

5 **Shahpazov, E. H., Zaitsev, A. I.** Sovremennye tendencii razvitiya metallurgicheskoi technologii dlya obespecheniya trebovaniy k urovnu i stabilnosti svoystv, ekspluatatsionnoi nadezhnosti stali [Modern trends in the development of metallurgical technology to ensure requirements for the level and stability of properties, operational reliability of steel] [Text]. – Trudy naucno-tehnicheskoi konferencii «Problemy i perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispolzovaniem zavershennykh fundamentalnykh issledovaniy i NIOKR». – Ekaterinburg : UroRAN, 2011. – P. 26 – 31.

6 **Rovnushkin, V. A., Smirnov, L. A.** Sostoyanie i zadachi razvitiya electrostaleplavilnogo proizvodstva [The state and objectives of the development of electric steelmaking] [Text]. – Trudy naucno-tehnicheskoi konferencii «Problemy i perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispolzovaniem zavershennykh fundamentalnykh issledovaniy i NIOKR». – Ekaterinburg : UroRAN, 2011. – P. 70–77.

7 **Mileikovskii, A. B., Malahov, N. V.** Razrabotka tehnologii vnepechnoi obrabotki nizkolegirovannykh trubnykh staley povyshennykh korrozionnoi stoikosti [Development of technology for non-furnace processing of low-alloy tube steels with increased corrosion resistance] [Text]. – Trudy naucno-tehnicheskoi konferencii «Problemy i perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispolzovaniem zavershennykh fundamentalnykh issledovaniy i NIOKR». – Ekaterinburg : UroRAN, 2011. – P. 130–138.

8 **Zaitsev, A. I., Rodionova, I. G., Semernin, G. V., Shaposhnikov, N. G., Kazankov, A. U.** Novye tipy neblogopriyatnykh nemetallicheskih vkluchenii na osnove MgO–Al₂O₃ i metallurgicheskie faktory, opredelyayushchie ih sodержanie v metalle. Ch. 1. Prichiny i mehanizmy obrazovaniya v stali nemetallicheskih vkluchenii na osnove alumomagnievoi shpineli [New types of unfavorable non-metallic inclusions based on MgO-Al₂O₃ and metallurgical factors determining their content in metal. Part 1. Causes and mechanisms of formation of non-metallic inclusions based on alumomagnesium spinel in steel] [Text] // Metallurg. – 2011. – № 2. – P. 50 – 55.

9 **Belyi, A. P., Isaev, O. B., Matrosov, U. I., Nosochenko, A. O.** Centralnaya segregatsionnaya neodnorodnost v nepreryvnolitykh listovykh zagotovkah i tolstolistovom prokate [Central segregation heterogeneity in continuously cast sheet blanks and thick-sheet rolling] [Text]. – M. : Metallurgizdat, 2005. – 136 p.

10 **Odesskii, P. D.** Mikrolegirovanie stali dlya severnykh i unikalnykh metallicheskih konstruktsii / P. D. Odesskii, L. A. Smirnov, D. V. Kulik. Uchebnoe posobie [Microalloyed steels for northern and unique metal structures] [Text]. – M. : Intermet Inzhiniring, 2006. – 176 p.

11 Mursenkov, E. S., Kudashov, D. V., Semernin, G. V., Tarvid, D. S. Sovershenstvovsnie tehnologii proizvodstva v usloviyah LPK OAO «OMK-Stal» (filial g. Vyksa) trubnyh marok stali (09GSF, 13HFA) : Sbornik trudov XIII mezhdunarodnogo kongressa staleplavilshchikov [Improvement of production technology in the conditions of the LPC of JSC OMK-Steel (Vyksa branch) of pipe grades of steel (09GSF, 13XFA)] [Text]. – Moskva - Polevskoi, 2014. – P. 59–64.

12 Mihailov, G. G., Leinivich, B. I., Kuznecov, U. S. Termodinamika metallurgicheskikh procesov i system [Thermodynamics of metallurgical processes and systems] [Text]. – M. : Izd.Dom MISiS, 2009. – 520 p.

Received 09.11.24.

Received in revised form 22.11.24.

Accepted for publication 24.11.24.

*П. О. Быков¹, *Р. А. Бегалиев², А. Б. Куандыков³,
М. М. Сүйіндіков⁴, Э. Сименс⁵*

^{1,2,3,4}Торайғыров Университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

⁵Анхальт қолданбалы ғылымдар университеті,
Германия Федеративтік Республикасы, Кетен қ.

09.11.24 ж. баспаға түсті.

22.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

24.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТӨМЕН ЛЕГИРЛЕНГЕН БОЛАТТЫ БАЛҚЫТУ КЕЗІНДЕГІ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ СУТЕГІ КРЕКИНГІНЕ ТӨЗІМДІЛІГІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Соңғы онжылдықта мұнай-газ саласы коррозияға төзімді болат жіксіз құбырларға өте мұқтаж, бұл құрамында күкіртсутек пен басқа да агрессивті қоспалардың көп мөлшері бар мұнай өндірудің дамуына байланысты.

Сутегі крекингіне төзімділіктің жоғары көрсеткіштеріне қол жеткізудегі шешуші рөл металл емес қоспалардың түрін, санын, мөлшерін және морфологиясын, қоспалардың болу формаларын, металл емес артық фазалардың бөлінуін немесе құрылымдық компоненттерді нығайту әдістерін әзірлеу және қолдану болып табылады.

Авторлар «KSP Steel» ЖШС ҚФ кәсіпорнында 13хфа болатты балқыту және құюдың қолданыстағы технологиясына талдау жүргізді және сутегі крекингіне төзімділік көрсеткіштерінің жоғары деңгейін қамтамасыз ететін 13хфа маркалы болатты балқыту, пештен тыс өңдеу және құю бойынша технологиялық іс-шаралар кешенін әзірледі.

Әзірленген технологиялық көрсеткіштер бойынша жүргізілген жүзу сериясы CLR және CTR = 0 % деңгейінде НИС негізгі көрсеткіштеріне қол жеткізуді қамтамасыз етті.

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» АР23487674 жобасы бойынша жүргізілді.

Кілтті сөздер: төмен легирленген болат, сутегі крекингі, балқыту, пештен тыс өңдеу, үздіксіз құю.

П. О. Быков¹, *Р. А. Бегалиев², А. Б. Куандыков³,

М. М. Суюндыков⁴, Э. Сименс⁵

^{1,2,3,4}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

⁵университет прикладных наук Анхальта,

Федеративная Республика Германия, г. Кёген

Поступило в редакцию 09.11.24.

Поступило с исправлениями 22.11.24.

Принято в печать 24.11.2024.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ

В последние десятилетия нефтегазовая отрасль остро нуждается в стальных бесшовных трубах стойких к коррозионному разрушению, что связано с развитием добычи нефти содержащей большое количество сероводорода и других агрессивных примесей.

Ключевая роль в достижении высоких показателей по стойкости к водородному растрескиванию отводится разработке и использованию методов управления типом, количеством, размером и морфологией неметаллических включений, форм присутствия примесей, выделений неметаллических избыточных фаз или упрочняющих структурных составляющих.

Авторами проведен анализ действующей технологии выплавки и разливки стали 13ХФА на предприятии ПФ ТОО «KSP Steel» и разработан комплекс технологических мероприятий по выплавке, внепечной обработке и разливке стали марки 13ХФА, обеспечивающих высокий уровень показателей по стойкости к водородному растрескиванию.

Проведенная серия плавов по разработанным технологическим показателям обеспечила достижение основных показателей НИС на уровне CLR и CTR = 0%.

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 АР23487674 «Комплексная переработка бокситов Казахстана с доизвлечением железа альтернативными восстановителями при реализации стратегии низкоуглеродистого развития».

Ключевые слова: низколегированная сталь, водородное растрескивание, плавка, внепечная обработка, непрерывная разливка.

***A. Zhakan¹, A. Zhunusov², A. Akhmetov³, S. Kabytkanov⁴, O. Yucel⁵**

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

^{1,3,4}Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute,

Republic of Kazakhstan, Karaganda

⁵Istanbul Technical University, Turkey, Istanbul

¹ORCID <https://orcid.org/0009-0002-3810-0528>

²ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9119-9737>

³ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1606-838X>

⁴ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1272-2065>

⁵ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3879-0410>

*e-mail: armat.01.01@mail.ru

THERMODYNAMIC MODELING OF THE PROCESS OF SMELTING A COMPLEX CHROMIUM-MANGANESE-SILICON-CONTAINING FERROALLOY

This article presents the results of thermodynamic modeling of the process of smelting chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy from technogenic raw materials of Kazakhstan. Thermodynamic modeling of chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy was carried out using the HSC Chemistry 6 software package (Outokumpu, Finland), based on the principles of minimizing the Gibbs energy and thermodynamic variational principles. Thermodynamic analysis for modeling the process of smelting a complex alloy was carried out in the temperature range from 500 to 2000 °C for four real charge compositions (with a 5% deficiency of solid carbon, with a normal course of the regime, and with an excess of solid carbon of 5% and 10% of the stoichiometry). The mechanism of combined carbothermic reduction of silicon, manganese, chromium and iron was studied using the Fe-Cr-Mn-Si-Al-Ca-Mg-C-O system. The calculations performed allowed us to fully study all the physicochemical processes occurring during smelting of chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy using the carbothermic method. Based on the thermodynamic data, the optimum consumption of solid carbon per 100 kg of charge (chromium and manganese dust) was determined to be 10.75 kg. The chemical composition of the ferroalloy at 1800 °C is, %: Cr - 35.84; Mn - 24.47; Si - 16.25 and Fe - 22.63.

Keywords: complex ferroalloy, carbothermic process, chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy, thermodynamics, reduction.

Introduction

Complex alloys are primarily composed of elements such as iron, chromium, manganese, silicon, aluminum, and others [1–2].

In the theory and practice of producing chromium-manganese-silicon (Cr-Mn-Si) ferroalloys, the contributions of I. P. Kazachkov and N. P. Melikaev are particularly

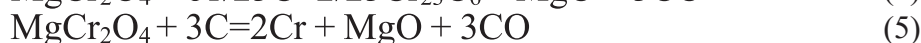
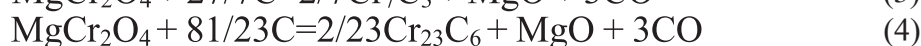
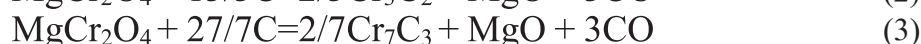
significant. Their research led to the development of a one-stage alloy smelting process, which is based on the reduction of iron, chromium, manganese, and silicon oxides from a mixture of chromium and manganese ores using carbon [3-6].

According to [7-9], the reduction of chromium ores begins with the reduction of chromite $\text{FeCr}_2\text{O}_4 + \text{C}$ according to the reaction:



The temperature at which the reduction begins is 1010 °C.

The reduction of magnochromite MgCr_2O_4 can proceed according to the reactions:

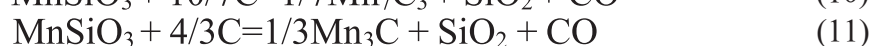
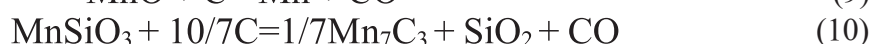


For a rough estimate of the temperatures at which the reduction of magnochromite begins, the value of the change in the Gibbs energy of the reaction was adopted



within the temperature range of 0 – 1535 °C, i.e. the same 1225, 1265, 1310 and 1385 °C, respectively.

In the reduction of manganese, special attention is paid to the reduction reactions from MnO and rhodonite MnSiO_3 , since higher manganese oxides tend to dissociate at high temperatures with the release of oxygen. This means that as the temperature increases, manganese oxides such as Mn_2O_3 and MnO_2 can decompose, releasing oxygen and turning into lower oxides, which plays a key role in the reduction process. The reduction reactions of these compounds can significantly affect the efficiency of manganese reduction in metallurgical processes. The following reactions are possible:



When considering the mechanism of silicon reduction, we note two important reactions:



Based on reliable experimental data [6], N.V. Tolstoguzov et al. demonstrated that silicon carbide (SiC) can exist in equilibrium with a metal containing more than 22% silicon. In the case of smelting a chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy with a silicon content of 10%, the probability of reaction (13) is negligible. For reaction (14), the temperature at which reduction begins is 1665 °C [10-11].

Materials and methods

Thermodynamic modeling of the Cr-Mn-Si ferroalloy production process encompasses all thermodynamic principles related to chemical reactions, phase equilibria, and heat exchange within the system [12].

The production of Cr-Mn-Si ferroalloys is achieved through the reduction of Cr, Mn, and Si oxides with carbon.

Thermodynamic simulations of the Cr-Mn-Si ferroalloy process were conducted using the HSC Chemistry software, which provides extensive thermochemical data on enthalpy (H), entropy (S), and heat capacity (C) for over 29 000 chemical compounds. This software follows the methodology of the SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) consortium, which consists of scientific institutions engaged in developing 58 thermodynamic databases for inorganic and metallurgical systems. The consortium includes organizations from Germany, Canada, France, Sweden, the UK, and the USA, and applies this data to solve practical engineering challenges. The work utilized the Equilibrium Compositions module, which is based on the equilibrium calculation method relying on the minimization of Gibbs free energy [12-13].

The principles for thermodynamic modeling of Fe-Cr-Mn-Si-Al-Ca-Mg-C-O systems were established for the thermodynamic analysis [12-13].

The analysis was performed within a temperature range from 500 to 2000 °C. The lower limit represents the standard state, and temperature variations up to 900 °C result in minimal changes, while the upper limit corresponds to the final state, characterized by the melting points of the components and the formation of the final reaction products. This range defines the initial and final equilibrium states of the system. In all calculations, a pressure of 0.1 MPa was assumed, which roughly corresponds to one physical atmosphere, commonly used in most metallurgical processes, including those involving the interaction of solid phases with carbon. The system's volume is determined by its thermodynamic state, and the system is considered to be in a closed state [12-16].

To establish the optimal consumption of solid carbon in the smelting of Cr-Mn-Si ferroalloy, a thermodynamic analysis of four variants of the charge mixture composition was carried out (Table 1).

Table 1 – Chemical composition of the charge mixture, kg

Charging options	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C	O/C*
№ 1	12.66	7.84	8.50	37.55	6.31	1.39	15.37	9.85	3,90
№ 2	12.44	7.71	8.33	37.88	6.39	1.37	15.07	10.33	3,71
№ 3	12.18	7.59	8.18	38.16	6.46	1.35	14.81	10.75	3,56
№ 4	11.40	7.44	8.51	38.90	6.42	1.40	14.29	11.13	3,44

* - ratio of the sum of oxides to solid carbon

The following phases were adopted for the metallic phase: MnC₂, Cr, Fe, Mn, Cr₄C, Fe₃C, C, Cr₃C₂, Cr₇C₃, FeSi, Cr₃Si, CrSi, Fe₃Si, Cr₅Si₃, Si, CrSi₂, SiC, FeSi₂, Fe₅Si₃, MnSi, MnSi_{1.7}, MnSi_{1.727}, Mn₅Si₃, Mn₃Si;

The following phases are adopted for the slag phase: Cr_2FeO_4 , Cr_2O_3 , SiO_2 , $\text{FeO}_{1.056}$, MgSiO_3 , FeAl_2O_4 , Al_2O_3 , $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, CaSiO_3 , Mg_2SiO_4 , MgCr_2O_4 , $(\text{CaMg})_{0.5}\text{SiO}_3$, $(\text{CaFe})_{0.5}\text{SiO}_3$, $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$, Cr_2MgO_4 , FeSiO_3 , MgO , $*3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Al}_4\text{Mg}_2\text{Si}_5\text{O}_{18}$, $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, FeO , $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, CaMgSiO_4 , $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $*2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $*2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $*2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, CaO , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$, $*3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$, $*3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $*3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$, Ca_3SiO_5 , $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, $*3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $*2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, MgCO_3 , CaFeSiO_4 , Fe_2MgO_4 , $*3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgFe}_{1.415}\text{Cr}_{0.632}\text{O}_{4.07}$, $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, $*2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, $\text{Mg}_7\text{Al}_9\text{O}_4 \cdot \text{Al}_9\text{Si}_3\text{O}_{36}$, $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{SiO}_{10}$, $\text{Ca}_3(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_3 \cdot \text{CaCO}_3$, $\text{Mn}_{0.9554}\text{Ca}_{0.0446}\text{SiO}_3$, $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$, CaFe_3O_5 , $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, MnO , MnSiO_3 , CaFe_5O_7 , Fe_2MnO_4 , $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$, $*2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaCO}_3$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{CaCO}_3$, $*12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_3(\text{CO})_{12}$, $*4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, Cr_5O_{12} , $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$, $\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2$, Mn_2SiO_4 .

The following phases are adopted for the gas phase: $\text{CO}_{(g)}$, $\text{CO}_{2(g)}$, $\text{SiO}_{(g)}$, $\text{Mg}_{(g)}$, $\text{Al}_{(g)}$, $\text{Si}_{(g)}$, $\text{AlO}_{(g)}$, $\text{MgO}_{(g)}$, $\text{Al}_2\text{O}_{(g)}$, $\text{Mn}_{(g)}$, $\text{MnO}_{(g)}$.

Results and discussion

Results of modeling the process in the condensed phase.

As a result of the modeling (Fig. 1 – 12), it was established that during the smelting of Cr-Mn-Si ferroalloy by the carbothermic method up to 2000 °C, the formation and some change of elements occurs, accompanied by their transition to a condensed phase.

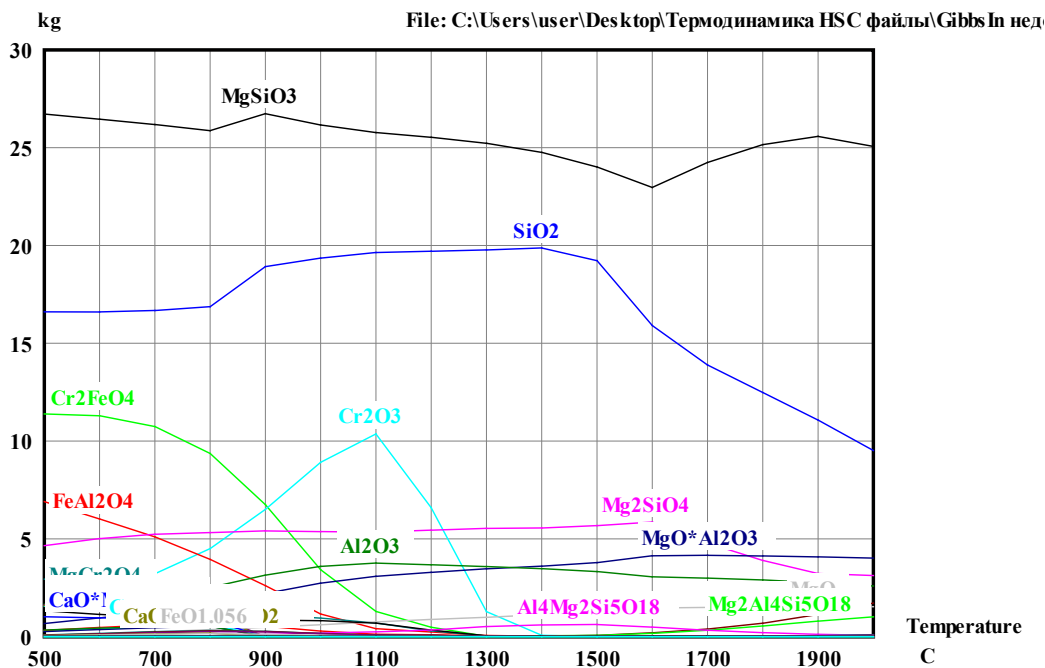


Figure 1 – Dependence of the change in slag phases on the temperature of the charge mixture (Deficiency of 5% of stoichiometry)

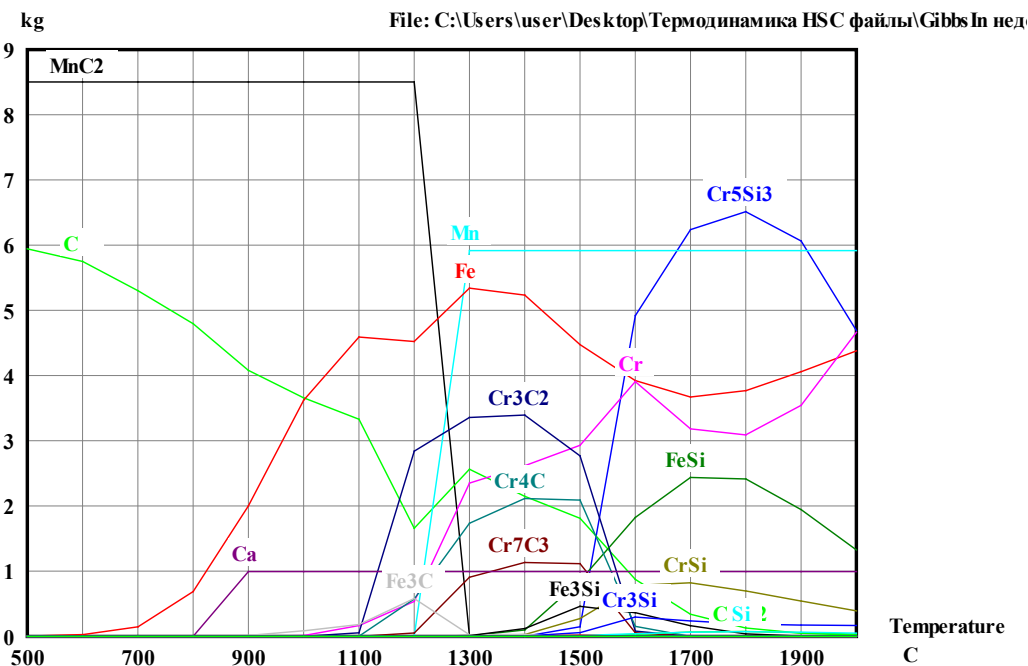


Figure 2 – Dependence of the change in metal phases on the temperature of the charge mixture (Deficiency of 5% of stoichiometry)

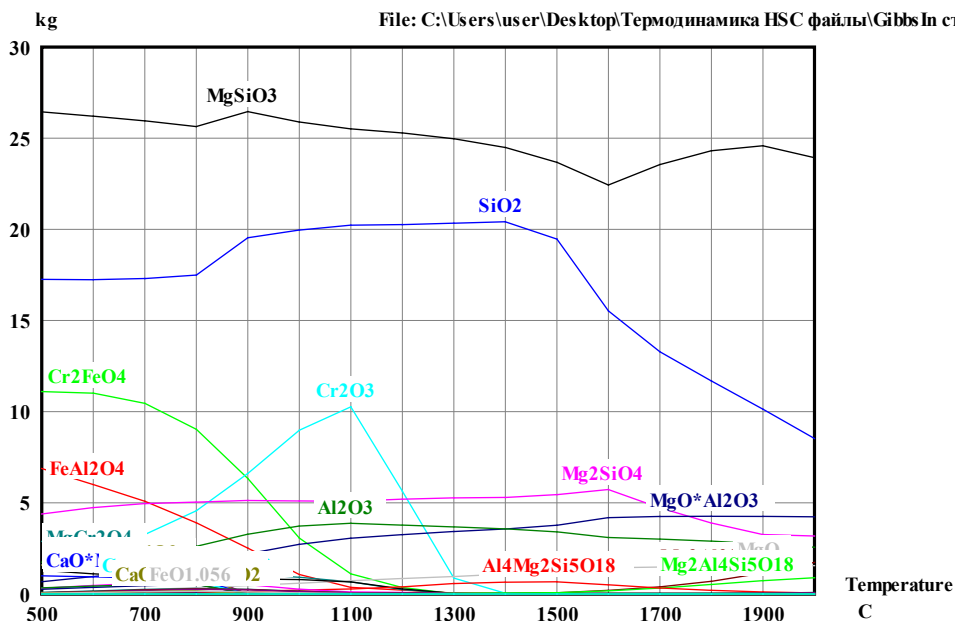


Figure 3 – Dependence of the change in slag phases on the temperature of the charge mixture (Stoichiometry)

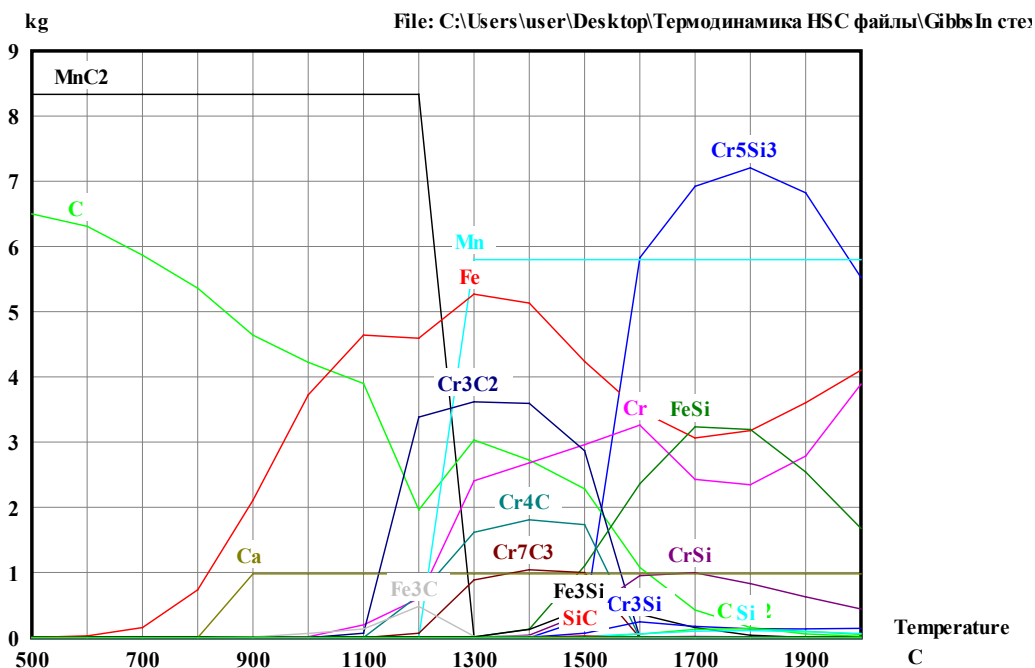


Figure 4 – Dependence of the change in metal phases on the temperature of the charge mixture (Stoichiometry)

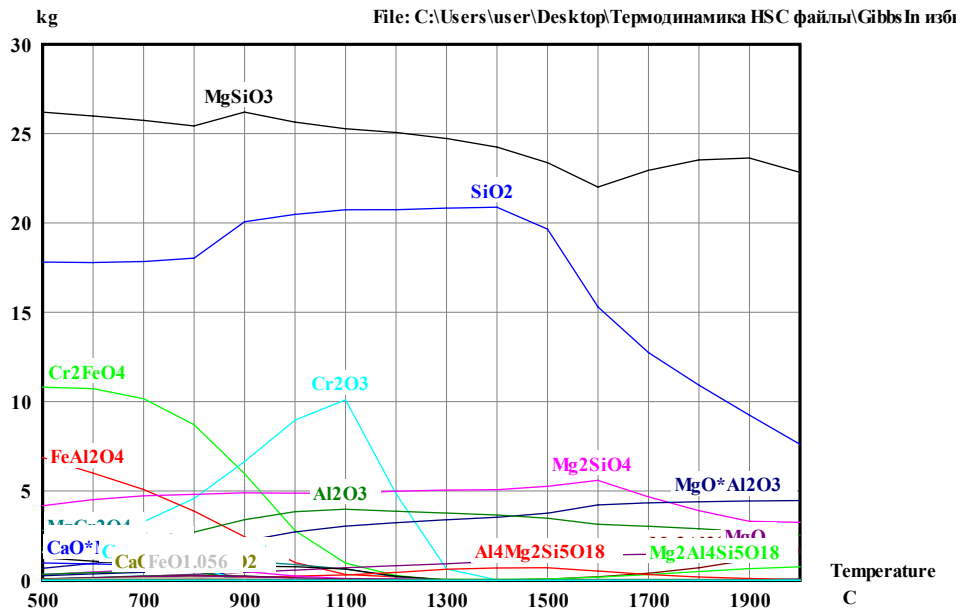


Figure 5 – Dependence of the change in slag phases on the temperature of the charge mixture (Excess of 5% of stoichiometry)

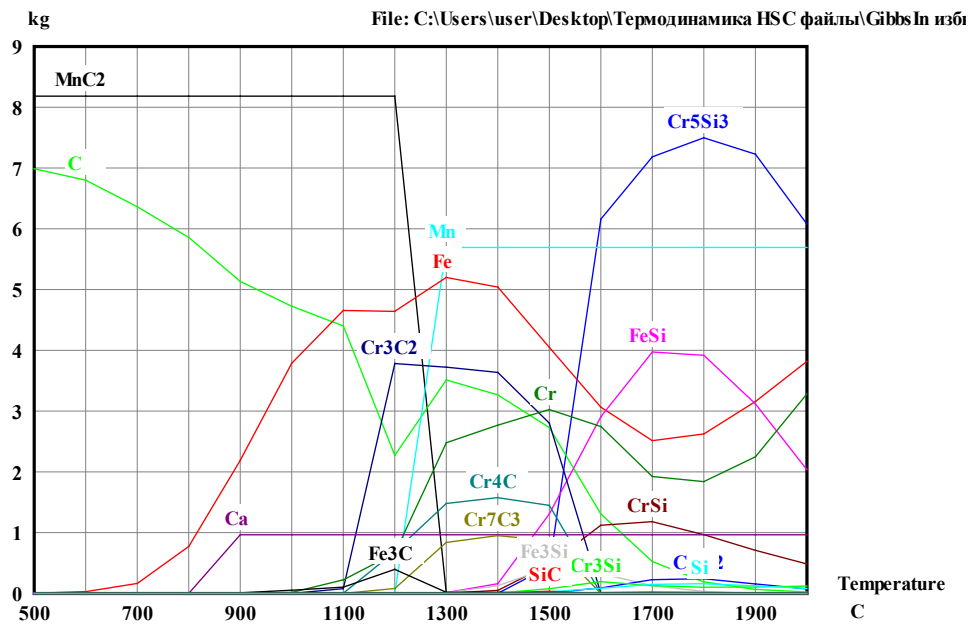


Figure 6 – Dependence of the change in metal phases on the temperature of the charge mixture (Excess of 5% of stoichiometry)

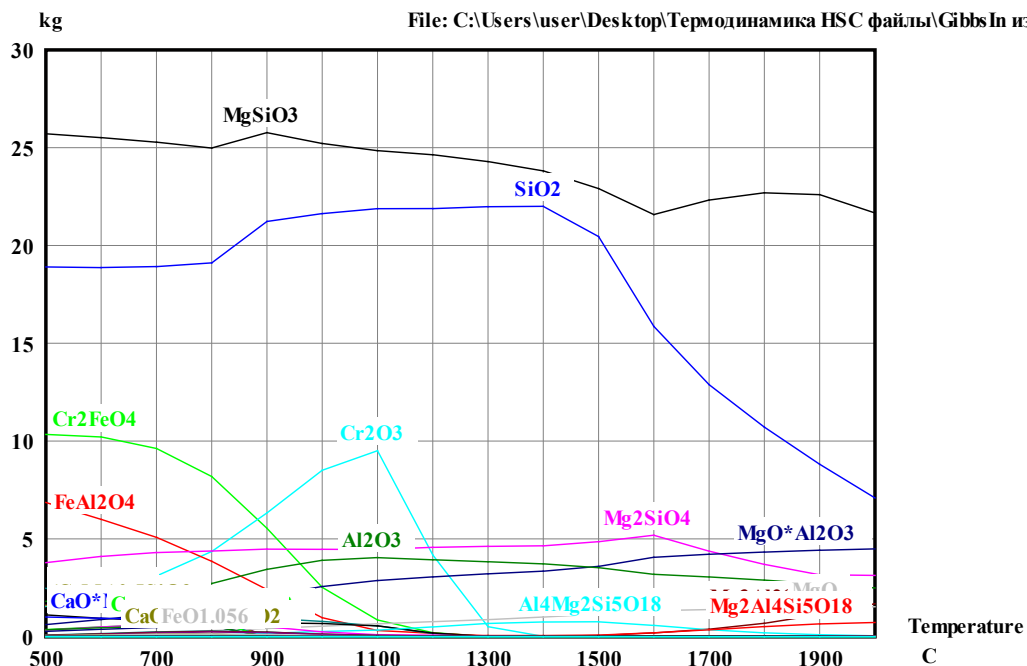


Figure 7 – Dependence of the change in slag phases on the temperature of the charge mixture (Excess of 10% of stoichiometry)

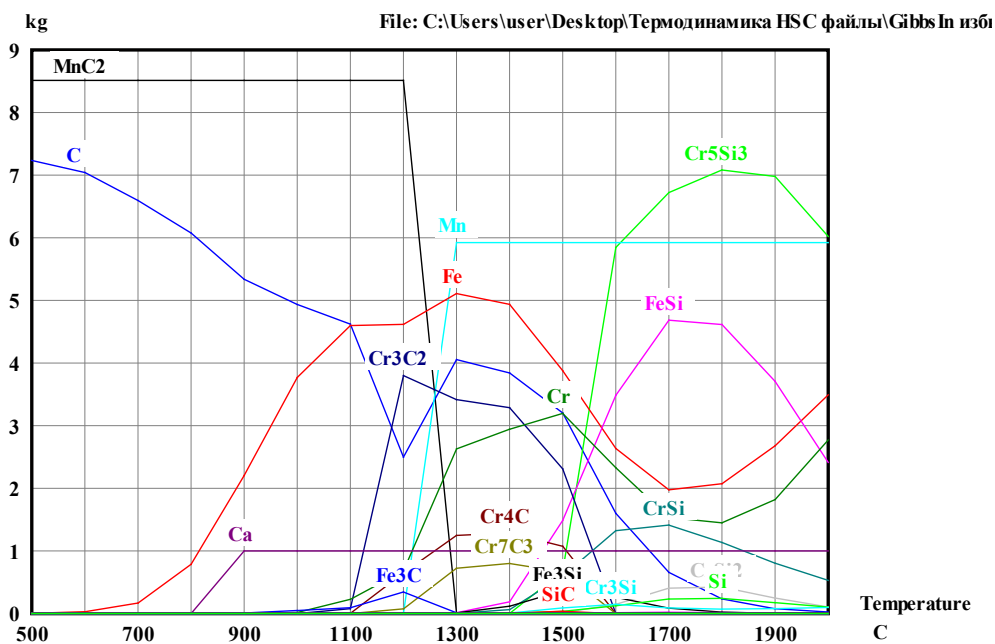


Figure 8 – Dependence of the change in metal phases on the temperature of the charge mixture (Excess of 10% of stoichiometry)

The results of modeling the process in the gas phase.

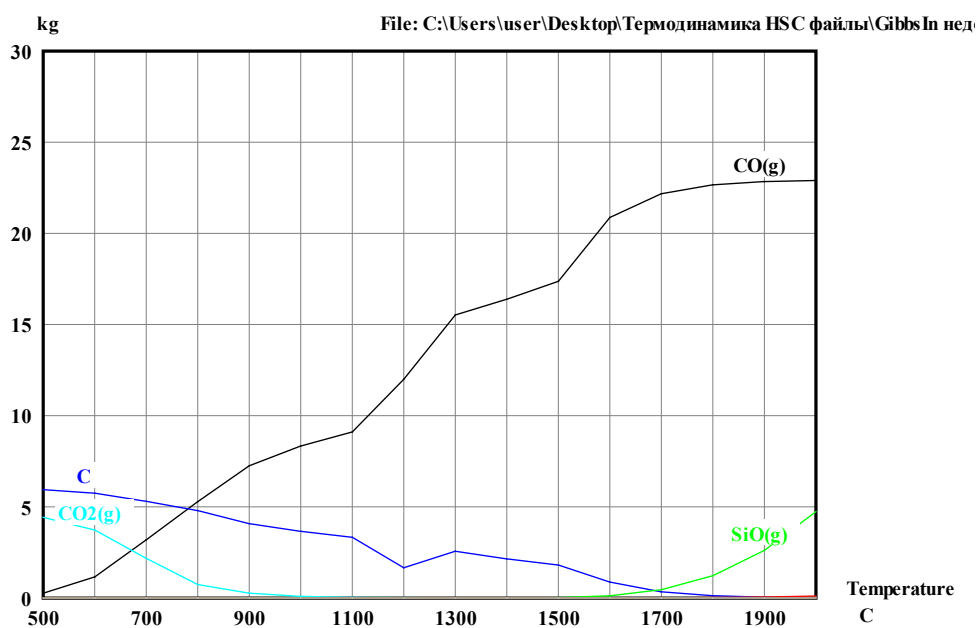


Figure 9 – Dependence of the change in gas phases on the temperature of the charge mixture (Deficiency of 5% of stoichiometry)

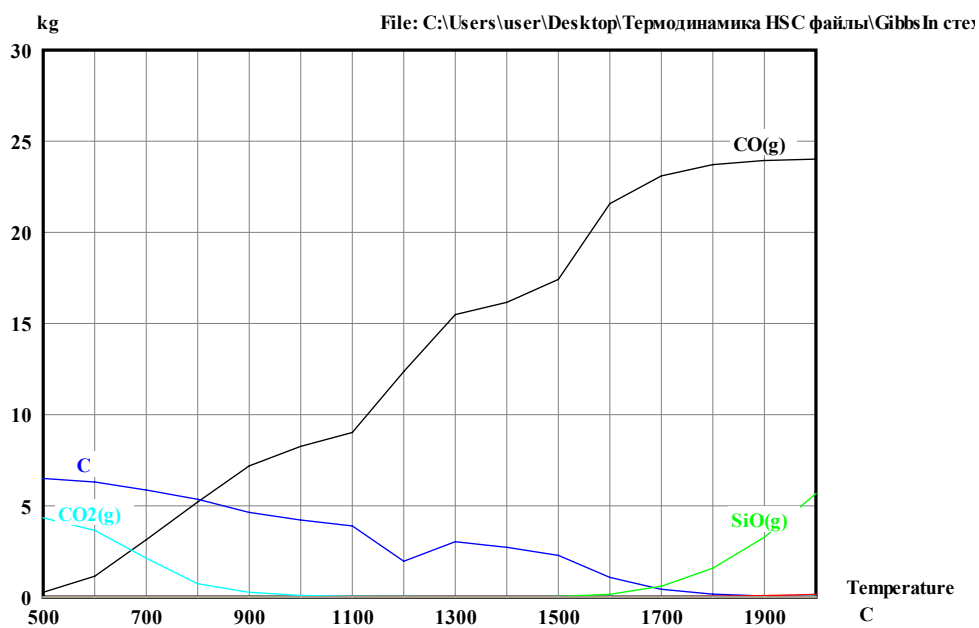


Figure 10 – Dependence of the change in gas phases on the temperature of the charge mixture (Stoichiometry)

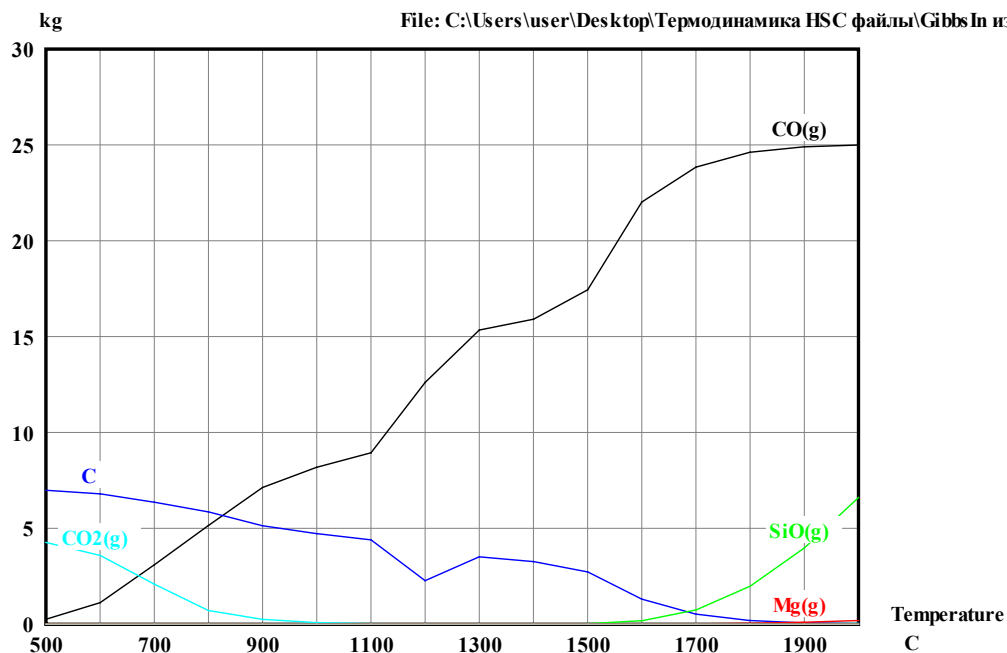


Figure 11 – Dependence of the change in gas phases on the temperature of the charge mixture (Excess of 5% of stoichiometry)

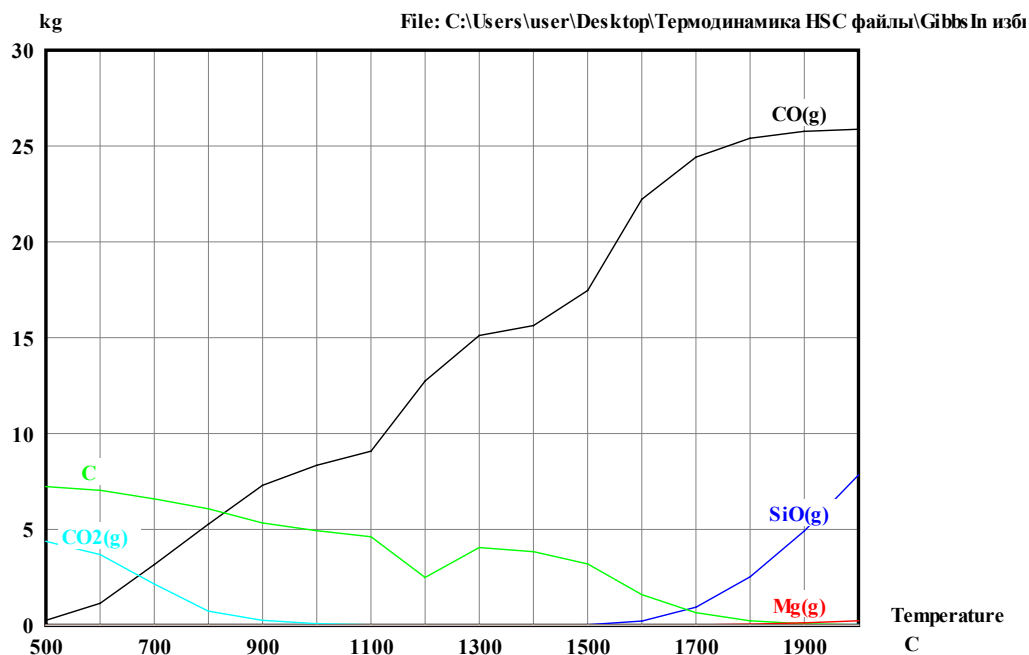


Figure 12 – Dependence of the change in gas phases on the temperature of the charge mixture (Excess of 10% of stoichiometry)

The following are the results of the analysis of the simulation and data presented in Figures 1–12.

Charge mixture with a reducing agent deficiency of 5%. The amount of the MgSiO_3 phase in the temperature range from 500 to 2000 °C is 23-26 kg. The SiO_2 phase at 500 °C is 16 kg, and at 2000 °C it decreases to 9 kg. The reduction processes leading to the formation of metal begin at a temperature of 1200 °C, while the content of Fe and Mn in the metallic phase reaches 5-6 kg at a temperature of 1300 °C. The amount of the Cr_2FeO_4 phase begins with 11 kg at 500 °C and decreases to 1 kg at 1100 °C. The Cr_2FeO_4 phase decomposes into Cr_2O_3 , reaching 10 kg at 1100 °C. In the temperature range from 1100 to 1300 °C, the Cr_2O_3 phase decreases in the slag mixture, while the amount of Cr in the metallic phase increases to 4 kg. The amount of MnC_2 is 8.5 kg in the temperature range of 500–1200 °C, after which it decreases, and the amount of manganese in the metallic phase reaches 5.92 kg. Starting from a temperature of 1100 °C, the amount of solid carbon and oxide compounds decreases, and in the temperature range of 1700 °C they reach minimum values. At the same time, as the amount of solid carbon decreases, the content of COgas increases. The content of Fe in the temperature range from 900 to 1300 °C is 2-5 kg, and at 2000 °C it reaches 4.38 kg. Silicon in the metal is present in the form of phases Cr_5Si_3 , FeSi, CrSi, Fe_3Si , Cr_3Si , CrSi_2 .

The charge mixture according to stoichiometry. In this case, no significant changes are observed between the phases. The SiO_2 phase at 500 °C is 17 kg, and at 2000 °C it decreases to 8 kg. The reduction processes leading to the formation of metal begin at a temperature of 1200 °C, while the content of Fe and Mn in the metallic phase is 5-6 kg at a temperature of 1300 °C. The amount of the Cr_2FeO_4 phase begins with 11 kg at 500 °C and decreases to 1 kg at 1100 °C. The Cr_2FeO_4 phase decomposes into Cr_2O_3 , which at 1100 °C is 10 kg. In the temperature range from 1100 to 1300 °C, the Cr_2O_3 phase decreases in the composition of the slag mixture, and the amount of Cr in the metallic phase increases to 3 kg. The amount of MnC_2 in the temperature range of 500-1200 °C is 8.33 kg, after which it decreases, and the manganese content in the metallic phase reaches 5.80 kg. Starting from the temperature of 1100 °C, the amount of solid carbon and oxide compounds decreases, and in the temperature range of 1700 °C they reach minimum values. As the amount of solid carbon decreases, the content of COgas increases. The content of Fe in the temperature range from 900 to 1300 °C is 2–5 kg, and at 2000 °C it reaches 4.10 kg. Si in the metal is present in the form of the phases Cr_5Si_3 , FeSi, CrSi, Fe_3Si , Cr_3Si , CrSi_2 .

The charge mixture with a 5% excess of reducing agent. In this case, there were no significant changes between the phases. The amount of the MgSiO_3 phase in the temperature range from 500 to 2000 °C is 22–26 kg. The SiO_2 phase at 500 °C is 17 kg, and at 2000 °C it decreases to 7 kg. The amount of MnC_2 in the temperature range from 500 to 1200 °C is 8.18 kg, after which it begins to decrease, and the Mn content in the metallic phase reaches 5.69 kg. Starting from a temperature of 1100 °C, the amount of solid carbon and oxide compounds decreases, and in the temperature range of 1700 °C it reaches minimum values. As the amount of solid carbon decreases, the COgas content increases.

The charge mixture with a 10% excess of reducing agent. The amount of the $MgSiO_3$ phase in the temperature range from 500 to 2000 °C is 21–25 kg. The SiO -phase at 500 °C is 18 kg, and at 2000 °C it decreases to 7 kg. The amount of MnC_2 in the temperature range from 500 to 1200 °C is 8.51 kg, after which it begins to decrease, and the Mn content in the metallic phase reaches 5.92 kg. Starting from a temperature of 1100 °C, the amount of solid carbon and oxide compounds decreases, and in the temperature range of 1700 °C they reach minimum values. As the amount of solid carbon decreases, the COgas content increases.

Based on thermodynamic data, the change in the composition of metal and slag for each charge mixture was calculated in the temperature range from 1000 to 2000 °C (Table 2).

Table 2 – Chemical composition of metal and slag

Charge mixture № 1 – 5 % solid carbon deficiency									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
1000	0.13	0.00	0.00	37.15	17.14	2.57	50.97	8.56	20.76
1100	1.95	0.00	0.00	43.64	17.08	1.01	51.99	8.73	21.18
1200	18.61	30.73	0.00	26.30	11.07	0.56	56.09	9.42	22.85
1300	34.78	26.63	0.02	24.22	2.26	0.12	61.96	10.41	25.25
1400	37.70	25.91	0.27	23.77	0.13	0.06	63.27	10.67	25.87
1500	37.76	25.80	2.20	23.78	0.01	0.03	62.73	10.87	26.36
1600	37.40	25.54	9.65	23.53	0.01	0.03	60.11	11.64	28.21
1700	37.45	25.57	12.02	23.49	0.01	0.04	58.89	12.00	29.07
1800	37.82	25.83	12.16	23.63	0.01	0.07	58.06	12.25	29.61
1900	38.60	26.39	10.89	23.90	0.04	0.13	57.11	12.53	30.20
2000	39.85	27.34	8.41	24.32	0.13	0.22	55.73	12.92	30.98
Charge mixture № 2 - stoichiometry									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
1000	0.14	0.00	0.00	35.84	16.91	2.32	51.62	8.70	20.44
1100	2.24	0.00	0.00	41.54	16.75	0.88	52.65	8.88	20.85
1200	20.96	28.91	0.00	25.14	9.54	0.47	57.51	9.70	22.78
1300	34.74	25.57	0.03	23.41	1.54	0.10	62.85	10.60	24.90
1400	36.71	25.09	0.34	23.16	0.07	0.05	63.73	10.80	25.35
1500	36.69	25.00	2.87	23.15	0.01	0.02	62.95	11.06	25.96
1600	36.28	24.70	11.58	22.86	0.00	0.02	59.80	12.00	28.17
1700	36.36	24.75	14.22	22.85	0.00	0.03	58.32	12.45	29.20
1800	36.81	25.06	14.37	23.08	0.00	0.05	57.24	12.79	29.92
1900	37.72	25.69	12.84	23.49	0.01	0.09	56.07	13.17	30.66
2000	39.13	26.70	10.03	24.05	0.06	0.18	54.52	13.66	31.58

Charge mixture № 3 – 5% solid carbon excess									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
1000	0.15	0.00	0.00	34.67	16.62	2.14	52.23	8.84	20.18
1100	2.46	0.00	0.00	39.76	16.38	0.78	53.25	9.01	20.57
1200	22.51	27.52	0.00	24.21	8.25	0.40	58.73	9.94	22.69
1300	34.26	24.78	0.03	22.79	1.13	0.09	63.50	10.75	24.54
1400	35.69	24.44	0.39	22.63	0.05	0.04	64.11	10.90	24.90
1500	35.62	24.34	3.48	22.62	0.00	0.02	63.15	11.21	25.62
1600	35.19	24.03	12.97	22.30	0.00	0.02	59.68	12.25	28.05
1700	35.30	24.10	16.06	22.32	0.00	0.02	57.88	12.77	29.32
1800	35.84	24.47	16.25	22.63	0.00	0.03	56.57	13.15	30.25
1900	36.87	25.18	14.49	23.18	0.01	0.07	55.23	13.52	31.18
2000	38.40	26.24	11.39	23.86	0.03	0.15	53.57	13.97	32.28

Charge mixture № 4 – 10% solid carbon excess									
t, °C	Metal composition, %				Slag composition, %				
	Cr	Mn	Si	Fe	Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
1000	0.15	0.00	0.00	33.34	15.70	2.03	53.75	8.87	19.65
1100	2.45	0.00	0.00	37.96	15.43	0.73	54.78	9.04	20.03
1200	22.34	28.45	0.00	22.17	7.14	0.35	60.44	9.97	22.10
1300	32.12	25.60	0.03	22.17	0.90	0.07	64.68	10.68	23.66
1400	33.27	25.31	0.45	22.06	0.04	0.03	65.14	10.82	23.97
1500	33.17	25.19	4.16	22.04	0.00	0.02	63.99	11.19	24.80
1600	32.76	24.86	13.90	21.75	0.00	0.01	60.40	12.31	27.28
1700	32.90	24.96	17.56	21.80	0.00	0.01	58.16	13.03	28.80
1800	33.54	25.45	17.79	22.21	0.00	0.02	56.37	13.62	29.99
1900	34.69	26.33	15.72	22.91	0.00	0.05	54.60	14.25	31.10
2000	36.30	27.57	12.27	23.74	0.01	0.12	52.63	14.97	32.27

Table 2 shows that the composition of the alloys obtained at temperatures of 1600–2000 °C typical for pyrometallurgical processes is satisfactory and is characterized by a fairly high content of leading elements. Some change in them is expectedly observed depending on the content of solid carbon in the initial charge.

Information about financing

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19676290).

Conclusions

A thermodynamic analysis of the Cr-Mn-Si ferroalloy smelting process using the carbothermal method was conducted within the Fe-Cr-Mn-Si-Al-Ca-Mg-C-O system. For comparative analysis, a temperature of 1800 °C was chosen, corresponding to the temperature of tapping the alloy from the ore-smelting furnace. The Mn content in all charge mixtures is almost the same - 24.47-25.83%. A high Cr content (37.82%) in the alloy is observed in charge mixture № 1, however, a high silicon content in the slag indicates an obvious deficiency of the reducing agent. For a complex ferroalloy, the

Si content in the alloy plays an important role, since Si, forming Mn and Cr silicides, contributes to a higher extraction of the leading elements into the alloy and facilitates the tapping of the alloy from the furnace. In this regard, the preferred composition of the charge mixture is № 3. The temperature range of metal formation is 1500–1800 °C. The predicted composition of the Cr-Mn-Si containing ferroalloy at a temperature of 1800 °C, %: Cr – 35.84; Mn – 24.47; Si – 16.25; Fe – 22.63.

REFERENCES

- 1 **Zhakan, A. M.** Hrom jäne marganets qūramdas keşendi qorytpalardy balqyтуға арналған ыıkızatty zertteu jäne talдаu [Research and analysis of raw materials for the smelting of complex alloys with chromium and manganese components]: mag. ... diss: 7M07203. – Aktobe, 2024. – 43 P. (In Kazakh)
- 2 **Salingerei, N. A.** Fazovyе ravnovesiia pri plavke khromomargantsevo-kremnievogo splava [Phase equilibria during melting of a chromium-manganese-silicon alloy]: dis. ... magistr tekhn. nauk: 6M070900. – Karaganda, 2019. – 53 p. (In Russian)
- 3 **Druinsky, M. I., Zhuchkov, V. I.** Poluchenie kompleksny`x ferrosplavov iz mineral`nogo sy`r`ya Kazaxstana [Production of complex ferroalloys from mineral raw materials of Kazakhstan]. – Alma-Ata: Nauka, 1988. – 208 P. (In Russian)
- 4 **Kazachkov, I. P.** // Legirovanie stali [Alloying of steel]. Kiev, 1982, 120 P. (In Russian)
- 5 **Morozov, A. N., Khitrik, S. I.** // Proizvodstvo ferrosplavov [Production of ferroalloys]: Collection № 2. – M., 1973. – P. 98–100 (In Russian)
- 6 **Tolstoguzov, N. V., Topilsky, P. V., Druinsky, M. I., etc.** // Proizvodstvo ferrosplavov [Production of ferroalloys]. Kemerovo, 1976. – Issue 3. – P. 50–55. (In Russian)
- 7 **Mao, William & Hendrikx, Ruud & Sloof, Wim G.** Prediction of Oxide Phases Formed upon Internal Oxidation of Advanced High-Strength Steels. Oxidation of Metals. – 89. P. – 1–19. – 2018. – <https://doi.org/10.1007/s11085-017-9815-4>.
- 8 **Auinger, M., Praig, V. G., Linder, B., Danninger, H.** Grain boundary oxidation in ironbased alloys, investigated by ^{18}O enriched water vapour - the effect of mixed oxides in binary and ternary Fe- $\{\text{Al, Cr, Mn, Si}\}$ systems, Corros. Sci. – 96. – 2015. – P. 133–143. – <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.009>.
- 9 **Berche, A., Tédenac, J.-C., & Jund, P.** Thermodynamic description of the Cr-Mn-Si system. Calphad, 55, P. 181–188. – 2016. – <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.09.002>.
- 10 **Lashgari, V. A., Kwakernaak, C. and W. G. Sloof.** Oxidation of Metals 81. – 2014. – 435.
- 11 **Fonstein, N.** Advanced High Strength Sheet Steels, (Springer, Zurich, 2015).
- 12 **Makhambetov, Ye. N.** Razrabotka tekhnologii vyplavki kompleksnykh kaltsiisoderzhashchikh ferrosplavov iz otvalnykh metallurgicheskikh shlakov i vysokozolnykh uglei: dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D070900 – Metallurgiya. [Development of technology for smelting

complex calcium-containing ferroalloys from landfill metallurgical slags and high-ash coals: dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D070900 -Metallurgy] - Karaganda Technical University, 125 p., Karaganda, Kazakhstan.

13 Makhambetov Ye. N., Gabdullin S. T., Zulhan Z., Zhakan A. M., Myrzagaliyev A. A. // Thermodynamic modeling of the smelting process of a new complex chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy. - Pavlodar: Science and technology Kazakhstan. – 2023. – № 3. – P. 211–221. – <https://doi.org/10.48081/ODXD9913>.

14 Makhambetov, Yerbolat & Gabdullin, S & Zhakan, A & Saulebek, Zh & Akhmetov, Amankeldy & Zulhan, Z & Mukanov, Samat. Production of complex Fe-Si-Mn-Cr ferroalloy using high-ash coal: a sustainable metallurgical approach. Materials Research Express. 11. – 2024. – <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad4f58>.

15 Kim, P. P., Larssen, T. A., & Tangstad, M. Reduction rates of MnO and SiO₂ in SiMn slags between 1500 and 1650 °C. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 119(5), P. 494–501. – 2019. – <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/153/2019>.

16 Makhambetov, Ye., Abdirashit, A., Myngzhassar, Ye., Baisanov, A., Zhakan, A. // Thermodynamic and experimental simulation of the smelting process of medium carbon ferromanganese with the use of zhezdinsky manganese ores. – Pavlodar: Science and technology Kazakhstan. – 2023. – № 4. – P. 141–153. – <https://doi.org/10.48081/HHSN1365>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Жақан, А. М. Хром және марганец құрамдас кешенді қорытпаларды балқытуға арналған шикізатты зерттеу және талдау: маг. ... дисс: 7M07203. – Ақтөбе, 2024. – 43 Б.

2 Салимгерей, Н. А. Фазовые равновесия при плавке хромомарганцево-кремниевое сплава: дис. ... магистр техн. наук: 6M070900. – Караганда. – 2019. – 53 С.

3 Друинский, М. И., Жучков, В. И. Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 208 с.

4 Казачков, И. П. // Легирование стали. Киев, 1982, 120 с.

5 Морозов, А. Н., Хитрик, С. И. // Производство ферросплавов: Сб. № 2 М., 1973. С. 98–100.

6 Толстогузов, Н. В., Топильский, П. В., Друинский, М. И. и др. // Производство ферросплавов. Кемерово. – 1976. – Вып. 3. – С. 50–55.

7 Mao, William & Hendrikx, Ruud & Sloof, Wim G. Prediction of Oxide Phases Formed upon Internal Oxidation of Advanced High-Strength Steels. Oxidation of Metals. 89. – P. 1–19. – 2018. – <https://doi.org/10.1007/s11085-017-9815-4>.

8 Auinger M., Praig V. G., Linder B., Danninger H. Grain boundary oxidation in ironbased alloys, investigated by 18O enriched water vapour - the effect of mixed oxides in binary and ternary Fe-{Al, Cr, Mn, si} systems, Corros. Sci. 96. – 2015. – P. 133–143. – <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.009>.

9 Berche, A., Tédenac, J.-C., & Jund, P. Thermodynamic description of the Cr-Mn-Si system. *Calphad*, 55, P. 181–188. – 2016. – <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.09.002>.

10 Lashgari, V. A., Kwakernaak, C. and Sloof, W. G. *Oxidation of Metals* 81, 2014. – 435.

11 Fonstein, N. *Advanced High Strength Sheet Steels*, (Springer, Zurich, 2015).

12 Махамбетов, Е. Н. Разработка технологии выплавки комплексных кальцийсодержащих ферросплавов из отвалных металлургических шлаков и высокозольных углей: дис. ... PhD: 6D070900 – Металлургия. – Карагандинский технический университет, 125 с., Караганда, Казахстан.

13 Makhambetov, Ye. N., Gabdullin, S. T., Zulhan, Z., Zhakan, A. M., Myrzagaliyev, A. A. // Thermodynamic modeling of the smelting process of a new complex chromium-manganese-silicon-containing ferroalloy. - Павлодар: Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 3. – С. 211–221. – <https://doi.org/10.48081/ODXD9913>.

14 Makhambetov, Yerbolat & Gabdullin, S & Zhakan, A & Saulebek, Zh & Akhmetov, Amankeldy & Zulhan, Z & Mukanov, Samat. Production of complex Fe-Si-Mn-Cr ferroalloy using high-ash coal: a sustainable metallurgical approach. *Materials Research Express*. 11. – 2024. – <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad4f58>.

15 Kim, P. P., Larssen, T. A., & Tangstad, M. Reduction rates of MnO and SiO₂ in SiMn slags between 1500 and 1650 °C. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(5), P. 494–501. – 2019. – <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/153/2019>.

16 Makhambetov, Ye., Abdirashit, A., Myngzhassar, Ye., Baisanov, A., Zhakan, A. // Thermodynamic and experimental simulation of the smelting process of medium carbon ferromanganese with the use of zhezdinsky manganese ores. - Павлодар: Наука и техника Казахстана. – 2023. – №4. – С. 141–153. – <https://doi.org/10.48081/HHSN1365>.

Received 12.11.24.

Received in revised form 20.11.24.

Accepted for publication 25.11.24.

*А. М. Жақан¹, А. К. Жунусов², А. С. Ахметов³, С. К. Кабылканов⁴, О. Yuce⁵

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

^{1,3,4}Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.,

⁵Стамбул техникалық университеті, Стамбул, Түркия қ.

12.11.24 ж. баспаға түсті.

20.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

25.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ХРОМ-МАРГАНЕЦ-КРЕМНИЙ ҚҰРАМДАС ФЕРРОҚОРЫТПАНЫ БАЛҚЫТУ ҮРДСІН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада Қазақстанның техногендік шикізатынан хром-марганец-кремний құрамдас ферроқорытпаны балқыту үрдісін термодинамикалық модельдеу нәтижелері берілген. Хром-марганец-кремний құрамдас ферроқорытпаны термодинамикалық модельдеу Гиббс энергиясын минимизациялау және термодинамикалық вариациялық принциптерге негізделген HSC Chemistry 6 бағдарламалық кешенін (Outokumpu, Финляндия) қолдану арқылы жүзеге асырылды. Күрделі қорытпаны балқыту үрдісін модельдеу үшін термодинамикалық талдау шикіқұрамның төрт нақты құрамы үшін 500-ден 2000 °C дейінгі температура аралығында жүргізілді (қатты көміртегінің 5% жетіспеушілігімен, режимнің қалыпты ағымымен және қатты көміртегінің 5% және 10% стехиометриялық артықшылығымен). Fe-Cr-Mn-Si-Al-Sa-Mg-C-O жүйесі арқылы кремний, марганец, хром және темірдің бірлескен карботермиялық тотықсыздану механизмі зерттелді. Жүргізілген есептеулер хром-марганец-кремний құрамдас ферроқорытпаны карботермиялық әдіспен балқыту кезінде болатын барлық физикалық-химиялық үрдістерді толық зерттеуге мүмкіндік береді. Термодинамикалық мәліметтер негізінде 100 кг шикіқұрамға (хром және марганец шаңы) қатты көміртектің оңтайлы шығыны 10,75 кг деп анықталды. 1800 °C температурада ферроқорытпаның химиялық құрамы, %: Cr - 35,84; Mn - 24,47; Si - 16,25 және Fe - 22,63.

Кілтті сөздер: күрделі ферроқорытпа, карботермиялық үрдіс, хром-марганец-кремний құрамдас ферроқорытпа, термодинамика, тотықсыздандыру.

*А. М. Жақан¹, А. К. Жунусов², А. С. Ахметов³, С. К. Кабылканов⁴, О. Yucef⁵

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

^{1,3,4}Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,

Республика Казахстан, г. Караганда

⁵Стамбульский технический университет, Стамбул, г. Турция

Поступило в редакцию 12.11.24.

Поступило с исправлениями 20.11.24.

Принято в печать 25.11.2024.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ КОМПЛЕКСНОГО ХРОМ-МАРГАНЕЦ- КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩЕГО ФЕРРОСПЛАВА

В данной статье приведены результаты термодинамического моделирования процесса выплавки хром-марганец-кремнийсодержащего ферросплава из техногенного сырья Казахстана. Термодинамическое моделирование хром-марганец-кремнийсодержащего ферросплава было проведено с использованием программного комплекса HSC Chemistry 6 (Outokumpu, Финляндия), основанного на принципах минимизации энергии Гиббса и термодинамических вариационных принципах. Термодинамический анализ для моделирования процесса выплавки комплексного сплава осуществлялся в

температурном интервале от 500 до 2000 °С для четырех реальных составов шихты (с недостатком 5 % твердого углерода, с нормальным ходом режима и с избытком твердого углерода 5% и 10 % от стехиометрии). Механизм совместного карботермического восстановления кремния, марганца, хрома и железа изучали по системе Fe-Cr-Mn-Si-Al-Ca-Mg-C-O. Проведенные расчеты позволяют полноценно изучить все физико-химические процессы, происходящие при выплавке хром-марганец-кремнийсодержащего ферросплава карботермическим методом. На основе термодинамических данных был определен оптимальный расход твердого углерода на 100 кг шихты (хромовой и марганцевой пыли), составивший 10,75 кг. Химический состав ферросплава при 1800 °С составляет, %: Cr – 35,84; Mn – 24,47; Si – 16,25 и Fe – 22,63.

Ключевые слова: комплексный ферросплав, карботермический процесс, хром-марганец-кремнийсодержащий ферросплав, термодинамика, восстановление.

***A. Zhakupov**

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2988-7015>

*e-mail: zhakupov.a@tou.edu.kz

APPLICATION FEATURES OF STEEL PRODUCTS NON-DESTRUCTIVE TESTING

This article presents the research results of the changes dependence in the magnetic properties of 25CrMoV steel on the degree of products stress-strain state. This phenomenon of influence allows non-destructive detection of the steel products loading degree by determining magnetic characteristics such as coercive force and residual magnetic induction. These parameters are the main indicators of intensity and magnetization for the hysteresis loop of steels. Changes in magnetic characteristics during plastic deformation are due to the formation of the martensite phase. The effect of deformation causes the formation of the martensite phase due to the decomposition of austenite, which leads to significant changes in the physical properties of the material. Control of the stress-strain state of steel based on measuring the coercive force and residual magnetic induction in the controlled steel has a high potential for development and application. The data obtained prove that the coercive force and residual magnetic induction are a reliable informative parameter for magnetic non-destructive testing.

Keywords: non-destructive testing, coercive force, residual magnetic induction, intensity, 25CrMoV.

Introduction

Currently, various physical methods and means of non-destructive quality control of metals, metal products and structures are widely used, allowing to check the quality of products without violating their suitability for use as intended [1-2].

At the same time, all defects, as is known, cause a change in the physical characteristics of metals and alloys, namely, density, electrical conductivity, magnetic permeability, elastic properties, etc.

And accordingly, the main tasks of magnetic non-destructive quality control are defined by three main directions:

- continuity control – flaw detection;
- assessment of physical and mechanical properties – structuroscopy;
- measurement of sizes – thickness measurement.

This research is devoted to structuroscopy, which consists in using the dependence of steel magnetic properties on the stress state.

Issues related to magnetic structuroscopy were studied in Japan, Germany and the USA. Of the numerous physical control methods used to control mechanical characteristics, the optimal one – magnetic, has become widespread, and of the magnetic

methods, those based on measuring magnetic induction and coercive force have proven preferable. These two magnetic characteristics have the best correlation with the mechanical properties of steel [3–6].

Magnetic research methods are used both to determine the value of the magnetic properties of metals and alloys, the coercive force H_c and residual magnetic induction B_0 , and to study the transformations occurring in metals and alloys in the solid state. In this case, useful information can be obtained, depending on the method, both from the full cross-section of the product and from its surface. If you take a magnetic hysteresis loop from different grades of steel, you can see that the magnetic characteristics of different grades allow you to distinguish them both by magnetic induction and by coercive force [7–8].

In this paper, the effect of mechanical stresses on the magnetic properties of pipes is investigated. Regardless of main pipes laying type, their metal is exposed to significant mechanical loads during operation. In some cases, these factors lead to emergency destruction of pipelines. Under the influence of a stressed state, the metal changes its functional properties, in particular, strength, viscoplastic properties, as well as crack resistance. In addition, the stressed state is the dominant factor in the development of stress corrosion cracking, which is the cause of more than half of all failures of large-diameter main pipelines [9].

Investigation of pipeline accidents causes shows that in some cases the effect of loads leads to the formation of cracks and destruction of metal without traces of corrosion. Thus, the integrity of oil and gas pipelines largely depends on the timely detection of places with increased stresses and subsequent repair measures [10].

In practice, the problem of assessing the stress-strain state is solved by calculation methods, but their reliability is low because usually the initial position of the pipeline is unknown, and existing physical methods for determining stress are not fully adapted to assess the stress state of pipelines. Therefore, the development of a methodology for assessing stress in oil and gas pipelines based on physical methods of non-destructive testing, allowing for the localization of stressed areas and prompt implementation of measures for their reconstruction, is a very urgent scientific and practical task [11].

Materials and methods

Samples of pipe products made of 25CrMoV steel were used as the object of the research. The chemical composition of the steel is given in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of steel 25CrV

Steel	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V
25CrV	0.25	0.28	0.45	0.19	0.017	0.019	1.68	0.27	0.18

During the experiments, the samples were stretched on a tensile testing machine to create a stress-strain state. Magnetic properties were measured using a KIM-2M coercimeter, which determined the coercive force and residual magnetic induction at a strain of 0 (initial state), 50, 100 and 150 MPa.

Results and discussion

Figure 1 shows the dependences of magnetic properties on the applied strain at values of 0, 50, 100 and 150 MPa.

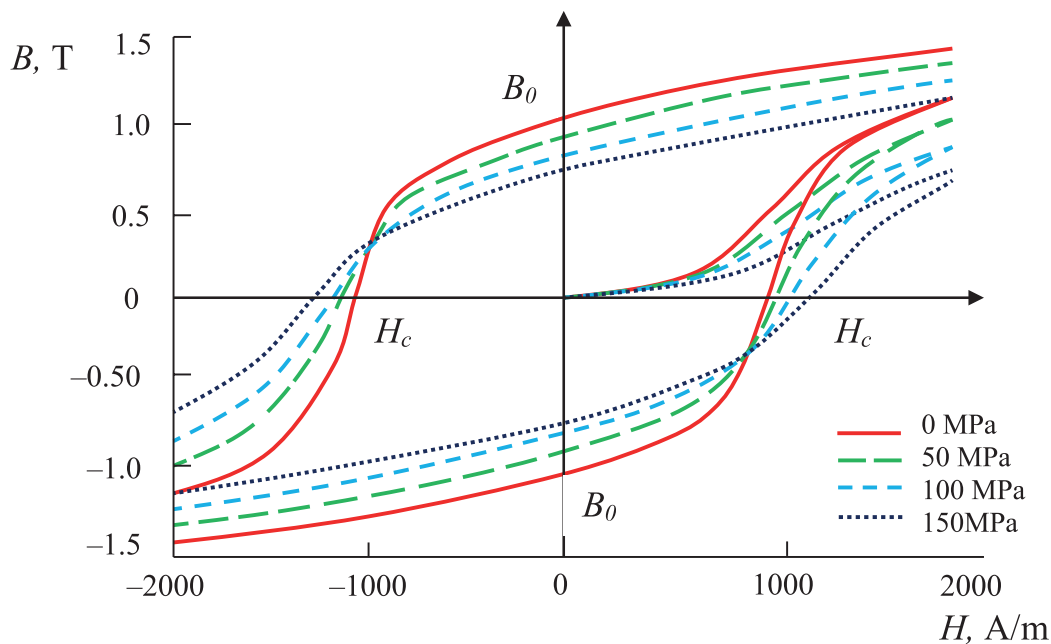


Figure 1 – Hysteresis loop of a 25CrMoV steel sample at stresses of 0, 50, 100 and 200 MPa

As can be seen from the results (Table 2), the values of coercive force and residual magnetic induction have differences, which makes it possible to non-destructively assess the loading degree of constructions or products made of ferromagnetic material. Accumulation of microdamages, changes in crystallographic texture, the release of additional phases during plastic deformation and other factors affect the elastic characteristics of the material.

Table 2 – Magnetic properties values of steel 25CrMoV

Magnetic parameter	Strain degree, MPa			
	0 (no load)	50	100	150
Coercive force, A/m	880	984	1020	1108
Residual magnetic induction, T	1,02	0,95	0,86	0,68

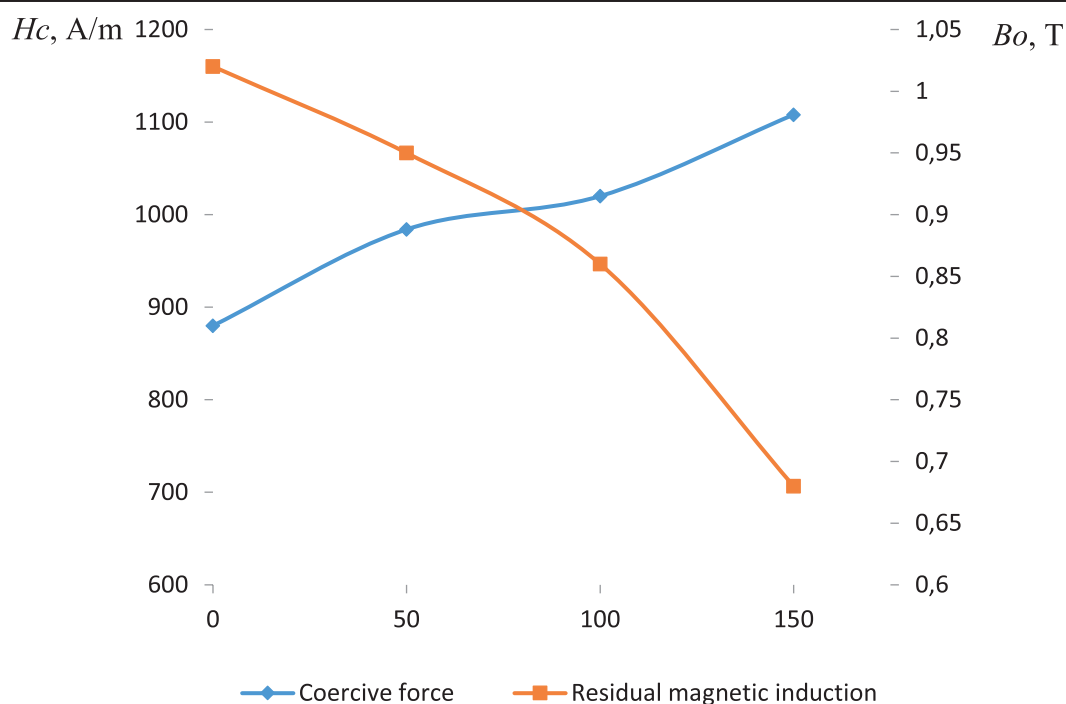


Figure 2 – Dependence of magnetic properties on stress

The data in Figure 2 show that the change in coercive force and residual magnetic induction has a monotonous ascending and descending graph, which indicates a strong correlation between magnetic properties and stress. With increasing stress, the coercive force increases, while the residual magnetic induction, on the contrary, decreases. A further increase in the load will allow the sample to be destroyed, and thus determine the critical value of the magnetic characteristics for determining the limiting value of the load.

The change in magnetic characteristics during plastic deformation is caused by the formation of the martensite phase. The effect of deformation causes the formation of the martensite phase due to the decomposition of austenite, which leads to significant changes in the physical properties of the material. The martensitic transformation caused by plastic deformation is affected by such factors as the stress state and the deformation rate.

Thus, the change in magnetic characteristics due to strain is affected by the martensite phase, which is a ferromagnet in contrast to the initial paramagnetic phase of austenite.

In addition, the change in magnetic properties is associated with the magnetoelastic effect that steels have. Due to the magnetoelastic effect, the elongation of the material leads to a decrease in magnetization and an increase in intensity. The essence of the magnetoelastic effect is that under the action of mechanical stresses, the energies of the domains change, as a result of which the domain structure of the material changes.

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan within the framework of grant funding of young scientists for scientific and (or) scientific and technical projects for 2022-2024 under the IRN AP13268736 – «Non-destructive method for determining the mechanical properties of steel products».

Conclusions

In the course of the work, a pattern of deformation behavior of products magnetic characteristics was revealed using the example of structural steel 25CrMoV in relation to the selection of informative parameters for assessing the stress-strain state of metal structure elements by non-destructive methods.

Thus, monitoring the stress-strain state of steel based on measuring the coercive force and residual magnetic induction in the tested steel has high potential for development and application. The data obtained prove that the coercive force and residual magnetic induction are an excellent informative parameter for magnetic non-destructive testing due to the stability of its readings. The results obtained can be used to create a non-destructive testing device for assessing the stress-strain state of steel constructions and products.

REFERENCES

- 1 **Zhakupova, A., Bogomolov, A., Zhakupov, A.** «Macrostructure of a hollow billet from steel 25CrV under different temperature conditions of casting» Science and Technology of Kazakhstan, № 3, P. 197–202. – 2023.
- 2 **Schapova, E. A., Stashkov, A. N., Afanasyev, S. V., Nichipuruk, A. P.** Magnetic properties and the structure of eutectoid steel with different pearlite morphology // The Physics of Metals and Metallography. – 8. – 2021. – P. 796–802.
- 3 **Stashkov, A., Nichipuruk, A., Kuleev, V., Schapova, E.** Magnetic nondestructive testing of residual stresses in low-carbon steels // Journal of Physics: Conference Series. – 1389. – 2019. – P. 012032.
- 4 **Ryu, K. S., Nahm, S. H., Park, J. S.** A new non-destructive method for estimating the remanent life of a turbine rotor steel by reversible magnetic permeability // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 251. – 2002. – P. 196–201.
- 5 **Lee, E. W.** Magnetostriction. Reports of progress in physics // The physical society. University of Southampton. – 18. – 1955. – P. 184–229.
- 6 **Buttle, D. J., Moorthy, V., Shaw, B.** Determination of residual stresses by magnetic methods // Measurement Good Practice Guide. – 88. – P. 56.
- 7 **Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G.** Review methods of measuring residual stresses in components // Material and Design. – 35. – 2012. – P. 572 – 588.
- 8 **Perevertov, O.** Detection of spring steel surface decarburization by magnetic hysteresis measurements // NDT&E International – 2011. – V. 44. – P. 490–494.

9 **Kikuchi, H.** Feasibility study for nondestructive evaluation of magnetic properties and hardness of two-layered specimens by magnetic single-yoke probe // NDT&E International – 2012. – V. 46. – P. 1–6.

10 **Langman, R.** Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // IEEE transactions on magnetics – 1990. – V. 26. – № 4. – P. 1246–1251.

11 **Zhakupov, A., Zhakupova, A., Bogomolov, A.** Dependence of electromagnetic parameters of products from steel 09g2s on their mechanical properties // Bulletin of Toraighyrov University – Energetics. series – № 3. – 2022. – P. 304–312.

Received 08.10.24.

Received in revised form 14.10.24.

Accepted for publication 07.11.24.

А. Н. Жакупов

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
08.10.24 ж. баспаға түсті.

14.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

07.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

БОЛАТ БҰЙЫМДАРЫН БҰЗБАЙТЫН БАҚЫЛАУДЫ ҚОЛДАНУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Бұл мақалада 25ХМФА болаттың магниттік қасиеттерінің өзгеруінің өнімнің кернеулі деформацияланған күйінің дәрежесіне тәуелділігін зерттеу нәтижелері келтірілген. Бұл әсер ету құбылысы болат бұйымдарының жүктелу дәрежесін бұзбай анықтауға мүмкіндік береді, мысалы, магниттік сипаттамаларды анықтау арқылы. Бұл параметрлер болат бұйымдарға арналған гистерезис ілмегінің кернеуі мен магниттелуінің негізгі көрсеткіштері болып табылады. Пластикалық деформациядағы магниттік сипаттамалардың өзгеруі мартенсит фазасының пайда болуына байланысты. Деформацияның әсері аустениттің ыдырауына байланысты мартенсит фазасының пайда болуына әкеледі, бұл материалдың физикалық қасиеттерінің айтарлықтай өзгеруіне әкеледі. Бақыланатын болаттағы коэрцитивті күш пен қалдық магниттік индукцияны өлшеу негізінде болаттың кернеулі деформацияланған күйін бақылау даму және қолдану үшін жоғары әлеуетке ие. Нәтижелер коэрцитивті күш пен қалдық магниттік индукция магниттік бұзбайтын бақылауды жүзеге асырудың сенімді ақпараттық параметрі екенін дәлелдейді.

Кілтті сөздер: бұзбайтын бақылау, коэрцитивті күш, қалдық магниттік индукция, кернеулік, 25ХМФА.

А. Н. Жакупов

Торайгыров университет, Республика Казахстан, г.Павлодар

Поступило в редакцию 08.10.24.

Поступило с исправлениями 14.10.24.

Принято в печать 07.11.2024.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В данной статье представлены результаты исследования зависимости изменения магнитных свойств стали 25ХМФА от степени напряженно-деформированного состояния изделий. Данное явление влияния позволяет неразрушающим способом выявить степень нагружения стальных изделий посредством определения магнитных характеристик, таких как коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция. Данные параметры являются основными показателями напряженности и намагниченности петли гистерезиса для стальных изделий. Изменение магнитных характеристик при пластическом деформировании обусловлено образованием фазы мартенсита. Воздействие деформации вызывает образование фазы мартенсита вследствие распада аустенита, что приводит к существенным изменениям физических свойств материала. Контроль напряженно-деформированного состояния стали на основании измерения коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции в контролируемой стали имеет высокий потенциал для развития и применения. Полученные данные доказывают, что коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция являются достоверным информативным параметром для проведения магнитного неразрушающего контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, коэрцитивная сила, остаточная магнитная индукция, напряженность, 25ХМФА.

A. Zhakupova

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7392-1172>

*e-mail.ru: zhakupova.a@tou.edu.kz

DEVICE FOR CASTING HOLLOW BILLETS

This paper presents the results of casting process modeling with the assessment of the obtained macrostructure and geometry of the hollow and solid billets. The objective of the work is to develop recommendations for improving the existing technology of continuous casting of tubular billets and the design for its implementation, used at the pipe rolling plant of KSP Steel LLC. The main solution is to implement double-sided cooling of the hollow billet in the secondary cooling zone on the continuous casting machine. The optimal ratio of coolant consumption on the inner and outer surfaces of the billet is substantiated. The result of the proposed solutions is an improvement in the quality of the macrostructure and geometry of the billet. When analyzing the macrostructure of the billet, a decrease in defects by more than two times was revealed. The study of the cross section of the billet showed a decrease in the deviation of the minimum wall thickness from the maximum from 6.1 to 1.8 mm. The uniformity of mechanical properties according to hardness readings was increased from ± 10.5 to ± 3 HB.

Keywords: hollow billet, continuous casting, macrostructure, crystallizer, mandrel.

Introduction

The sole producer of seamless hot-rolled pipes for oil grades in Kazakhstan is the pipe rolling plant of «KSP Steel» LLP. The current manufacturing process encompasses a complete cycle, from casting continuously cast billets to rolling and finishing the pipes. However, with rising standards for pipe quality and the necessity to remain competitive in international markets, there is an ongoing need for improvements and the adoption of innovative solutions in pipe production technology.

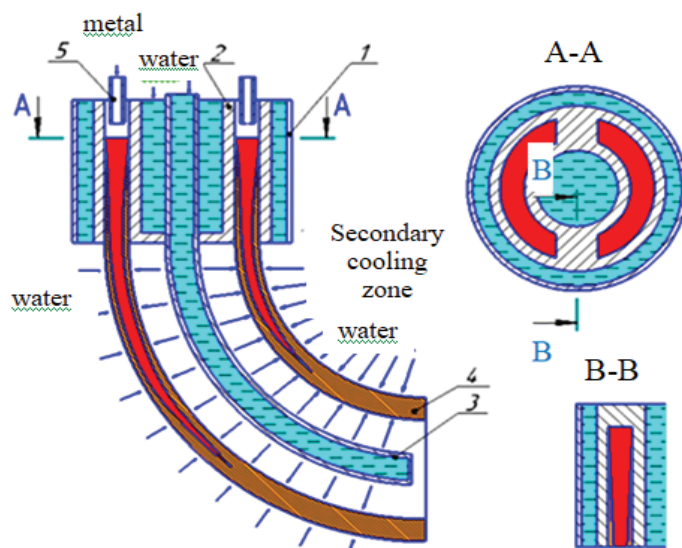
To produce hot-rolled pipes, «KSP Steel» LLP utilizes solid continuously cast billets from its own steelmaking operations. However, using solid billets presents certain drawbacks, including internal defects like axial porosity and segregation. Additionally, there can be inconsistencies in the structure and properties of the billet across its cross-section, stemming from the varying cooling rates of the internal and external layers of the metal [1–3].

One effective solution to this issue is the casting of a hollow billet [4], which prevents the formation of axial porosity and liquation by eliminating metal from the center. Additionally, employing dual-sided cooling for the billet after it exits the crystallizer enhances heat removal and promotes a more uniform structure during the cooling and solidification process. Furthermore, using a hollow cast billet as the starting material

eliminates the need for piercing, thereby reducing the likelihood of additional rolling defects such as mechanical scuffs and geometric inconsistencies in cross-sectional dimensions [5–7].

Materials and methods

The casting technological process incorporating the proposed solutions involves the introduction of a seed and the injection of liquid metal into the space between the inner surface of the crystallizer and the outer surface of the mandrel. This leads to the formation of a metal crust and subsequent cooling of the billet. In the crystallizer zone, cooling is achieved by introducing a coolant into the cavity of both the crystallizer and the mandrel. In the secondary cooling zone, cooling occurs externally via a sprayer system and internally through a rod positioned below the mandrel [8].



The suggested method for casting a pipe billet is implemented using the setup depicted in Figure 1.

1 – crystallizer; 2 – mandrel; 3 – rod; 4 – billet; 5 – melt feeder

Figure 1 – Continuous casting device for hollow billets

The setup includes a crystallizer 1 and an integrated mandrel 2 designed to shape the internal cavity of the cast billet. A hollow rod 3 runs through the mandrel to supply coolant at the necessary pressure for cooling the internal cavity via sprayers. Additionally, external cooling in the secondary cooling zone is also achieved through sprayers. The bending radius of the rod matches that of the crystallizing billet 4 when produced on radial continuous casting machines. Metal is supplied through metal pipelines 5.

The research in [9] demonstrates that the uniformity of cooling is influenced by the geometric parameters of the cooling product. Based on this principle, the coolant consumption should be proportional to the area of the surface being cooled. Consequently, the proposed cooling method aims to achieve uniform cooling of the hollow billet through dual-sided cooling, following the relationship outlined in [10]:

$$G_o = \frac{R}{r} \cdot G_i$$

where, – cooler consumption, respectively, on the external and internal surfaces of the billet, m³/h.

R, r – external and internal radius of the billet, m;

Results and discussion

To evaluate the formation of the billet's structure and geometry, continuous casting was simulated using the «LVM Flow» software. The analysis focused on macrostructure defects standardized by GOST R 58228-2018, which outlines methods for controlling and assessing the macrostructure of continuously cast steel billets. The modeling results for the proposed casting method, which incorporates internal cooling below the crystallizer, are compared to those using cooling solely in the crystallizer zone and presented in Table 1. Given that hollow billets eliminate issues like axial porosity and liquation, which allows for their use in place of solid billets for pipe production, the only defects identified were light stripes, edge point contamination, liquation stripes, and cracks.

Table 1 – Results of macrostructural research

Diameter of billet, mm	Steel grade	Macrostructure defect, score (average value)		
		Liquation stripes and cracks	Light stripes	Edge point pollution
210	16MnCr5	0,52/0,23	0,54/0,23	0,0/0,0
	AISI 4130	0,55/0,25	0,56/0,24	0,09/0,02
	Gr9B	0,63/0,31	0,68/0,35	0,09/0,02

As can be seen from the results of Table 1, the proposed method improves the homogeneity and forms a defect-free macrostructure of the billets.

According to computer models of billets (Figure 2) with one- and two-sided cooling, it is evident that the solidification front with two-sided cooling has a symmetrical character. In this regard, a more uniform structure is formed across the billet cross-section.

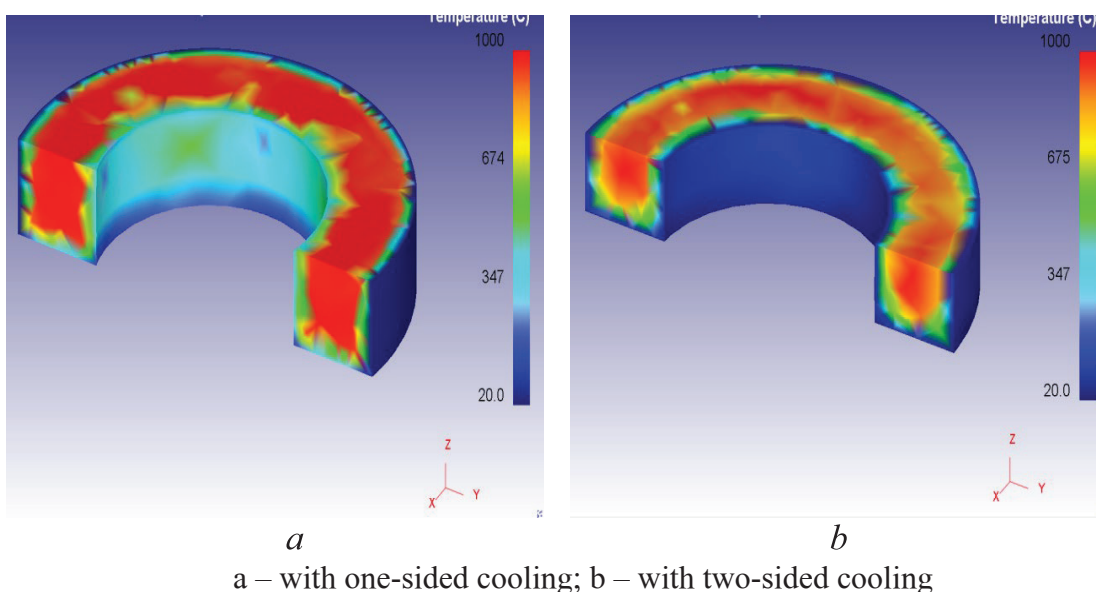


Figure 2 – Solidification front of a hollow billet

The average results from testing the proposed cooling method for hollow billets, simulated in «LVM Flow» are presented in Table 2. For the geometry analysis, a billet with a diameter of 210 mm was used. Numerically, for a hollow billet measuring 210 mm in diameter with an internal diameter of 144 mm, the coolant consumption on the outer surface was found to be 1.46 times higher than that on the inner surface.

The variation in wall thickness of the billet during continuous steel casting is primarily due to the periodic contact between the solidifying cast and the walls of the crystallizer. At the initial formation stage, the liquid metal is in direct contact with the water-cooled walls of the crystallizer, resulting in a maximum density of heat flow. The metal-static pressure forces cause the crust of the solidifying cast to be pressed against the working surface of the crystallizer, promoting uniform growth of the crust around its perimeter.

Table 2 – Results of testing the proposed method

Method	Steel grade	Wall thickness, mm		Hardness, HB (from outer surface to inner)
Conventional	AISI 4130	34,0		139; 137; 131; 145; 152
		38,6	32,5	
34,9		145; 143; 141; 145; 147		
35,1			34,5	
Proposed	34,6	36,4		

As the thickness of the solid crust increases, thermal and phase shrinkage of the casting occurs, creating a gap between the casting and the crystallizer. This gap increases thermal resistance and reduces the intensity of heat exchange. The intermittent contact of the solidifying cast with the crystallizer walls causes variations in heat exchange intensity at specific points across the billet's cross-section, leading to an uneven solidification front and distortion of the casting's geometry. The dynamics of the gap also influence the temperature and stress state of the crust of the solidifying billet.

Another factor contributing to the variation in thickness of the continuously cast billet crust is the dynamic impact of the melt stream cascading from the intermediate ladle onto the solidifying crust. As the flow rate of the melt stream increases and the temperature of the melt becomes more superheated, the unevenness of the solidification front also grows. Over time, the influence of convective flows on the solidification process diminishes due to the rising viscosity of the melt, leading to filtration processes becoming the primary mode of liquid movement in the interdendritic spaces.

Thus, the obtained results indicate the uniformity of cooling and the feasibility of using the proposed method.

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan within the framework of grant funding of young scientists for scientific and (or) scientific and technical projects for 2022-2024 under the IRN AP14972971 project "Research the structure formation and mechanical properties of oil assortments pipes produced from cast hollow billets".

Conclusions

The results of testing the proposed solutions for casting a hollow billet using two-sided cooling in the secondary cooling zone confirm the feasibility of their use due to the formation of a less defective macrostructure due to a more than twofold reduction in light stripes, edge point contamination, liquation stripes and cracks. In addition, by applying the dependence of the coolant flow rate on the internal and external surfaces relative to the cooled surface, the thickness difference of the cast hollow billet was reduced from 6.1 to 1.8 mm and uniformity of mechanical properties across the cross-section of the billet was achieved.

REFERENCES

- 1 **Bogomolov, A., Zhakupov, A., Kanayev, A., Sikach, I. and Tugumov, K.** «Comparative Structural Strength Research of Hardened Carbon Steel and Hot-Rolled Alloy Steel», IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 142. – № 1. – 2016. – Art. № 012076. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012076>.
- 2 **Furumai, K., Aramaki, N. and Oikawa, K.** «Influence of heat flux different between wide and narrow face in continuous casting mould on unevenness of hypoperitectic steel solidification at off-corner», Ironmaking & Steelmaking, Vol. 49. – P. 845–859. – 2022. – <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2063654>.

3 **Pickering, E.** «Macroseggregation in Steel Ingots: The Applicability of Modelling and Characterisation Techniques», ISIJ International, Vol. 53. – P. 935–949. – 2013. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.935>.

4 **Zisopol, D., Minescu, M., Badicioiu, M. and Caltaru, M.** «Theoretical and Experimental Investigations on 20 Inches Threaded Casing Connections Failure under Field Conditions», Eng. Technol. Appl. Sci. Res., Vol. 11. – № 4. – P. 7464–7468. – 2021. – <https://doi.org/10.48084/etasr.4311>.

5 **Harada, H., Anzai, E. and Takeuchi, E.** «Continuous casting of hollow billets», Canadian metallurgical quarterly, Vol. 39. – P. 307–318, 2000. – <https://doi.org/10.1179/000844300794256846>.

6 **Vertnik, R. and Šarler, B.** «Simulation of continuous casting of steel by a meshless technique», International Journal of Cast Metals Research, Vol. 22. – P. 311–313. – 2009. – <https://doi.org/10.1179/136404609X368064>.

7 **Zhang, L., Shen, H., Huang, T. and Liu, B.** «Analysis of heat transfer and thermal stress in continuous casting with mechanical reduction», International Journal of Cast Metals Research, Vol. 15. – № 4. – P. 355–359. – 2003. – <https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819510>.

8 **Sindhya, K. and Miettinen, K.** «New Perspective to Continuous Casting of Steel with a Hybrid Evolutionary Multiobjective Algorithm», Materials and Manufacturing Processes, Vol. 26. – P. 481–492. – 2011. – <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.523913>.

9 **Jiang, C., Tang, D., Zhang, C., Zhang, Y. and Zhao, A.** «Morphology and metallurgical factors of line defects on surface of cold rolled 304 austenitic stainless steel sheet», Materials Research Innovations, Vol. 18. – P. 281–284. – 2014. – <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000697>.

10 **Soda, H., McLean, A. and Motoyasu, G.** «Studies of the solid-liquid interface location during heated mould continuous casting of metals and alloys», International Journal of Cast Metals Research, Vol. 18. – P. 163–173. – 2018. – <https://doi.org/10.1179/136404605225022973>.

Received 06.10.24.

Received in revised form 23.10.24.

Accepted for publication 07.11.24.

А. Т. Жақупова

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

06.10.24 ж. баспаға түсті.

23.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

07.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚҰЫС ДАЙЫНДАМАЛАРДЫ ҚҰЮҒА АРНАЛҒАН ҚҰРЫЛҒЫ

Жұмыста құыс және тұтас дайындамалардың алынған макроқұрылымы мен геометриясын бағалай отырып, құю процесін модельдеу нәтижелері

келтірілген. Жұмыстың мақсаты – «KSP Steel» ЖШС құбыр илемдеу зауытында қолданылатын құбыр дайындамасын және оны жүзеге асыру үшін конструкцияны үздіксіз құюдың қолданыстағы технологиясын жетілдіру бойынша ұсынымдар әзірлеу. Негізгі шешім - дайындамаларды үздіксіз құю машинасында қайталама салқындату аймағында қуыс дайындаманы екі жақты салқындату. Дайындаманың ішкі және сыртқы бетіне салқындатқыш агынының оңтайлы қатынасы негізделген. Ұсынылған шешімдердің нәтижесі макроқұрылымның сапасын және дайындаманың геометриясын жақсарту болып табылады. Дайындаманың макроқұрылымын талдау кезінде ақаулардың екі еседен астам азаюы анықталды. Дайындаманың көлденең қимасын зерттеу қабырғаның минималды қалыңдығының максимумнан 6,1-ден 1,8 мм-ге дейін ауытқуының төмендеуін көрсетті. Қаттылық көрсеткіштері бойынша механикалық қасиеттердің біркелкілігі $\pm 10,5$ -тен ± 3 HB-ге дейін өсті.

Кілтті сөздер: қуыс дайындама, үздіксіз құю, макроқұрылым, кристаллизатор, дорн.

А. Т. Жакупова

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г.Павлодар

Поступило в редакцию 06.10.24.

Поступило с исправлениями 23.10.24.

Принято в печать 07.11.2024.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК

В работе представлены результаты моделирования процесса литья с оценкой полученной макроструктуры и геометрии полых и сплошных заготовок. Цель работы – разработка рекомендаций по совершенствованию существующей технологии непрерывной разливки трубной заготовки и конструкции для ее осуществления, применяемой на трубопрокатном заводе ТОО «KSP Steel». Основным решением является осуществление двустороннего охлаждения полой заготовки в зоне вторичного охлаждения на машине непрерывной разливки заготовок. Обосновано оптимальное соотношение расхода охладителя на внутреннюю и наружную поверхности заготовки. Результатом предлагаемых решений является улучшение качества макроструктуры и геометрии заготовки. При анализе макроструктуры заготовки выявлено уменьшение дефектов более чем в два раза. Исследование поперечного сечения заготовки показало снижение отклонения минимальной толщины стенки от максимальной с 6,1 до 1,8 мм. Равномерность механических свойств по показаниям твердости повышена с $\pm 10,5$ до ± 3 HB.

Ключевые слова: полая заготовка, непрерывная разливка, макроструктура, кристаллизатор, дорн.

И. К. Ибраев¹, О.Т. Ибраева², *Н. Б. Айткенов³, Д. К. Мусин⁴

Қарағандық индустриалдық университет,
Қазақстан Республикасы, Теміртау

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6414-6901>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8490-1994>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7495-6337>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

*e-mail: nurbek.aitkenov@mail.ru

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЛИТЬЕ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ В ДЕФЕКТЫ ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТА

Целью исследования являлось выявление механизмов формирования микро- и макроструктурных неоднородностей в корковой зоне слитков, а также их трансформации в поверхностные дефекты в процессе нагрева, пластической деформации и прокатки. В рамках исследования были разработаны и применены методики анализа макро- и микроструктурных, а также химических неоднородностей слитков и готового листового проката.

Был предложен сравнительный метод структурно-концентрационного анализа металла на всех этапах металлургического передела: от слитка до листового проката. Методика основана на использовании металлографических методов для изучения структуры и качественного анализа неметаллических включений.

Результаты исследования показали, что качество поверхности листового проката в значительной степени определяется физической неоднородностью корковой зоны слитка, в то время как на внутренние дефекты тонколистового проката существенно влияет загрязненность металла неметаллическими включениями. Был предложен новый механизм трансформации дефектов корковой зоны отливки в поверхностные и внутренние дефекты листового проката.

Данное исследование способствует более глубокому пониманию процессов образования и трансформации дефектов при обработке металлов, а также разработке стратегий повышения качества листового проката. Особое внимание в исследовании уделяется контролю физической неоднородности корковой зоны слитка и минимизации загрязнения неметаллическими включениями для получения высококачественного проката.

Ключевые слова: слиток, макро- и микронеоднородность, сляб, листовой прокат, дефект, структура.

Введение

В контексте конкурентоспособности тонколистового проката ключевое значение приобретает радикальное улучшение и стабилизация качества

выпускаемой продукции. Практическое решение этой задачи во многом зависит от качества стальной отливки. В процессе формирования слитка развиваются различные виды макронеоднородностей - физические, структурные и химические, что существенно ухудшает качество литого и прокатного металла. Особенно остро эта проблема проявляется при производстве тонколистового проката [1–7].

Материалы и методы металлографических исследований

Для исследования природы и источников поверхностных дефектов в листовом прокате разработан метод структурно-концентрационного анализа металлов, основанный на металлографическом анализе структуры и качественном анализе неметаллических включений. Для оценки химической неоднородности и уровня загрязнения неметаллическими включениями были отобраны характерные слитки, из которых были вырезаны осевые пластины параллельно широкой грани на высоте 120–150 мм над осевой плоскостью. В механическом цехе пластины были подвергнуты строганию до осевой плоскости, шлифовке и последующему получению серных отпечатков на фотобумагу после травления поверхности осевого темплета раствором серной кислоты.

Содержание углерода (C), марганца (Mn), кремния (Si), серы (S), фосфора (P), алюминия (Al) и азота (N) определялось химическим методом. Загрязнение металла включениями оценивалось электролитическим осаждением. Для изучения макроструктуры корковой зоны слитка были вырезаны угловые темплеты на пяти уровнях по высоте слитка, соответствующих 5, 25, 50, 75 и 95%. Вырезанные темплеты были обработаны, отполированы и протравлены в растворе серной кислоты для получения серных отпечатков [3.4]. Для выявления причин возникновения дефектов отбирались пробы для химического анализа и определения наличия неметаллических включений по границам дефектов. Из отобранных образцов изготавливались шлифы для изучения микроструктуры и определения загрязненности неметаллическими включениями. Химический состав неметаллических включений определялся на микроанализаторе Cameca. Было проанализировано около 20 образцов металла, отобранных на пяти уровнях по высоте слитка.

Результаты исследования

В ходе металлографического анализа микроструктуры образцов холоднокатаной стали в зонах поверхностных дефектов были выявлены три основных типа структур:

Грубые пленки (рис. 1, а), занимающие значительную площадь металла в приповерхностных слоях и содержащие специфические неметаллические включения в виде глобулей оксидов железа (вюстита) и точечных оксидных налётов (рис. 1, б).

Участки пузырьков, заполненных оксидами железа типа вюстита (рис. 1, с), которые при прокатке часто трансформируются в плёнки на поверхности листа (рис. 1, д).

Групповые скопления оксидных неметаллических включений сложного состава (рис. 2, а, б).

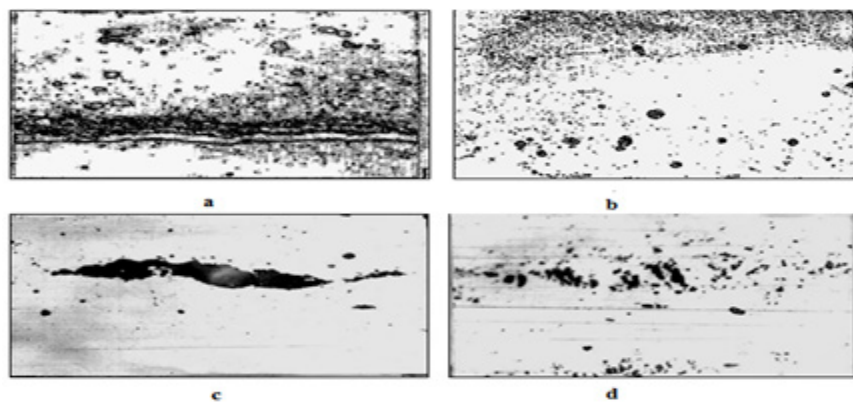


Рисунок 1 – Микроструктура холоднокатаной стали 08 КП по месту проявления дефекта: а, б - включения оксидов железа у дефекта плена, (x400); с - раскатанный пузырь, шлиф по толщине листа (x 630); d - то же, шлиф по поверхности листа (x 500)

Точечный химический анализ данных включений показал, что они соответствуют оксидам системы $\text{SiO}_2\text{--MnO--FeO}$ и представляют собой хрупкоразрушенные силикаты марганца со следующим химическим составом: 12-18 % SiO_2 до 58 % MnO и до 10 % FeO (табл. 1).

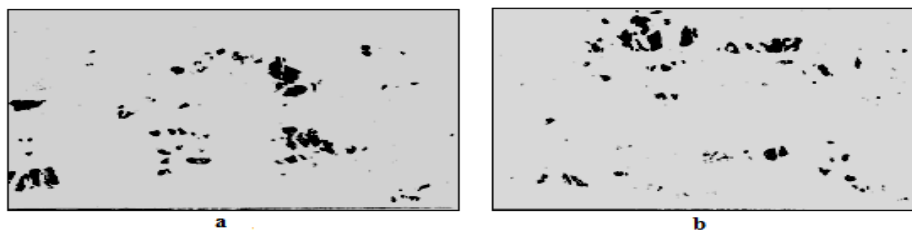


Рисунок 2 – Микроструктура стали 08 КП по месту проявления дефекта: а, б - неметаллические включения по поверхности листа (x 400);

Микронзондовый анализ участков неметаллических включений подтвердил наличие 91,61 % FeO и 2,50 % MnO . В результате исследования было установлено, что в холоднокатаных листах формируются следующие виды поверхностных дефектов: крупные плены, мелкие плены, раскатанные окисленные пузыри и крупные неметаллические включения. В подавляющем большинстве дефектов основной неметаллической фазой являются оксиды железа, содержание которых составляет 90 % и более.

Таблица 1 – Химический состав включений

Содержание оксидов, % по массе					
SiO_2	MnO	FeO	Al_2O_3	CaO	MgO
11,52	58,20	19,15	0,68	0,32	0,11

Сравнительный структурно-концентрационный анализ металла в области дефекта основного металла и корковой зоны слитка до и после высокотемпературного нагрева выявил морфологические признаки структурной неоднородности (рис. 3). Увеличение содержания FeO с 80-85% до 87-93% свидетельствует об окислении подкорковых пузырей и микропор при окислительном нагреве слитков в ячейках нагревательных колодцев.

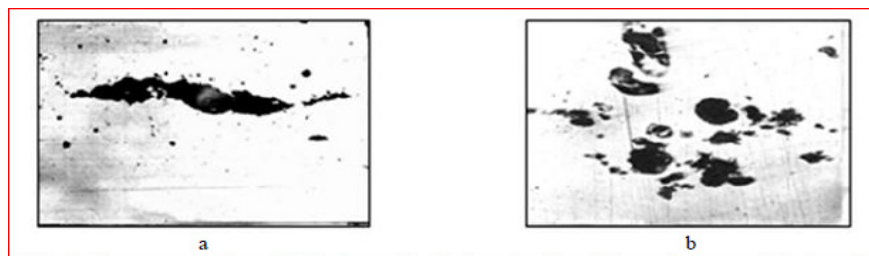
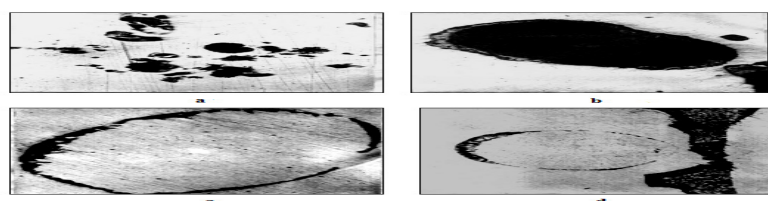


Рисунок 3 - Микроструктура газового пузыря в холоднокатаном изделии (а) и кортикальной зоны слитка (b)

Макро- и микроструктурный анализ строения поверхностных зон слитков показал, что зона плотной корки характеризуется повышенным содержанием газовых пузырей, которые часто окислены по внутренним стенкам или имеют оксидную оболочку, состоящую из 85% FeO и до 7% MnO (рис. 4).



а – х 50; б - х 100;

Рисунок 4 – Микроструктура угловых темплетов слитка кипящей стали:
а, б - газовые пузыри в корковой зоне слитка;

Обсуждение результатов исследования

Проведённое сравнительное исследование дефектов холоднокатаной стали выявило, что дефекты, возникающие в процессе выплавки стали, составляют от 62 до 84% всех поверхностных дефектов (см. таблицу 2). Значительная доля плен из оксидных неметаллических включений (33–38%) и окисленных пузырей, заполненных оксидной фазой FeO-MnO, указывает на их образование на фронте кристаллизации в двухфазной зоне, обогащённой марганцем, кислородом, углеродом, серой и фосфором [4, 7].

Таблица 2 – Сравнительный анализ классификации дефектов холоднокатаного листового проката

Классификация дефектов	№ 380520 08КП		№ 180521 08 КП		№0180654 08 ПС		Средние значения	
раскатанный пузырь, %	48,3	56,5	45,8	87,5	66,0	62,0	56,6	65,2
плена от неметаллических включений, %	37,9	21,7	45,8	12,5	22,6	8,0	32,1	12,3
слиточная плена, %	10,3	13,0	-	-	1,9	28,0	3,8	19,1
Прочие, %	3,4	8,7	8,3	-	9,4	2,0	7,5	3,4

В процессе кристаллизации слитков происходит образование жидкой оксидной фазы, состоящей из FeO и MnO, которая обволакивает пузырёк CO и перемещается в головную часть слитка. Это подтверждается появлением шлаковой пены на поверхности металла. Движение пузырей вызывает специфическую циркуляцию расплава у фронта кристаллизации, что создаёт разрежение и способствует затягиванию ликватов и продуктов их окисления. В результате формируются каналцы, заполненные оксидной шлаковой фазой (преимущественно FeO и MnO) или металлом с оксидной оторочкой по внутренней поверхности несплошности.

Наличие пор, заполненных оксидами, объясняется меньшим значением межфазного натяжения на границе оксидная фаза – металл по сравнению с границей газ – металл. Это облегчает возникновение оксидных зародышей в жидком металле по сравнению с газовыми.

Предложен механизм трансформации микродефектов слитка в дефекты сплошности листового проката. При нагревании слитков в ячейках нагревательных колодцев происходит дальнейшее окисление скрытых плёнок, подкорковых пузырей и микропористости, что приводит к увеличению содержания FeO с 34-85% до 91-94%. Кроме того, наблюдается диффузионное зарождение оксидных включений в виде оксидной сыпи и увеличение площади дефектного металла.

Источниками кислорода для диффузионного окисления макро- и микронесплошностей, а также зарождения новых сателлитных оксидных фаз в корковой зоне слитка являются окислительная атмосфера печи, оксидная фаза в виде скрытой плёнки, оксидные неметаллические включения и окалина на поверхности нагреваемого слитка. Точечный количественный анализ показал, что содержание общего кислорода в скрытой плёнке составляет 23-31%, что может служить дополнительным окислителем при внутридиффузионном окислении металла.

На рисунке 5 представлено распределение неметаллических фаз после высокотемпературного нагрева стали марки 08 КП. На изображении (а) показан общий вид участка скрытой оксидной плёнки после двухчасового нагрева. На изображении (b) представлено распределение вторичных (диффузионных) оксидов.

Крупные дефекты, расположенные близко к поверхности слитка, на первом этапе прокатки раскатываются на поверхность сляба, что приводит к образованию дефектов в виде сотовой рвани и плены (рис. 6 а, б).

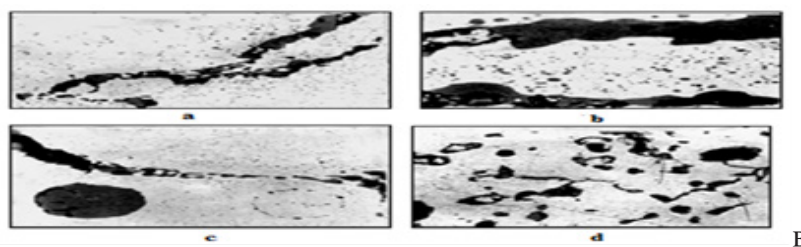


Рисунок 5 – Характер распределения неметаллических фаз после высокотемпературного нагрева стали марки 08 КП:
 а – общий вид участка скрытой оксидной пленки, время нагрева 2 часа; б – то же, характер распределения вторичных (диффузионных) оксидов;

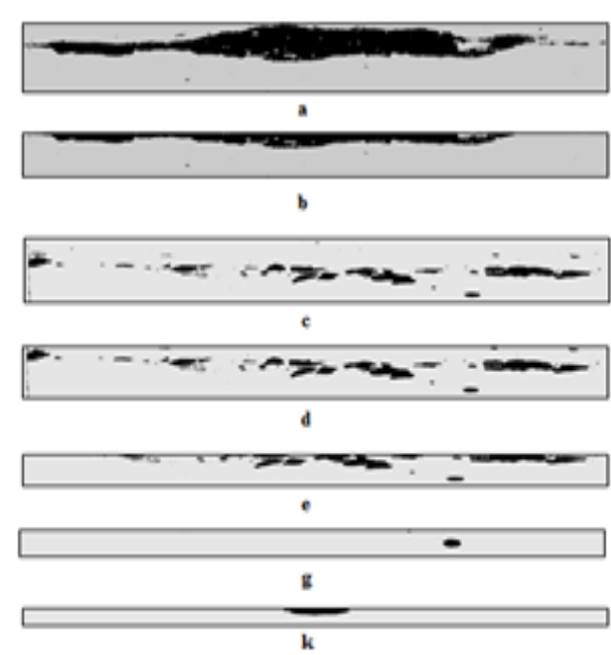


Рисунок 6 – Механизм трансформации дефектов слитка в поверхностные дефекты листового проката: а, б – образование пленки и рвани на I переделе; с, d, е – образование пленки и раскатанного пузыря на горячекатаном подкате; г, к - образование раскатанного пузыря и пленки на листовом прокате

В рамках исследования природы дефектов в листовом прокате были проведены детальные эксперименты, результаты которых позволили выявить ключевые морфологические характеристики структурной неоднородности в слитках и их значительное воздействие на образование дефектов в процессе прокатки.

Была обнаружена идентичность морфологических признаков структурной неоднородности в корковой зоне слитка и в области расположения дефекта в прокатанном листе. Различия заключаются в форме и распределении включений, а также в концентрации FeO в вюстите.

Увеличение концентрации FeO в вюстите с 80-85% в корковой зоне слитка до 87-93% в области дефекта указывает на существенную роль окислительного нагрева и последующей горячей деформации в формировании дефектов.

Установлено, что поверхностные дефекты холоднокатаных листов на 90% состоят из неметаллической оксидной фазы, включая железо и марганец. Высокая доля дефектов в виде пленки из оксидных неметаллических включений (33-38%) и раскатанного пузыря, заполненного оксидной фазой FeO-MnO, свидетельствует о их зарождении на фронте кристаллизации в двухфазной зоне, обогащенной марганцем, кислородом, углеродом, серой и фосфором.

Структурная неоднородность в виде «скрытой» пленки в нижней части слитка связана с вскипанием первых порций стали и ее кристаллизацией на поверхности изложницы.

Крупные дефекты в слитке, расположенные близко к поверхности, на начальном этапе прокатки выкатываются на поверхность сляба в виде сотовой рвани и пленки. По мере утонения слоя здорового металла над дефектом, на последующих этапах прокатки, дефекты типа раскатанного пузыря и пленки выходят на поверхность листов.

Эти результаты не только уточняют источники и причины образования основных видов дефектов в листовом прокате, но и раскрывают природу неметаллических включений, загрязняющих поверхностные зоны слитка.

Выводы

В ходе структурно-концентрационного анализа металла, проходящего через технологический процесс от слитка до стального проката, была выявлена идентичность морфологических признаков структурной неоднородности в корковой зоне слитка и в зоне дефекта холоднокатаной стали. Наблюдаются различия в форме, распределении включений и концентрации FeO в вюстите.

Определены причины микроструктурной неоднородности и повышенной загрязненности корковой зоны слитка. Поверхностные дефекты полосы на 90% состоят из неметаллической оксидной фазы, включающей оксиды железа и марганца.

В процессе нагрева происходит окисление внутренних полостей микродефектов, что приводит к образованию дополнительных оксидных включений в виде дисперсной оксидной сыпи.

На основании полученных данных разработаны методы управления структурной и химической неоднородностью на всех этапах сквозного металлургического процесса от слитка до тонколистового проката.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Naumenko, E. A., Rozhkova, O. V., Kovaleva, I. A.** Comprehensive study of characteristic signs of defects detected during magnetic powder control at the final stage of production of seamless hot-rolled pipes. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*, 2023. – 1, P. 69 – 72. [in Russian].

2 **Guo, J. L., Wen, G. H., Fu, J. J., Tan, P. and Gu, S. P.** Evaluation of carbon equivalent calculation of continuous casting steel based on surface roughness. *Iron and Steel*. 2019. – Vol. 54. – № 08. – P. 187. – <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x>.

3 **Sowa, L., Skrzypczak, T., Kwiatóń, P.** Numerical Evaluation of the Impact of Riser Geometry on The Shrinkage Defects Formation in the Solidifying Casting. *Arch. Metall. Mater.*, 2022. – Vol. 67. – Is. 1, P. 181–187.

4 **Ansari, M. O., Chattopadhyaya, S., Ghose, J. Sharma, S., Kozak, D., Li, C., Wojciechowski, S., Dwivedi, S. P., Kilinc, H. C., Królczyk, J. B.** Productivity Enhancement by Prediction of Liquid Steel Breakout during Continuous Casting Process in Manufacturing of Steel Slabs in Steel Plant Using Artificial Neural Network with Backpropagation Algorithms. *Materials*, 2022. – 15(2), P. 670.

5 **Chien-Cheng Feng, Ming-Hong Lin, Yi-Cheng Chen, Shih-Fu Ou and Ching-Chien Huang.** Optimization of Continuous Casting for Preventing Surface Peeling Defects on Titanium-Containing Ferrite Stainless Steel. *Materials* 2023, 16(4), 1461.

6 **Zhao, F., Hu, H., Liu, X., Zhang, Z., Xie, J.** Effect of billet microstructure and deformation on austenite grain growth in forging heating of a medium-carbon microalloyed steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. – Vol. 869, P. 15.

7 **Yang Wen', Cao Jing', Wang Xin-hua.** Investigation on Non-Metallic Inclusions in LCAK Steel Produced by BOF-LF-FTSC Production Route. *Journal of iron and steel research international*, 2011. – Vol.1 8, № 9, P. 06 – 12.

8 **Ali N., Zhang L., Zhou H., Zhao A., Zhang C., Fu K., Cheng J.** Effect of soft reduction technique on microstructure evaluation and toughness of medium carbon steel. *Mater. Today Commun*, 2021. – P. 102130.

9 **Han Z. J., Liu L., Lind M., Holappa L. E.** Mechanism and kinetics of transformation of aluminum inclusions in steel by calcium treatment. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2006. – Vol.19, Is. 1, P. 1 – 8.

10 **Zhang F., Yang S., Li J., Liu W., Wang T., Yang J.** Formation mechanism and control of transverse corner cracks in fine blanking steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. – Vol. 18, P. 1137–1146.

REFERENCES

1 **Naumenko, E. A., Rozhkova, O. V., Kovaleva, I. A.** Comprehensive study of characteristic signs of defects detected during magnetic powder control at the final stage of production of seamless hot-rolled pipes. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*, 2023, 1, P. 69 – 72. [in Russian]

2 **Guo J. L., Wen G. H., Fu J. J., Tan P. and Gu S. P.** Evaluation of carbon equivalent calculation of continuous casting steel based on surface roughness. *Iron and Steel*. 2019. – Vol. 54. – № 08. – P. 187. – <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x>.

3 **Sowa L., Skrzypczak T., Kwiatóń P.** Numerical Evaluation of the Impact of Riser Geometry on The Shrinkage Defects Formation in the Solidifying Casting. *Arch. Metall. Mater.*, 2022. – Vol. 67. – Is. 1, P. 181–187.

4 **Ansari M. O., Chattopadhyaya S., Ghose J. Sharma S., Kozak D., Li C., Wojciechowski S., Dwivedi S. P., Kilinc H. C., Królczyk J. B.** Productivity Enhancement by Prediction of Liquid Steel Breakout during Continuous Casting Process in Manufacturing of Steel Slabs in Steel Plant Using Artificial Neural Network with Backpropagation Algorithms. *Materials*, 2022. – 15(2), P. 670.

5 **Chien-Cheng Feng, Ming-Hong Lin, Yi-Cheng Chen, Shih-Fu Ou and Ching-Chien Huang.** Optimization of Continuous Casting for Preventing Surface Peeling Defects on Titanium-Containing Ferrite Stainless Steel. *Materials* 2023. – 16(4), 1461.

6 **Zhao F., Hu H., Liu X., Zhang Z., Xie J.** Effect of billet microstructure and deformation on austenite grain growth in forging heating of a medium-carbon microalloyed steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. – Vol.869, P. 15.

7 **Yang Wen', Cao Jing', Wang Xin-hua.** Investigation on Non-Metallic Inclusions in LCAK Steel Produced by BOF-LF-FTSC Production Route. *Journal of iron and steel research international*, 2011. – Vol.18, № 9, P. 06 – 12.

8 **Ali N., Zhang L., Zhou H., Zhao A., Zhang C., Fu K., Cheng J.** Effect of soft reduction technique on microstructure evaluation and toughness of medium carbon steel. *Mater. Today Commun.*, 2021. – P. 102130.

9 **Han Z. J., Liu L., Lind M., Holappa L. E.** Mechanism and kinetics of transformation of aluminum inclusions in steel by calcium treatment. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2006. – Vol. 19, Is. 1, P. 1–8.

10 **Zhang F., Yang S., Li J., Liu W., Wang T., Yang J.** Formation mechanism and control of transverse corner cracks in fine blanking steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. – Vol. 18, P. 1137–1146.

Поступило в редакцию 09.04.24.

Поступило с исправлениями 13.04.24.

Принято в печать 22.10.2024.

*И. К. Ибраев¹, О. Т. Ибраева², *Н. Б. Айткенов³, Д. К. Мусин⁴*

Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.
09.04.24 ж. баспаға түсті.

13.04.24 ж. түзетулерімен түсті.

22.10.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚҰЮ КЕЗІНДЕ ІШКІ ЖӘНЕ БЕТКІ АҚАУЛАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУ МЕХАНИЗМІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТАБАҚ БЕТІНДЕГІ АҚАУЛАРҒА АЙНАЛУЫ

Зерттеудің мақсаты құймалардың сыртқы аймағында микро және макроқұрылымдық әртектіліктің пайда болу механизмдерін, сонымен қатар олардың қыздыру, пластикалық деформация және илектеу процестерінде беткі ақауларға айналуын анықтау болып табылады. Зерттеу аясында құймалардың макро - және микроқұрылымдық және химиялық әртектілігін, сонымен қатар дайын табақты илектеуді зерттеудің әдістемесі жасақталды және қолданылды. Металлургиялық қайта өңдеудің барлық кезеңдеріндегі металды құрылымдық-концентрациялық талдаудың салыстырмалы әдісі ұсынылды: құймадан табақты илектеуге дейінгі. Әдістеме металл емес қосылыстардың құрылымын зерттеу және сапалы талдау жүргізу үшін металлографиялық әдістерді қолдануға негізделген.

Зерттеу нәтижелері табақты илекте бетінің сапасы негізінен құйманың сыртқы аймағының физикалық әртүрлігімен анықталатынын, ал жұқа табақты илектің ішкі ақаулары металдың металл емес қоспалармен ластануы көп әсер ететіндігін көрсетті.

Құйманың сыртқы аймақтың ақауларын табақты илектің беткі және ішкі ақауларына айналдырудың жаңа механизмі ұсынылды.

Бұл зерттеу металдарды өңдеу кезінде ақаулардың пайда болуы мен өзгеру процестерін тереңдетіп түсінуге және табақты илектің сапасын жоғарлату стратегияларын жасақтауға көмектеседі. Зерттеуде құйманың сыртқы аймағының физикалық әртүрлігін бақылауға және металл емес қоспалармен ластануды азайтуға ерекше назар аударылады.

Кілтті сөздер: құйма, макро - және микроәртектілік, сляб, табақты илек, ақау, құрылым.

*I. K. Ibraev¹, O. T. Ibraeva², *N. B. Aitkenov³, D. K. Musin⁴*

Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau

Received 09.04.24.

Received in revised form 13.04.24.

Accepted for publication 22.10.24.

MECHANISM OF FORMATION OF INTERNAL AND EXTERNAL SURFACE DEFECTS DURING CASTING AND THEIR TRANSFORMATION INTO SHEET SURFACE DEFECTS

The study aimed to elucidate the mechanisms of micro- and macrostructural inhomogeneities in ingot cortical zones and their transformation into surface defects during heating, plastic deformation, and rolling.

We developed and applied methods for analyzing macro- and microstructural as well as chemical inhomogeneities in ingots and finished rolled products.

A comparative method for structural and concentration analysis of metal at all stages of metallurgical processing, from ingot to sheet metal, was proposed. This method utilizes metallographic techniques to study structure and qualitatively analyze nonmetallic inclusions.

The results revealed that surface quality of sheet metal is significantly influenced by physical heterogeneity in the ingot crust zone, while internal defects in thin-sheet metal are largely determined by metal contamination with non-metallic inclusions. A novel mechanism for defect transformation in the casting crust zone into surface and internal defects in sheet metal was proposed.

This research deepens our understanding of defect formation and transformation processes in metal processing and contributes to the development of strategies to improve rolled product quality. Particular attention is paid to controlling ingot crust zone physical inhomogeneity and minimizing non-metallic inclusion contamination to achieve high-quality rolled steel.

Keywords: ingot, macro- and micro-heterogeneity, slab, rolled metal, defect, structure.

**Y. Y. Kambarov^{1,2}, *A. Y. Kussainov¹,
P. Kowalewski³, G. K. Uazyrkhanova²**

¹S. Amanzholov EKV, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

²D. Serikbayev EKTU, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

³Wroclaw University of Science and Technology, Poland, Wroclaw

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0838-6724>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2216-5706>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9817-9752>

*e-mail: arys20055@gmail.com

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HIGH ENTROPY ALLOY COATING OF AlCrCoFeNi SYSTEM OBTAINED BY DETONATION SPRAYING METHOD

The paper presents the results of the study of a high-entropy coating of the AlCrCoFeNi system obtained using mechanochemical synthesis and deposited on a 40X steel substrate by detonation sputtering. The unique microstructural and mechanical properties of this coating have been thoroughly investigated, including a detailed analysis of the phase distribution and hardness of the material. A cross-sectional study of the coating revealed a uniform distribution of components, which contributes to its performance characteristics. X-ray diffraction analysis showed a complex multiphase structure represented by HCC, OCC, GPU phases, and intermetallic compounds, which provide strength to the coating. The results of Vickers microhardness measurements confirmed high hardness values, as well as resistance to plastic deformation, which makes this coating promising for use as a structural material. Thus, the investigated coating can be used in conditions requiring increased wear resistance and strength, which opens prospects for its wide application in various industries.

Keywords: high entropy alloys, coating, detonation spraying, mechanical properties, microstructure.

Introduction

High entropy alloys (HEA) or multi-component alloys, are alloys that include a combination of five or more major elements, each present in a mole fraction of 5% to 35% [1]. Unlike traditional single element-based alloys, intermetallic compounds based on two elements are usually brittle [2] HEA due to unique alloy features and such as low diffusion, lattice distortion and cocktail effect [3] have high physical, chemical and unique phase structures. The properties of HEA such as high oxidation and radiation resistance [4,5], excellent corrosion and wear resistance, and high yield strength at elevated temperatures [6] have been identified.

The concept of high-entropy alloys (HEA) is an innovative approach to alloy design in which several basic alloying elements are added, most often in equiatomic proportions, to produce a single-phase microstructure of face-centred cubic (FCC) body-centred cubic (BCC) or Hexagonal Close Packed (HCP) [3, 7]. In traditional alloys, a single component serves as the main element, to which small amounts of other elements are added (generally following Hume-Rothery rules) to obtain the desired properties depending on the intended use. It has long been assumed that the addition of several basic elements could lead to the formation of intermetallics, complex structures or massive metallic glasses [8]. Cantor and Ye proposed alloys containing several basic elements in equimolar fraction (e.g., CoCrFeMnNi and AlCoCrCuFeNi), which led to the formation of simple crystal structure [1, 9]. According to Ye and co-workers, the simplicity of the crystal structure in HEA is due to the high configurational entropy of the system [9].

The Al_xCoCrFeNi HEA is one of the key high-entropy alloy systems, actively researched due to its crystal structure transition from FCC to BCC depending on the Al content [10]. The FCC-structured Al_xCoCrFeNi HEA exhibits high strain rate sensitivity compared to traditional FCC-structured materials [10]. This alloy demonstrates high strength due to internal stresses arising from lattice distortions, dislocation strengthening, and solid solution strengthening. Additionally, the Al_xCoCrFeNi HEA shows excellent structural stability and good mechanical properties over a wide temperature range [11]. Its corrosion and wear resistance are comparable to conventional alloys such as AISI 304 stainless steel and Inconel 718 [12]. Due to these properties, the Al_xCoCrFeNi HEA is a focus of active research. Most previously described bulk HEAs are manufactured using arc melting, spark plasma sintering, and direct casting, as these methods are relatively efficient and cost-effective [3]. However, these conventional methods for producing bulk HEAs lack flexibility, limiting their broader application. Consequently, developing and studying high-entropy alloy coatings (HECs) is important for further practical applications. Notably, many methods have been used to produce HECs, including thermal spraying, laser cladding, plasma arc cladding, electrodeposition, spark plasma sintering, and magnetron sputtering [6, 13-17], among which thermal spraying holds great potential for producing large-area HECs for engineering applications due to its flexibility, high deposition efficiency, and low cost. However, HECs produced by traditional thermal spraying methods, such as atmospheric plasma spraying, have several drawbacks, including a layered structure, segregation, and significant oxidation [18]. Therefore, a more effective deposition method is needed to create high-quality HECs. Detonation spraying (DS) is an innovative thermal spraying method widely used in industry to produce coatings with dense microstructures and high adhesion [19–20].

In this study, AlCrCoFeNi HEA obtained by mechanical synthesis were deposited on 40Kh steel (37Cr4) substrates by detonation spraying, and their microstructure, chemical composition and mechanical properties were analyzed. Microhardness, wear resistance and microstructure changes were measured. The results obtained provide an important basis for further development and practical application of HEC in engineering applications.

Materials and Methods

Powders with the chemical composition Al, Co, Cr, Fe, and Ni, with high purity (~99.5 wt.%) in an equiatomic ratio, were synthesized by a mechanochemical method. After synthesis, the prepared powders exhibited a flake-like shape with particle sizes ranging from 15 to 70 μm and had good flowability. SEM micrographs of the synthesized powders and the particle size distribution are shown in Figure 1.

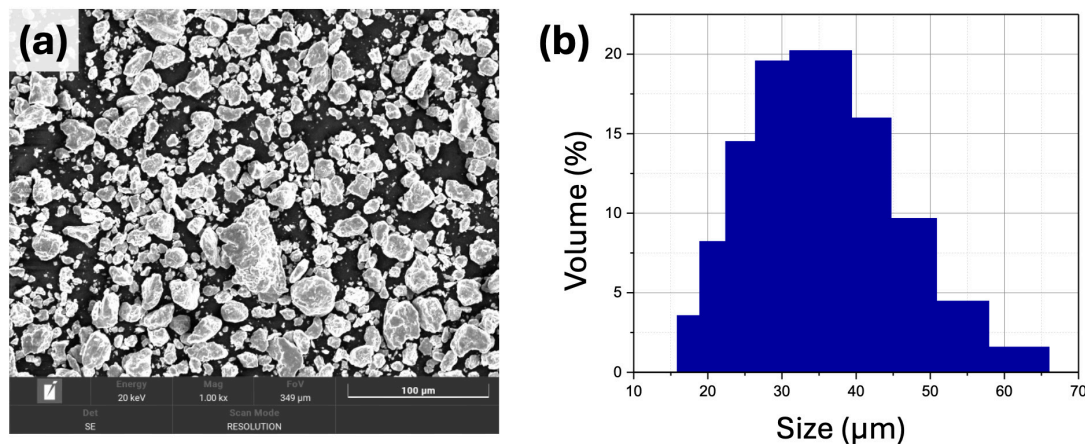


Figure 1 – SEM micrographs of AlCrCoFeNi HEA powders and coatings: (a) original HEA powders, (b) near-Gaussian distributions of the powder sizes

Stainless steel 40Kh was selected as the substrate. For testing, cylindrical substrates with dimensions $\varnothing 30 \times 6$ mm were prepared. Prior to coating, all substrates were pre-cleaned in an ultrasonic bath with 90% alcohol, then sandblasted to achieve a rough surface, and blown with compressed air to remove any remaining abrasive from the top surface. The AlCrCoFeNi HEA coatings were then applied using a computer-controlled detonation spraying system (CCDS2000, Russia), as shown in Figure 2. During detonation spraying, oxygen and acetylene were used as fuel gases, with nitrogen serving as the purging gas. The process consisted of four stages: fuel supply, material supply, ignition, and purging. First, an oxygen-acetylene mixture was introduced as the working gas and ignited by a spark discharge to initiate detonation. Then, the AlCrCoFeNi HEA powders were heated by the explosive gas and sprayed at high speed onto the 40Kh steel substrate, forming the AlCrCoFeNi HEA coating. At the end of the cycle, nitrogen purged the inner part of the barrel, preparing the system for the next cycle. The detonation spraying parameters were controlled by adjusting the acetylene-oxygen ratio and their total flow. In this study, the acetylene-to-oxygen ratio for applying the HEA coating was set to 1.026. Detailed parameters of the detonation spraying method for AlCrCoFeNi HEA coatings are presented in Table 1. Compressed air was used to cool the substrate, supplied through a pair of nozzles mounted on the setup.

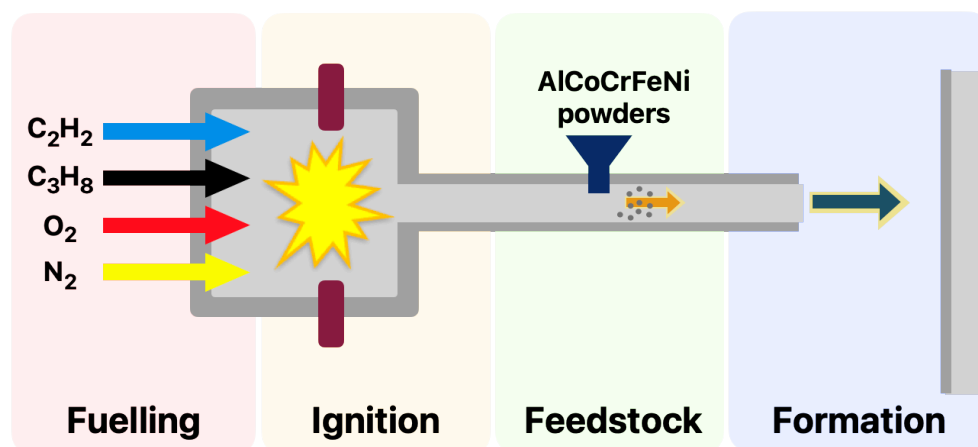


Figure 2 – Schematic diagram of AlCrCoFeNi HEC prepared by DS system.

Table 1. Parameters of AlCrCoFeNi HEC obtained by DS method

Ratio O_2/C_2H_2	Distance substrate to	Number of shots	Delay time	Length of barrel	Percentage of gas filling
1.026	150 mm	30	0.5 s	1000 mm	60 %

The morphology of the AlCrCoFeNi HEC was studied using a field-emission scanning electron microscope (SEM, Tescan Vega, Czech Republic). To obtain the cross-sectional microstructure of the AlCrCoFeNi HEC, samples were first ground using metallographic sandpaper and then polished with a diamond suspension with a particle size of 0.5 μm .

The structure was analyzed using an X-ray diffractometer (X'PertPRO, PANalytical, Netherlands) with $\text{Cu K}\alpha$ radiation ($\lambda = 0.154056 \text{ nm}$). The scanning range was set from 10° to 90° at a scanning speed of $0.02^\circ/\text{s}$.

The Vickers surface hardness of the HEA coatings was measured using a Fischerscope HM 2000 microhardness tester at a load of 100 mN and a dwell time of 15 seconds. Before testing, the sample surfaces were ground to ensure a flat surface for accurate microhardness measurements.

Tribological testing was conducted using a TRB3 Anton Paar tribometer in unidirectional sliding mode, based on the «Ball-on-Disk» principle. Measurements were performed at a laboratory temperature of 28.07°C and relative humidity of 25.05 %. A steel ball with a 100Cr6 steel coating and substrate, cleaned with an ethanol solution ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), served as the counter body, with a vertical load of 5 N. The contact sphere had a radius of 3.00 mm, representing the standard ball geometry, which allowed for the evaluation of coating behavior under localized contact conditions. The testing distance was set at 200 m, enabling an assessment of the coating's durability and wear resistance.

Results and Discussion

In Figure 3 (a), it can be observed that the coating thickness varies from 81 μm to 89 μm , indicating some variation in the spraying process. This thickness non-uniformity is associated with the characteristics of detonation spraying. It is important to note that the variation in coating thickness is minor and within acceptable limits, suggesting the

stability of the deposition process. Figure 3 (b) provides a more detailed view of the coating's microstructure. The coating contains small pores and microcracks, which are typical for sprayed coatings. These pores may arise due to the rapid solidification of particles during deposition or insufficient energy of sprayed particles for complete fusion. The presence of pores and microcracks can impact the mechanical properties of the coating, such as reducing its hardness and wear resistance, as well as increasing its susceptibility to corrosion. However, these defects can be controlled and utilized to create a coating with a specified porosity, for example, in applications where enhanced adhesion or increased surface area is required. The boundary between the coating and substrate is clearly visible, indicating high-quality coating deposition without significant adhesion defects. This distinct boundary also suggests the absence of diffusion mixing between the substrate and coating materials, which indicates resistance to thermal effects during the spraying process.

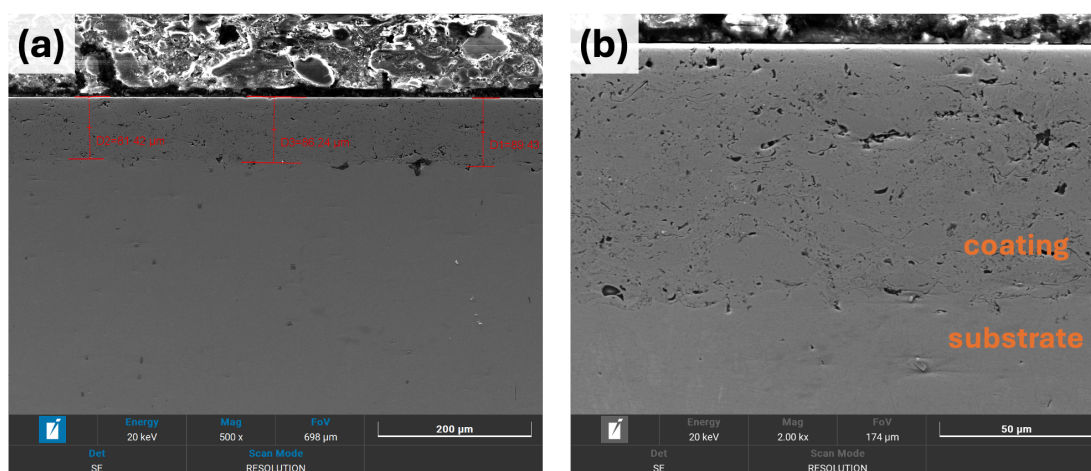


Figure 3 – Cross-sectional morphologies of sprayed coating (a) 500x (b) 2000x

The microstructure of the coating observed in Fig.3 (b) is fine-grained with small porous inclusions. This structure may contribute to enhancing the mechanical properties of the coating, especially under increased loads. Fine-grained structures are typically associated with higher hardness and strength, making the coating suitable for wear-intensive applications. The presence of pores in the microstructure may also improve the adhesion of lubricants, potentially reducing the friction coefficient during operation.

Figure 4 shows the X-ray diffraction (XRD) patterns of the coating, powder, and substrate, allowing for a comparative analysis of their phase composition and structure. The diffraction pattern of the substrate displays intense peaks corresponding to its structure. Dominant peaks indicate the presence of a crystalline phase with a cubic lattice, confirming the high crystallinity of the substrate material. The main peaks of the substrate align with the BCC phase, which is typical for steel-based materials.

The XRD pattern of the powder reveals a more complex composition, represented by multiple peaks corresponding to FCC, BCC, HCP and intermetallic (IC) phases. This indicates the multiphase nature of the powder material, likely resulting from the mixing

of various components. The intensity peaks for FCC and BCC phases may suggest the formation of a high-entropy structure or a mixture of metallic and intermetallic phases.

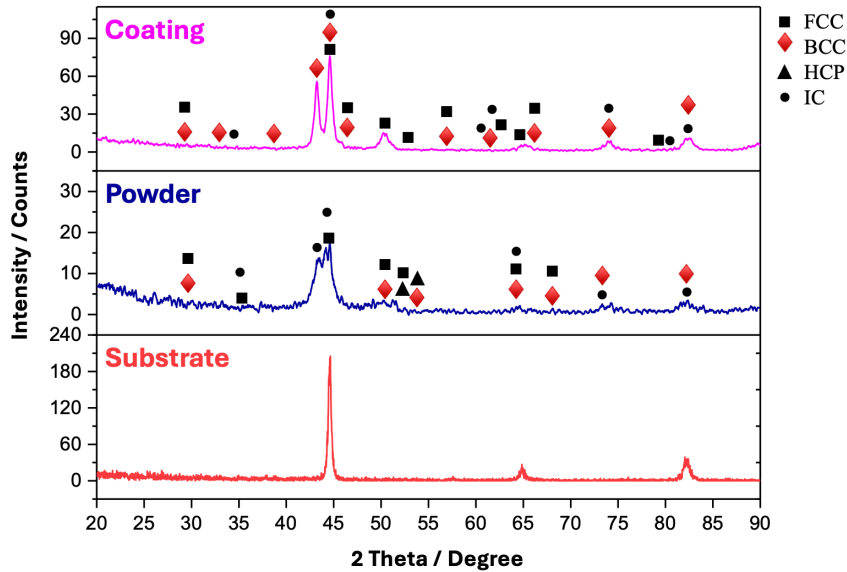


Figure 4 – XRD patterns of the AlCrCoFeNi powders and HEC

The XRD pattern of the coating shows intense peaks similar to those found in the powder, though their relative intensities have changed. This suggests phase redistribution and possible structural modifications during the coating process. The predominance of FCC and BCC phases implies the presence of a high-entropy structure or a mixture of metallic phases, which provides high coating stability. The presence of the HCP phase may indicate the addition of other components to enhance mechanical properties. The reduced intensities of certain peaks compared to the powder may indicate partial amorphization or changes in material crystallinity during the coating deposition process.

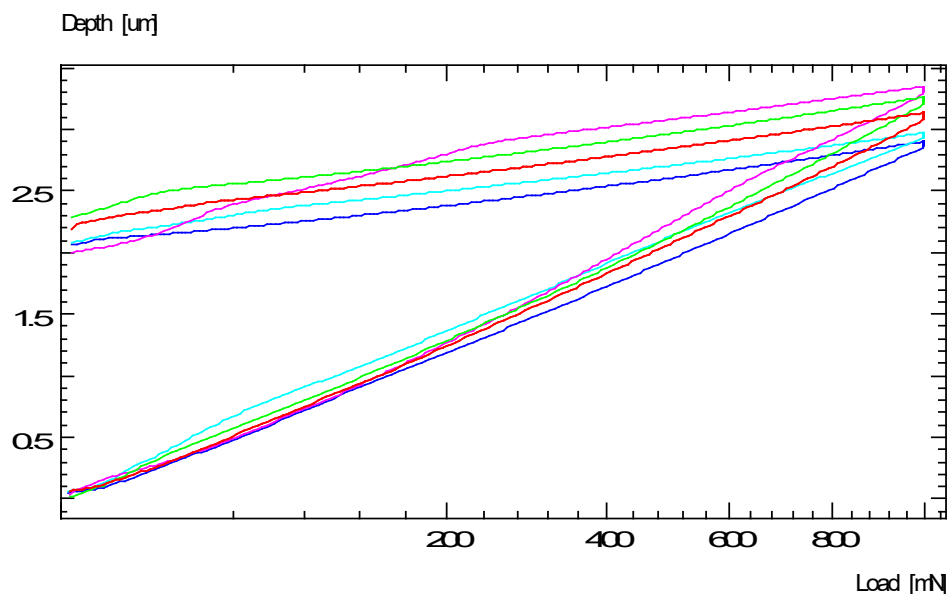


Figure 5 – Depth – Load graph of AlCrCoFeNi HEC

Table 2 – Results of microhardness test

No.	HM / N×mm ⁻²	HV	Hit / N×mm ⁻²
1	4438.2	625.2	6615.6
2	4219.9	573.5	6068.9
3	3361.5	430.4	4554.4
4	3541.4	479.4	5073.4
5	3833.5	519.7	5499.9

As shown in Table 2, the Vickers microhardness (HV) values range from 430.4 to 625.2 HV. The highest hardness value (625.2 HV) was recorded at point 1, which may be associated with local structural inhomogeneity or the presence of denser phases. Such high hardness values indicate a high wear resistance of the coating, making it suitable for applications under friction and high loads. The indentation hardness (Hit) values range from 4554.4 to 6615.6 N/mm², with the highest value also observed at point 1. High indentation hardness values indicate the coating’s resistance to plastic deformation, an important parameter for coatings intended to operate in harsh conditions. This also suggests that the coating can withstand significant mechanical loads without substantial deformation, positively impacting its durability.

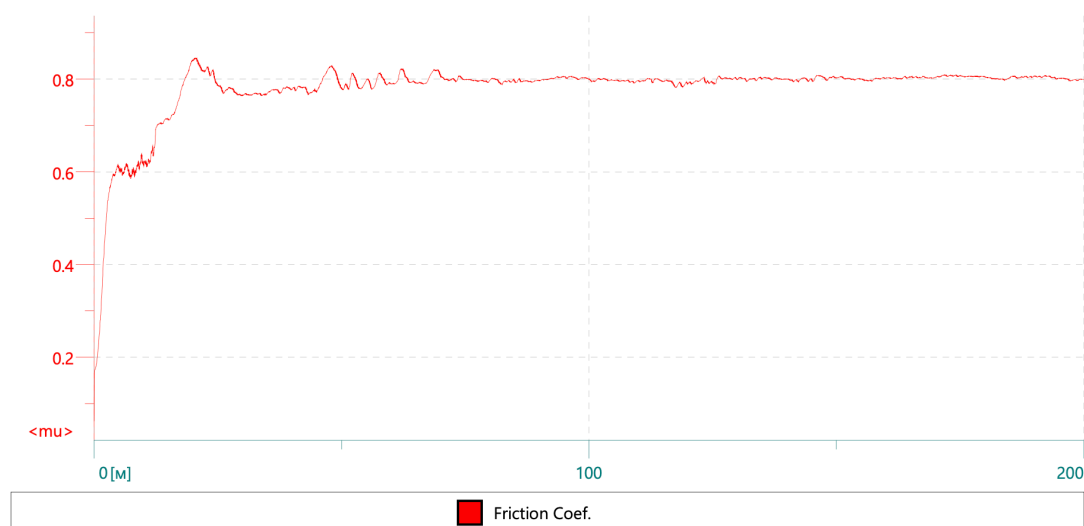


Figure 6 – Graph of friction coefficient dependence on the travelled distance

Figure 6 shows that at the beginning of the test the coefficient of friction increases rapidly, reaching a maximum value of 0.845, after which there is a stabilization at an average value of about 0.780. This indicates the initial phase of adaptation of the contacting surfaces, typical for most coatings during the first friction cycles, after which the coefficient of friction reaches a stationary state. The minimum value of the friction coefficient was 0.063, which may be due to microstructural features of the coating or its residual lubricity. It is important to note that the standard deviation of the friction coefficient was 0.071, indicating a high stability of the friction process after the initial adaptation stage. The wear area of the sample was $8767.9 \text{ } \mu\text{m}^2$, indicating moderate wear of the coating at a given load and distance travelled. The wear rate of the sample was $0.0001652 \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$, indicating high wear resistance of the HEC when the counter body was not recorded, indicating minimal changes or no noticeable wear on the 100Cr6 steel ball side.

Funding Information

This research has been funded by the Committee for Quality Assurance in Science and Higher Education of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP22787411).

Conclusion

The AlCrCoFeNi HEA coating was successfully applied to a 40Kh steel substrate by the detonation spraying method, and its unique microstructure and mechanical properties were studied. The cross-sectional morphology results demonstrate the coating's uniform distribution and strong adhesion to the substrate. X-ray structural analysis confirms that the investigated coating exhibits a complex multiphase structure, consisting of FCC, BCC, HCP phases, and intermetallic compounds. Differences in the intensity of the peaks between the powder and coating indicate structural changes that occurred during the deposition process.

The Vickers microhardness, indentation hardness, and modulus of elasticity measurements yielded values around 500 HV, indicating that the coating has a high level of hardness and resistance to plastic deformation. Based on these data, it can be inferred that the applied coating holds promise for applications requiring high mechanical strength and hardness, while the coating's porosity may positively impact its friction and wear properties.

We investigated HEA coatings produced by the detonation spraying method, in which the HEA powder was synthesized using high-energy ball milling (HEBM). This opens up new possibilities for the functionalization of HEA coatings with enhanced properties.

REFERENCES

1 **Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B.** Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A.* – 2004., – № 375. – P. 213–218.

2 **Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., P. K. Liaw, Lu, Z. P.** Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Prog. Mater. Sci.* – 2014. – V. 61. – P.1–93.

3 **Miracle, D. B., Senkov, O. N.** A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta materialia.* – 2017. – №.122. – P. 448–511.

4 **Hsu, W. L., Yang, Y. C., Chen, C. Y., Yeh, J. W.** Thermal sprayed high-entropy NiCo_{0.6}Fe_{0.2}Cr_{1.5}SiAlTi_{0.2} coating with improved mechanical properties and oxidation resistance // *Intermetallics.* – 2017. – №. 89. – P. 105–110.

5 **Lu, Y., Huang, H., Gao, X., Ren, C., Gao, J., Zhang, H., Zheng, S., Jin, Q., Zhao, Y., Lu, C., Wang, T., Li, T.** A promising new class of irradiation tolerant materials: Ti₂ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2} high-entropy alloy // *Journal of Materials Science and Technology.* – 2019. – № 35. – P. 369–373.

6 **Aliyu, A., Srivastava, C.** Microstructure-corrosion property correlation in electrodeposited AlCrFeCoNiCu high entropy alloys-graphene oxide composite coatings // *Thin Solid Films.* – 2019. – № 686. – P. 137434.

7 **George, E. P., Curtin, W. A., Tasan, C. C.** High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Mater.* – 2020. – № 188. – P. 435.

8 **Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., Tiley, J.** Exploration and development of high entropy alloys for structural applications // *Entropy.* – 2014. – № 16. – P. 494.

9 **Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H., Chang, S. Y.** Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // *Adv. Eng. Mater.* – 2004. – № 6. – P. 299.

10 **Gangireddy, S., Gwalani, B., Soni, V., Banerjee, R., Mishra, R. S.** Contrasting mechanical behavior in precipitation hardenable Al_xCoCrFeNi high entropy alloy

microstructures: Single phase FCC vs. dual phase FCC-BCC // Mater. Sci. Eng. A. – 2019. – № 739. – P. 158.

11 **Wang, W. R., Wang, W. L., Yeh, J. W.** Phases, microstructure and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys at elevated temperatures // J. Alloys Compd. – 2014. – № 589. – P. 143.

12 **Joseph, J., Haghdadi, N., Shamlaye, K., Hodgson, P., Barnett, M., Fabijanic, D.** The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and Al_xCoCrFeNi high entropy alloys at elevated temperatures // Wear. – 2019. – № 428–429. – P. 32.

13 **Zhang, H., Pan, Y., He, Y.-Z.** Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding // Mater. Des. – 2011. – № 32 (4). – P. 1910–1915.

14 **Wang, M., Lu, Y., Zhang, G., Cui, H., Xu, D., Wei, N., Li, T.** A novel high-entropy alloy composite coating with core-shell structures prepared by plasma cladding // Vacuum. – 2021. – № 184. – P. 109905.

15 **Ji, X., Zhao, J., Wang, H., Luo, C.** Sliding wear of spark plasma sintered CrFeCoNiCu high entropy alloy coatings with MoS₂ and WC additions // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2017. – № 96 (5–8). – P. 1685–1691.

16 **Wang, M., Cui, H., Zhao, Y., Wang, C., Wei, N., Zhao, Y., Zhang, X., Song, Q.** A simple strategy for fabrication of an FCC-based complex concentrated alloy coating with hierarchical nanoprecipitates and enhanced mechanical properties // Mater. Des. – 2019. – № 180. – P. 107893.

17 **Liao, W., Lan, S., Gao, L., Zhang, H., Xu, S., Song, J., Wang, X., Lu, Y.** Nanocrystalline high-entropy alloy (CoCrFeNiAl_{0.3}) thin-film coating by magnetron sputtering // Thin Solid Films. – 2017. – № 638. – P. 383–388.

18 **Cheng, K. C., Chen, J. H., Stadler, S., Chen, S. H.** Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process // Appl. Surf. Sci. – 2019. – № 478. – P. 478–486.

19 **Rakhadilov, B.K., Sagdoldina, Z. B., Baizhan, D. R., Zhurerova, L. G., Yeskermessov, D. K., Kalitova, A. A., Smaiyllova, M.** Obtaining of Hydroxyapatite Coatings on A Titanium Substrate by Detonation-Gas Spraying // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – №. 18(3). – P. 30–36.

20 **Rahadilov B. K., Dautbekov M. K., Zhurerova L. G., Stepanova O. A., Akaev A. M.** Tekhnologiya polucheniya pokrytij metodom detonacionnogo napyleniya na detalyah energeticheskogo oborudovaniya teplovyh stancii [Technology for producing coatings using detonation spraying on parts of power equipment of thermal stations] // Vestnik Torajgyrov universiteta – 2023. – №. 2. – C. 299.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B.** Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – № 375. – P. 213-218.
- 2 **Zhang, Y., Zuo, T.T., Tang, Z., Gao, M.C., Dahmen, K.A., P.K. Liaw, Lu, Z.P.,** Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Prog. Mater. Sci.* – 2014. – V. 61. – P. 1–93
- 3 **Miracle, D. B., Senkov, O. N.** A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta materialia*. – 2017. – №.122. – P. 448–511.
- 4 **Hsu, W. L., Yang, Y. C., Chen, C. Y., Yeh, J. W.** Thermal sprayed high-entropy NiCo_{0.6}Fe_{0.2}Cr_{1.5}SiAlTi_{0.2} coating with improved mechanical properties and oxidation resistance // *Intermetallics*. – 2017. – №. 89. – P. 105–110.
- 5 **Lu, Y., Huang, H., Gao, X., Ren, C., Gao, J., Zhang, H., Zheng, S., Jin, Q., Zhao, Y., Lu, C., Wang, T., Li, T.** A promising new class of irradiation tolerant materials: Ti₂ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2} high-entropy alloy // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2019. – № 35. – P. 369–373.
- 6 **Aliyu, A., Srivastava, C.** Microstructure-corrosion property correlation in electrodeposited AlCrFeCoNiCu high entropy alloys-graphene oxide composite coatings // *Thin Solid Films*. – 2019. – № 686. – P. 137434.
- 7 **George, E. P., Curtin, W. A., Tasan, C. C.** High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Mater.* – 2020. – № 188. – P. 435.
- 8 **Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., Tiley, J.** Exploration and development of high entropy alloys for structural applications // *Entropy*. – 2014. – № 16. – P. 494.
- 9 **Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H., Chang, S. Y.** Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // *Adv. Eng. Mater.* – 2004. – № 6. – P. 299.
- 10 **Gangireddy, S., Gwalani, B., Soni, V., Banerjee, R., Mishra, R. S.** Contrasting mechanical behavior in precipitation hardenable Al_xCoCrFeNi high entropy alloy microstructures: Single phase FCC vs. dual phase FCC-BCC // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2019. – № 739. – P. 158.
- 11 **Wang, W. R., Wang, W. L., Yeh, J. W.** Phases, microstructure and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys at elevated temperatures // *J. Alloys Compd.* – 2014. – № 589. – P. 143.
- 12 **Joseph, J., Haghdad, N., Shamlaye, K., Hodgson, P., Barnett, M., Fabijanic, D.** The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and Al_xCoCrFeNi high entropy alloys at elevated temperatures // *Wear*. – 2019. – № 428–429. – P. 32.
- 13 **Zhang, H., Pan, Y., He, Y.-Z.** Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding // *Mater. Des.* – 2011. – № 32 (4). – P. 1910–1915.

14 Wang, M., Lu, Y., Zhang, G., Cui, H., Xu, D., Wei, N., Li, T. A novel high-entropy alloy composite coating with core-shell structures prepared by plasma cladding // Vacuum. – 2021. – № 184. – P. 109905.

15 Ji, X., Zhao, J., Wang, H., Luo, C. Sliding wear of spark plasma sintered CrFeCoNiCu high entropy alloy coatings with MoS₂ and WC additions // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2017. – № 96 (5–8). – P. 1685–1691.

16 Wang, M., Cui, H., Zhao, Y., Wang, C., Wei, N., Zhao, Y., Zhang, X., Song, Q. A simple strategy for fabrication of an FCC-based complex concentrated alloy coating with hierarchical nanoprecipitates and enhanced mechanical properties // Mater. Des. – 2019. – № 180. – P. 107893.

17 Liao, W., Lan, S., Gao, L., Zhang, H., Xu, S., Song, J., Wang, X., Lu, Y. Nanocrystalline high-entropy alloy (CoCrFeNiAl_{0.3}) thin-film coating by magnetron sputtering // Thin Solid Films. – 2017. – № 638. – P. 383–388.

18 Cheng, K. C., Chen, J. H., Stadler, S., Chen, S. H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process // Appl. Surf. Sci. – 2019. – № 478. – P. 478–486.

19 Rakhadilov, B. K., Sagdoldina, Z. B., Baizhan, D. R., Zhurerova, L. G., Yeskermessov, D. K., Kalitova, A. A., Smaylova, M. Obtaining of Hydroxyapatite Coatings on A Titanium Substrate by Detonation-Gas Spraying // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – №. 18(3). – P. 30–36.

20 Рахадиллов Б. К., Даутбеков М. К., Журерова Л. Г., Степанова О. А., Акаев А. М. Технология получения покрытий методом детонационного напыления на деталях энергетического оборудования тепловых станции // Вестник Торайгыров университета – 2023. – №. 2. – С. 299.

Received 06.11.24.

Received in revised form 08.11.24.

Accepted for publication 26.12.24.

*Е. Е. Қамбаров^{1,2}, *А. Е. Қусайнов¹, П. Ковалевски³, Г. К. Уазырханова²*

¹С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан Техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

³Вроцлав Ғылым және Техника Университеті, Польша, Вроцлав

06.11.24 ж. баспаға түсті.

08.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

26.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**ALCRCOFENI ЖҮЙЕСІНДЕГІ ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫ
ҚОРЫТПАНЫҢ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН
ЖАБЫНЫНЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМДЫҚ
ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ**

Мақалада механохимиялық синтез арқылы алынған Және детонациялық шашырау арқылы 40 ECSE болат субстратқа тұндырылған Алкромфени жүйесінің жоғары энтропиялы жабынын зерттеу нәтижелері берілген. Бұл жабынның бірегей микроқұрылымдық және механикалық қасиеттері мұқият зерттелді, оның ішінде материалдың фазалық таралуы мен қаттылығын егжей-тегжейлі талдау. Қаптаманың көлденең қимасын зерттеу компоненттердің біркелкі таралуын анықтады, бұл оның өнімділік сипаттамаларына ықпал етеді. Рентгендік дифракциялық талдау жабынның беріктігін қамтамасыз ететін НСС, ОСС, GPU фазаларымен және металлалық қосылыстармен ұсынылған күрделі көп фазалы құрылымды көрсетті. Виккерстің микроқаттылығын өлшеу нәтижелері қаттылықтың жоғары мәндерін, сондай-ақ пластикалық деформацияға төзімділігін растады, бұл бұл жабынды құрылымдық материал ретінде пайдалану үшін перспективалы етеді. Осылайша, зерттелген жабынды тозуға төзімділігі мен беріктігін арттыруды қажет ететін жағдайларда қолдануға болады, бұл оны әртүрлі салаларда кеңінен қолдану перспективаларын ашады.

Кілт сөздер: жоғары энтропиялы қорытпалар, жабын, детонациялық бүрку, механикалық қасиеттер, микроструктура.

Е. Е. Камбаров^{1,2} *А. Е. Кусайнов¹, П. Ковалевски³, Г. К. Уазырханова²

¹Восточно-Казахстанский Университет имени С. Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск

²Восточно-Казахстанский Технический Университете имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск

³Вроцлавский университет Науки и Техники, Польша, Вроцлав
Поступило в редакцию 06.11.24.

Поступило с исправлениями 08.11.24.

Принято в печать 26.11.2024.

**МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОКРЫТИЯ ВЫСОКО ЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ
ALCRCOFENI ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ
ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

В статье изложены результаты исследования высокоэнтропийного покрытия системы AlCrCoFeNi, полученного с использованием механохимического синтеза и нанесенного на подложку из стали 40X методом детонационного напыления. Уникальные микроструктурные и механические свойства этого покрытия были тщательно изучены, включая детальный анализ распределения фаз и твердости материала. Исследование поперечного

сечения покрытия выявило равномерное распределение компонентов, что способствует повышению его эксплуатационных характеристик. Проведённый рентгеноструктурный анализ показал сложную многофазную структуру, представленную фазами ГЦК, ОЦК, ГПУ, а также интерметаллическими соединениями, которые обеспечивают прочность покрытия. Результаты измерений микротвердости по Виккерсу подтвердили высокие значения твердости, а также устойчивость к пластическим деформациям, что делает это покрытие перспективным для применения в качестве конструкционного материала. Таким образом, исследованное покрытие может использоваться в условиях, требующих повышенной износостойкости и прочности, что открывает перспективы для его широкого применения в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, покрытие, детонационное напыление, механические свойства, микроструктура.

***Н. М. Рамазанов¹, Б. Б. Саркенов²**

^{1,2}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан республикасы, Қарағанды қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6626-0589>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0512-5625>

*e-mail: nurlan.2001.n@mail.ru

ФЕРРОҚОРЫТПА ЭЛЕКТР ПЕШІ ЖҰМЫСЫНЫҢ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ КРИТЕРИЙІ ТҰРҒЫСЫНАН ФЕРРОСИЛИЦИЙДІ БАЛҚЫТУ

Бұл мақалада ферроқорытпа электр пеші жұмысының тиімділігін бағалау үшін энерготехнологиялық критерий ұсынылды. Оның физикалық мәні мынада: ол жылу шығынын және жетекші элементті қорытпаға алу дәрежесін ескере отырып, ферроқорытпаны (ферросилиций, феррохром, ферромарганец) өндірудің кенді қалпына келтіретін көміртекті-термиялық процесіне кеткен, оның пайдалы бөлігін ток көзінен алынған энергияның үлесін анықтайды.

Ферросилицийдің әртүрлі маркаларын алу мысалында ферроқорытпа пешінің жұмысының энерготехнологиялық критерийлерін пайдалана отырып, көміртекті термиялық процесспен электр пештерінде ферроқорытпаларды балқыту параметрлерін талдау нәтижелері ұсынылған. Ферроқорытпа пешінің энерготехнологиялық критерийінің мәндерінің ұлғаюымен қорытпаның 1 тоннасына электр энергиясының меншікті шығыны азаятыны көрсетілген. 75% ферросилицийді балқытатын орташа қуатты электр пештері үшін ферроқорытпа пешінің энерготехнологиялық критерийінің мәндері 0,300-ден 0,314-ке дейінгі диапазонға сәйкес келеді. Бұл ретте электр энергиясының меншікті шығыны қорытпаның 9,0-ден 8,6 МВт·сағ/т құрайды. Пеш жұмысының қанағаттанарлық, бірақ тиімдірек нұсқасы 0,272-ден 0,293-ке дейінгі энерготехнологиялық өлшем мәндерінің диапазоны болып табылады, онда электр энергиясының меншікті шығыны 9,8-ден 9,2 МВт·сағ/т қорытпасына дейін өзгереді. Энерготехнологиялық өлшем сияқты кешенді шаманы ферроқорытпа пеш агрегатының энергетикалық және технологиялық аудитінің негізгі элементі ретінде қарастыруға болады, сондай-ақ пештердің тиімді жұмыс режимдерін анықтау, шихта материалдарының (кен шикізаты, көміртекті тотықсыздандырғыштар) және балқытудың инновациялық технологияларының әртүрлі түрлерін қолдануды талдау үшін пайдалануға болады.

Кілтті сөздер: ферроқорытпа өндірісі; ферроқорытпа электр пеші; көміртекті термиялық процесс; кремний алу; жылу тиімділігі; белсенді қуат; энергетикалық және технологиялық аудит.

Кіріспе

Ферроқорытпа пештерінің қуаты артқан кезде электр пешінің ваннасындағы белсенді қуат пен орнатылған трансформаторлық қуат арасындағы алшақтықтың артуы сияқты жағымсыз құбылыс байқалады. Бұл жоғары техникалық-экономикалық көрсеткіштерге қол жеткізуге мүмкіндік бермейді, пештердің өнімділігі мен олардың тиімділігін шектейді, бұл ғылыми-техникалық проблема болып табылады. Ферроқорытпа агрегаттарының жұмысын бағалау үшін (қуатты электр энергиясын тұтынушылар ретінде) кешенді параметр – ферроқорытпа электр пешінің энерготехнологиялық критерийі пайдаланылды [1, 75 б.]. Орташа қуатты пештер үшін 75% балқыту кезінде жақсы жұмыс деңгейі көрсетілген ферросилиций 0,300-ден 0,314-ке дейінгі энергетикалық технологиялық критерий диапазонына сәйкес келеді, бұл кезде электр энергиясының меншікті шығыны 9,0-ден 8,6 МВт дейін болады. Тиісінше, көміртекті феррохром үшін энерготехнологиялық критерийдің диапазоны 0,304-тен 0,326-ға дейін құрайды, бұл ретте электр энергиясының меншікті шығыны 3,6-дан 3,4 МВт дейін. Алынған тәуелділіктер негізінде энерготехнологиялық критерий мәндерінің ұлғаюы электр энергиясының үлестік шығынын және алынған ферроқорытпаның 1 т цехтық өзіндік құнын төмендетуге, сондай-ақ пештің үлестік өнімділігін (т/тәулік) 1 МВт-қа, ал трансформатордың қуатын қожсыз және электр пештеріндегі қож балқыту процестері үшін арттыруға сәйкес келетіндігі анықталды.

Электр пештерінде ферроқорытпаларды алу процестері материалды және энергияны көп қажет ететін санатқа жатады. 1 тонна ірі тоннажды ферроқорытпалар мен кремнийді балқытуға жұмсалатын электр энергиясының үлестік шығыны доғалы пеште 1 тонна болатты балқытуға қарағанда 7-20 есе жоғары болады. Электр пештерінде ферроқорытпалардың балқуына энергетикалық фактор, кен материалдары мен көміртекті тотықсыздандырғыштардың сапасы айтарлықтай әсер етеді.

Жалпы электр энергиясына байланысты жылу генерациясы өнеркәсіпте кеңінен қолданылады. Бұл жылу өндірудің басқа әдістерімен салыстырғанда электр энергиясының айтарлықтай артықшылықтары бар:

- анықтайтын параметрлерді (кернеу, ток күші, жиілік) салыстырмалы түрде жеңіл түрлендіруі;
- жоғары ПӘК-мен ұзақ қашықтыққа беру мүмкіндігі;
- тұтынылатын қуатты біркелкі реттеу мүмкіндігі және жылу генерациясы кезінде максималды түрлендіру коэффициенті.

Электр энергиясына байланысты жылу генерациясы келесідей мүмкіндіктерді береді:

- жылу және технологиялық процестерді автоматтандыруды кеңінен қолдану;
- пештердің жұмыс кеңістігінің шағын көлемінде үлкен энергияны шоғырландыруға мүмкіндік береді, бұл жоғары температура мен материалды қыздыру жылдамдығын алуға мүмкіндік береді;
- электр энергиясын ауа болмаған кезде (вакуумда немесе қорғаныс атмосферасында) жылу энергиясына айналдыру, бұл энергияны пайдалану коэффициентін едәуір арттырады және қышқылсыз қыздыруды жүргізуге, ультра

таза, жоғары реактивті және отқа төзімді материалдарды алуға мүмкіндік береді. Бұл фактор еңбек жағдайларын едәуір жақсартады.

Негізінен, ФС20–ФС90 маркалы ферросилицийдің кең ассортиментіне қарамастан, электр пештеріндегі балқыту көлемінің едәуір бөлігі ФС45–ФС75 қорытпалары болып табылады. Ферроқорытпа маркалы ФС75 тек ішкі тұтыну нарығы үшін ғана емес, сонымен қатар экспорттық операциялар үшін де сұранысқа ие [2, 12-13 б.].

Ферросилицийді балқыту үшін отандық шикізаттан жасалған шихта материалдары қолданылады. Электр пештерінде балқытудың көміртегі-термиялық процесі өте көп материалды және энергияны қажет етеді. Балқытылатын қорытпаға байланысты кесек шихтаның негізгі компоненттерінің меншікті шығыны: кварцит – 950 – 1050 – ден 2250 кг/т-ға дейін, көміртекті тотықсыздандырғыш (кокс, жартылай кокс, көмір және т.б.) – 440–490-дан 980 кг/т-ға дейін және одан да көп.

Атмосфераның бақыланатын құрамы кезінде жоғары температура аймағын құру және шоғырландыру мүмкіндігі балку температурасы жоғары ферроқорытпаларды өндіру үшін пештерде толық қолданылады [2]. Бұл фактор ферроқорытпа өнеркәсібінде доғаның максималды температурасы шихтаға жақын орналасқан тікелей әсер ететін доғалық пештерді қолдануды анықтайды. Доғалы ферроқорытпа пештері қалпына келтіру және тазарту болып табылады.

Тотықсыздандырғыш пештерде, әдетте, тотықсыздандырғыш ретінде көміртекті қолдану арқылы үздіксіз процесс жүреді. Бұл пештердегі электродтар үнемі пешке қосылатын қатты шихтаға батырылады. Бұндай пештерде ферросилиций, көміртекті феррохром және ферромарганец, силикокальций, силикохром, силикомарганец балқытылады. Бұндай пештегі қалпына келтіру процесі эндотермиялық болғандықтан, олар 85,5 МВА дейінгі [3, 304 б.] трансформаторлармен жабдықталған үлкен қуатты жұмсауды қажет етеді. Электр энергиясының меншікті шығыны 11 – 36 МДж/кг (3 – 10 кВт·сағ/кг) құрайды.

Тиісінше, ФС45–ФС75 ферросилицийін балқытуға арналған электр энергиясының меншікті шығыны 4650-4900-ден 8600-9000 кВт·сағ/т дейін және одан да көп, бұл доғалық пеште 1 т болатты балқытудан 10-20 есе жоғары болып келеді. 1 т ферросилицийді балқыту шығындарының құрылымы келесідей: кен шикізаты – 5–15 %, электр энергиясы – 43–55 %, көміртекті тотықсыздандырғыш – 20–25 % және қалғаны – басқа шығындар. Жұмыстың [3, 307б.] деректері бойынша 1 т қорытпаны алуға есептегендегі химиялық реакцияларға негізделген теориялық энергия шығыны: 45 % ферросилиций – 2520 кВт·сағ/т және 75 % ферросилиций – 4210 кВт·сағ/т, ал бұл төмен шахталы электр пешінде шамамен 2 есе жоғары болып табылады.

Ферросилиций мен кремнийді балқыту кезінде электр пештерінде өндіруге арналған негізгі шикізат пештің қуаты мен электродтардың диаметріне байланысты 20–80 мм кварцит болып табылады. Кварциттерде кемінде 96–98 % SiO_2 және 1,5 % Al_2O_3 көп емес болуы керек, бұл үшін олар ұсақталады, жуылады және сұрыпталады. Кремнийдің қорытпаға енуінің тағы бір көзі – көміртекті тотықсыздандырғыштар және балқыту процесінде пайда болатын күл түріндегі

өздігінен жанатын электродтар. Ферросилицийдің негізгі маркаларын балқыту үшін қорытпаға кремнийді алу өте жоғары: жоғары кремнийлі қорытпалар үшін 92–98 % - дан 75–85 % - ға дейінгі пайызды құрайды.

Бұл жұмыстың мақсаты - ақпараттық талдау негізінде пештің жұмысы ферросилиций құрамындағы кремнийдің жоғарылауымен қорытпадағы жетекші элементті алу дәрежесінің төмендеуін анықтау. Бұл жағдай ферроқорытпа пеші жұмысының энерготехнологиялық критерийінің төмендеуіне әкеледі.

Материалдар және зерттеу әдістері

Әдеби деректерге сәйкес, жоғары кремнийлі ферросилиций маркаларының балкуы жетекші элементті қорытпаға шығарудың тұрақсыз мәндерімен бірге жүретінін атап өтуге болады. Сонымен қатар, қорытпадағы кремнийдің жоғарылауымен жетекші элементті алу дәрежесін төмендету үрдісі бар.

Электр пештерінде ферросилицийді балқыту, сондай-ақ техникалық кремнийді балқыту қожсыз процестерге жатады, өйткені түзілетін қож мөлшері қорытпа массасының 3–5 %-нан аспайды. Сондықтан қалпына келтіру процесінде жетекші элементтің негізгі таралуы қорытпа мен газ фазасында жүреді деп саналады. Кремнеземді көміртегімен қалпына келтірудің басталуының теориялық температурасы өте жоғары – 1942 к. темір шихтасына енгізу кремнийді реакция аймағынан ферросилиций балқыту өніміне шығарады және қалпына келтіру және алу процесін жеңілдетеді. Қорытпаның [4, 4-6 б.] температурасы пештен шыққан кезде шамамен 1650–1750 °С құрайды. Пештің қалыпты жұмысында шығатын газдардың температурасы шамамен 500–700 °С тең болады. Пештің жүрісі бұзылған кезде және электродтардың шихтаға терең енуі кезінде газдардың температурасы 1000–1200 °С-қа жетуі мүмкін.

Жұмыста [5, 8 б.] көміртекті термиялық процесс арқылы кенді қалпына келтіретін электр пештерінде ФС75 маркалы ферросилицийді және техникалық кремнийді балқыту технологиясына талдау жүргізілді.

Жалпылау және статистикалық өңдеу нәтижесінде кремнийді алу оның балқыту өніміндегі құрамына тәуелділігі алынды:

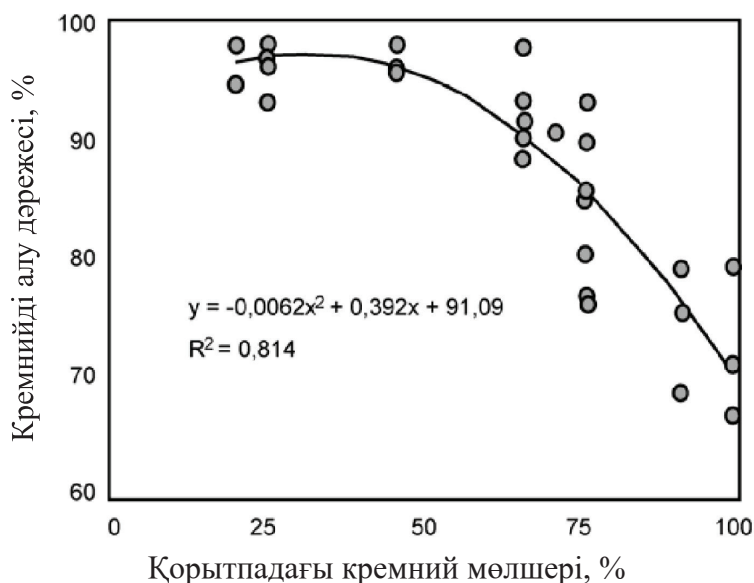
$$\eta Si = -0,0062[Si]_2 + 0,392[Si] + 91,09$$

мұндағы ηSi - кремнийді қорытпаға алу;

[Si] — қорытпадағы кремний мөлшері, %.

Қорытпадағы кремнийдің жоғарылауымен кремнийдің шығарылу дәрежесі төмендейді, бұл кремнийдің қалдық газдармен SiO түрінде ұшуының жоғарылауына байланысты (1 сурет). Алынған нәтижелер кестенің энергетикалық параметрлерін толық растайды. Жетекші элементті қорытпаға алу дәрежесі кремнийдің жоғарылауымен төмендейді [6]. Бұл жағдайда кремнийдің кварциттен, электродтардың күлінен, көміртекті тотықсыздандырғыштардың әртүрлі түрлерінің күлінен, сондай-ақ тотықсыздандырғыш-қопсытқыштардың күлінен алынуы ескерілді. Суреттен көрініп тұрғандай, кремнийді қалпына келтірудің

айтарлықтай төмендеуі Si-нің 65-70%-дан кейін басталады [7,8]. Қорытпадағы құрамының жоғарылауымен кремний өндірісінің төмендеуі, сайып келгенде, электр пешінің жұмысының энергетикалық критерийін төмендетеді.



Сурет 1 – Электр пештеріне арналған көміртекті термиялық процесс арқылы ферросилиций мен кремнийдің әртүрлі маркаларының кесек шихтасында балқыту кезінде кремнийді алу дәрежесінің өзгеруі

Мысалы, [9, 99-102 б.] жұмысындағы есептеулер көрсеткендей, ФС65 ферросилицийін ФС75 маркасына балқыту кезінде қуаты 85,5 МВА электр пешін ауыстыру кезінде пештің энерготехнологиялық критерийі 0,3109-дан 0,2770-ке дейін төмендейді. Пештің қуаты 29 МВА болғанда және пештерді неғұрлым жоғары кремнийлі ферросилиций ФС75-ке ауыстырған кезде феррокорытпа пештің жұмысының энерготехнологиялық критерийі 0,2706 - дан 0,2411-ге дейін төмендейді [10].

Нәтижелер және талқылаулар

Бұл кремнийді алу дәрежесінің ғана емес, сонымен қатар қуат коэффициенті мен электрлік тиімділік сияқты балқытудың энергетикалық параметрлерінің нашарлауына байланысты. Сондықтан қуаты 29 МВА пештің жұмысының энерготехнологиялық өлшемдерінің шамалары ФС65 ферросилицийді балқыту кезінде де, ФС75 балқыту кезінде де қуаты 85,5 МВА типтік пештің осы параметрімен салыстырғанда төмендейді. Одан да күрделі жағдайларда ұқсас көміртекті термиялық процесс арқылы техникалық тазалықтағы кремнийді балқыту кезінде бірдей қуаттағы пештер жұмыс істейді. Бір бөліктен кремний алу төмен-орташа есеппен 70 %. Балқытудың кейбір арнайы технологиялық нұсқаларында күрделі шихта мен электр доғқалы пешінің арнайы тотықсыздандырғыштарын қолданған кезде кремнийді 84–86 % дейін алуға болады. Пештің қуаты 85,5 МВА

болғанда пештің жұмысының энерготехнологиялық критерийі әдетте 0,2122 деңгейінен аспайды.

Қорытынды

Жүргізілген ақпараттық талдау және жүргізілген бастапқы зерттеулер феррокорытпа пеші жұмысының энерготехнологиялық критерийі тұрғысынан параметрлер кешенінің ферросилицийді балқытудың көміртекті-термиялық процесіне әсері қарастырылды, оған мыналар кіреді: қорытпаға жетекші элементті алу, пештің жылу тиімділігін көрсетті.

Көміртекті термиялық процесс арқылы ферросилицийдің әртүрлі маркаларын алу кезінде қорытпаға жетекші элементті алуға әсер ететін факторлар талданды. Қорытпадағы кремнийдің жоғарылауымен жетекші элементтің алынуы төмендейтіні көрсетілген.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕРДІҢ ТІЗІМІ

1 **Маймур, Б. Н., Худяков, А. Ю., Петренко, В. И., Ващенко, С. В., Баюл, К. В.** Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода. [Текст]. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. // 2016. – № 1. – С. 74–82.

2 **Воробьёв, В. П.** Получение и применение карборундсодержащих углеродистых восстановителей в технологии кремния и ферросплавов // Сталь. – 2015. – № 6. – С. 22 – 25.

3 **Серафимова, Л. И., Кузнецов, В. А.** Обзор технологии брикетирования вторичных железосодержащих материалов / Сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков «Проблемы горного дела» г. Донецк, ДонНТУ, 8-9 апреля 2021 г. – С. 304–308.

4 **Fei Li, Zhibo Sun, Fengyun Yan.** The Agglomeration of Solid Wastes for Ferroalloy Production // Infacon XVI: International Ferro-Alloys Congress, Edited by A.N. Wærnes, G. Tranell, M. Tangstad, E. Ringdalen, and C. vanderEijk, Trondheim, 27–29 September 2021. – P. 1–7.

5 **Diaz, L., Julia, N., Amalric, A., Nussbaum, G., Bjelland, K. B.** Recycling of Mn-rich ore fines, dust and sludge briquettes in Mn alloys production // Infacon XVI: International Ferro-Alloys Congress, Edited by A.N. Wærnes, G. Tranell, M. Tangstad, E. Ringdalen, and C. van der Eijk, Trondheim, 27–29 September 2021. – P. 1–10.

6 **Шкирмонтов, А. П.** Восстановление кремния и переход его сплав при выплавке ферромарганца // Теоретические вопросы развития научной мысли в современном мире: Сборник статей II-ой Международной научно-практической конференции (29-30 апреля 2013 г.). – Часть 4. – Уфа: РИЦ БашГУ. – 2013. – С. 167–171.

7 **Шкирмонтов, А. П.** Влияние диаметра электродов на электросопротивление ванны ферросплавной печи. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 42–49.

8 **Folmo, G.** Furnace Management in Eramet Manganese During the 2009 Crisis. // Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress. – 6 – 9 June 2010: Infacon XII. – Helsinki, Finland. – 2010. – P. 521–530.

9 **Tangstad, M.** Pretreatment Unit in Ferromanganese Production. // Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress (31 May – 4 June 2015: Infacon XIV. – Kiev, Ukraine. – 2015. – P. 99–106.

10 **Jonker, A. P.** Implementation of Tenova Pre-Heating Technology at JSC Kazchrome. // Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress. 31 May – 4 June 2015: Infacon XIV. – Kiev, Ukraine. – 2015. – P. 99–106.

REFERENCES

1 **Maimur, B. N., Khudyakov, A. Yu., Petrenko, V. I., Vashchenko, S. V., Bayul, K. V.** Briketirovanie metallurgicheskogo sy`r`ya. Aktual`nost` i puti razvitiya metoda. [Briquetting of metallurgical raw materials. Relevance and ways of developing the method]. [Text]. Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. // 2016. – № 1. – P. 74–82.

2 **Vorobyov, V. P.** Poluchenie i primeneniye karborundsoderzhashchih uglerodistykh vosstanoviteley v tehnologii kremniya i ferrosplavov [Preparation and application of carborundum-containing carbonaceous reducing agents in silicon and ferroalloys technology] // Steel. – 2015. – № 6. – P. 22–25.

3 **Serafimova, L. I., Kuznetsov, V. A.** Obzor-tehnologii-briketirovaniya-vtorichnykh-zhelezosoderzhashchikh-materialov [Review of briquetting technology of secondary iron-containing materials] / Collection of scientific papers of the II International Forum of Students, postgraduates and young scientists-miners «Problems of mining» Donetsk, DonNTU, April 8-9, 2021. – P. 304–308.

4 **Fei Li, Zhibo Sun, Fengyun Yan.** The Agglomeration of Solid Wastes for Ferroalloy Production. // Infacon XVI: International Ferro-Alloys Congress, Edited by A.N. Wærnes, G. Tranell, M. Tangstad, E. Ringdalen, and C. vanderEijk SINTEF/NTNU/FFF, Trondheim, 27-29 September 2021. – P. 1–7.

5 **Diaz, L., Julia, N., Amalric, A., Nussbaum, G., Bjelland, K. B.** Recycling of Mn-rich ore fines, dust and sludge briquettes in Mn alloys production // Infacon XVI: International Ferro-Alloys Congress, Edited by A.N. Wærnes, G. Tranell, M. Tangstad, E. Ringdalen, and C. van der Eijk SINTEF/NTNU/FFF, Trondheim, 27-29 September 2021. – P. 1–10.

6 **Shkirmontov, A. P.** Vosstanovlenie-kremniya-i-perehod-ego-splav-pri-vyplavke-ferromanganca [Silicon reduction and its alloy transition during ferromanganese smelting] // Theoretical issues of the development of scientific thought in the modern world: A collection of articles of the II-th International Scientific and Practical Conference (April 29-30, 2013). – Part 4. – Ufa: RIC Bashgu. – 2013. – P. 167–171.

7 **Shkirmontov, A. P.** The effect of electrode diameter on the electrical resistance of a ferroalloy furnace bath [The effect of electrode diameter on the electrical resistance

of a ferroalloy furnace bath]. // Electrical equipment: operation and repair. – 2011. – № 4. – P. 42–49.

8 **Folmo, G.** Furnace Management in Eramet Manganese During the 2009 Crisis // Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress. – 6 – 9 June 2010: Infacon XII. – Helsinki, Finland. – 2010. – P. 521–530.

9 **Tangstad, M.** Pretreatment Unit in Ferromanganese Production // Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress (31 May – 4 June 2015: Infacon XIV. – Kiev, Ukraine. – 2015. – P. 99–106.

10 **Jonker, A. P.** Implementation of Tenova Pre-Heating Technology at JSC Kazchrome // Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress. 31 May – 4 June 2015: Infacon XIV. – Kiev, Ukraine. – 2015. – P. 99 – 106.

12.06.24 ж. баспаға түсті.

19.09.24 ж. түзетулерімен түсті.

14.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**Н. М. Рамазанов¹, Б. Б. Саркенов²*

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда

Поступило в редакцию 12.06.24.

Поступило с исправлениями 19.09.24.

Принято в печать 14.11.2024.

ВЫПЛАВКА ФЕРРОСИЛИЦИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ФЕРРОСПЛАВОВ

В данной статье предложен энерготехнологический критерий для оценки эффективности работы ферросплавной электропечи. Его физическая сущность заключается в том, что с учетом теплопотерь и степени извлечения ведущего элемента в сплав, он определяет долю энергии, получаемой от источника тока, полезной части которой является углеродно-термический процесс восстановления руды производства ферросплавов (ферросилиций, феррохром, ферромарганец).

На примере получения различных марок ферросилиция представлены результаты анализа параметров плавки ферросплавов в электрических печах углеродным термическим процессом с использованием энерготехнологических критериев работы ферросплавной печи. Показано, что с увеличением значений энерготехнологического критерия печи ферросплава удельный расход электроэнергии на 1 тонну сплава уменьшается. Для электропечи средней мощности, плавящей 75% ферросилиция, значения энерготехнологического критерия ферросплавной печи соответствуют диапазону от 0,300 до 0,314. При этом удельный расход электроэнергии составляет от 9,0 до 8,6 МВт•ч/т сплава. Удовлетворительным, но более эффективным вариантом работы печи является диапазон значений энерготехнологических измерений от 0,272 до 0,293, при котором удельный расход электроэнергии варьируется от 9,8 до 9,2 МВт•ч/т. Такую комплексную величину, как энерготехнологическое измерение, можно

рассматривать как основной элемент энергетического и технологического аудита ферросплавного печного агрегата, а также использовать для определения эффективных режимов работы печей, анализа применения различных видов шихтовых материалов (рудного сырья, восстановителей углерода) и инновационных технологий плавки

Ключевые слова: производство ферросплавов; электрическая печь из ферросплавов; углеродный термический процесс; получение кремния; тепловая эффективность; активная мощность; энергетический и технологический аудит.

***N. M. Ramazanov¹, B. B. Sarkenov²**

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,

Republic of Kazakhstan, Karaganda

Received 12.06.24.

Received in revised form 19.19.24.

Accepted for publication 14.11.24.

FERROSILICON SMELTING FROM THE POINT OF VIEW OF AN ENERGY-TECHNOLOGICAL CRITERION FOR THE OPERATION OF AN ELECTRIC FURNACE OF FERROALLOYS

This article proposes an energy-technological criterion for evaluating the efficiency of a ferroalloy electric furnace. Its physical essence lies in the fact that, taking into account heat loss and the degree of extraction of the leading element into the alloy, it determines the proportion of energy received from the current source, the useful part of which is the carbon-thermal ore reduction process of ferroalloy production (ferrosilicon, ferrochrome, ferromanganese).

Using the example of obtaining various grades of ferrosilicon, the results of analyzing the parameters of melting ferroalloys in electric furnaces by a carbon thermal process using energy-technological criteria for the operation of a ferroalloy furnace are presented. It is shown that with an increase in the values of the energy-technological criterion of the ferroalloy furnace, the specific energy consumption per 1 ton of alloy decreases. For an electric furnace of medium power melting 75% ferrosilicon, the values of the energy technology criterion of the ferroalloy furnace correspond to the range from 0.300 to 0.314. At the same time, the specific power consumption ranges from 9.0 to 8.6 MWh/ton of alloy. A satisfactory, but more efficient version of the furnace operation is the range of energy technology measurements from 0.272 to 0.293, at which the specific power consumption varies from 9.8 to 9.2 MWh/t. Such a complex value as an energy technological measurement can be considered as the main element of the energy and technological audit of a ferroalloy furnace unit, as well as used to determine the effective operating modes of furnaces, analyze the use of various types of charge materials (ore raw materials, carbon reductants) and innovative melting technologies

Keywords: ferroalloy production; electric furnace made of ferroalloys; carbon thermal process; silicon production; thermal efficiency; active power; energy and technological audit.

КӨЛІК

MPNТИ 73.34.17

DOI

Р. Ю. Зарипов

Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1222-4322>e-mail: ramis.zaripov@mail.ru**РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УБОРКИ ВОДОЕМОВ**

В статье отражены проблемы, связанные с загрязнением водных ресурсов Республики Казахстан твердыми бытовыми отходами. Преимущественно пластиком. Автором проведена научно-исследовательская работа в рамках государственного финансирования по программе «Тәуелсіздік ұрпақтары». Реализация проекта осуществлялась на территории НАО «Торайгыров университет». Работа предполагает разработку устройства по уборке мусора с водоемов на базе понтонного судна с электроприводом и солнечными панелями. Использование судна с электроприводом позволит повысить эффективность уборки береговых зон водоемов, а также их чистоту.

Целью работы является разработка и изготовление опытного образца понтонного судна с оборудованием для очистки водоемов от мусора и водорослей, с электродвигателем и солнечными панелями питания, имеющего доступ к водоемам, находящимся в природоохранных зонах, с последующей коммерциализацией. Допуск к водоемам природоохранных зон имеет конкурентное преимущество, так как применение энергетических установок на традиционных топливах на данных территориях запрещено. Солнечные панели питания позволяют использовать комплекс непрерывно без подзарядки от сети. Приведен анализ аналогов разрабатываемого судна, представлены компоновочные схемы, описаны особенности конструкции, представлены статистические данные о количестве твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: понтонное судно, отходы, уборка водоемов, электродвигатель, земснаряд, солнечные панели.

Введение

«Основными острыми экологическими проблемами остаются: качество атмосферного воздуха, загрязнение поверхностных вод, заболочивание водоемов из-за высокой растительности, несовершенная система управления отходам. Загрязнение водоемов твердыми бытовыми отходами непрерывно растет.

В 2021 году Президент Республики Казахстан Касым-Жомарт Токаев учредил государственный грант «Тәуелсіздік ұрпақтары» для молодых людей, реализующих проекты в различных сферах, таких как наука, медиа, общественное развитие, бизнес [1]. В рамках данного гранта автор получил финансирование

на сумму три миллиона тенге от Министерства информации и общественного развития. Данные средства предоставлены с целевым назначением, а именно, закупка оборудования и материалов, разработка прототипа мобильного комплекса для уборки водоемов. Срок реализации проекта – один год.

Материалы и методы

Целью проекта является научная разработка и последующая коммерциализация понтонного судна с электроприводом для очистки водоемов от твердых бытовых отходов и водорослей.

Задачи проекта:

- Разработка конвейерного устройства для очистки прибрежных зон водоемов на базе понтонного судна;
- Разработка энергосистемы устройства с электроприводом;
- Сборка и испытание опытного образца;
- Организация производства транспортных средств для уборки водоемов.

Реализация проекта осуществляется на базе производственных и учебных мастерских НАО «Торайгыров университет».

В работе [4] представлена концепция робота-уборщика океана/водоема, который пытается классифицировать отходы с помощью камеры с пользовательской моделью машинного обучения и соответствующим образом разделять с помощью сепараторов, собирая их в прикрепленную корзину, которая может быть переработана на базовой станции. Солнечная панель обеспечивает робота энергией. Данный робот-уборщик предназначен для мелких водоемов, имеет ряд ограничений, но при этом жизнеспособен.

В статье [5] учеными Индии разрабатывается дистанционно управляемое устройство для сбора мусора с водоема. Робот оснащен конвейерным устройством, но количество собираемого мусора ограничено малым объемом сборочного контейнера.

Во время посещения ежегодной международной выставки по машиностроению и металлообработке Kazakhstan Machinery Fair2023 [6] в городе Астана автором проведен анализ компаний, представляющих оборудование для уборки водоемов. В частности, проведены переговоры с представителями компании DragFlow, которое выпускает судна и земснаряды для уборки водоемов от мусора [7]. Земснаряды разработаны таким образом, чтобы им способен управлять оператор с минимальным опытом работы с данным оборудованием. Мобильный земснаряд компании DragFlow это решение проблем эксплуатации оборудования для очистки малых водоемов. Транспортировка и сборка мобильных земснарядов DragFlow не занимает много времени и усилий. Модульный корпус позволяет осуществлять простую транспортировку земснаряда на грузовых автомобилях, либо в контейнерах. Однако стоимость такого оборудования превышает 20 тысяч евро.

Другим аналогом является земснаряд-амфибия фирмы Watermaster (рисунок 1), который справляется с задачами, которые обычно решаются с помощью нескольких отдельных машин. Благодаря своему универсальному набору

заменяемых рабочих приспособлений, Watermaster может выполнять все работы на мелководье от сухого грунта до глубины шести метров.

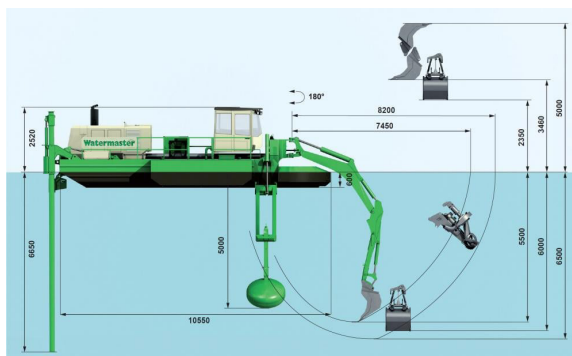


Рисунок 1 – Земснаряд-амфибия Watermaster

Основном вопросом при создании подобных комплексов является обеспечение автономности, то есть энергообеспечения судна для движения и работы линии сборки мусора только с помощью энергии, получаемой от солнечных панелей [8-12]. Данный вопрос рассматриваем с помощью анализа математической модели комплекса, которая будет учитывать основные аспекты эксплуатации маломерного судна, использующего нетиповое электрическое оборудование и условно разделена на проектный, экологический, экономический уровни. В данной работе рассмотрим проектный этап.

Разделим задачу на несколько этапов. Первый этап – определение элементов и массово-габаритных характеристик мобильного комплекса и применяемого оборудования, обеспечивающего реализацию электрической энергии для обеспечения питания лодочного электромотора, а также привода рабочего конвейера. Второй этап – определение эксплуатационных режимов работы мобильного комплекса. Третий этап – компоновка мобильного комплекса для обеспечения работы, размещения оборудования, элементов управления, размещения экипажа и обеспечения безопасности.

Если полученные характеристики изменяют массовые и габаритные характеристики мобильного комплекса в целом, то данные корректируются и на их основе рассчитываются экономические показатели [13–16].

Выражение (1) отражает требуемую мощность, габаритные характеристики и возможность размещения основного оборудования лодочного электромотора и сборочной системы маломерного судна. Выражение отражает требования к достаточной емкости аккумуляторов и их количеству, параметры размещения и подключения фотоэлектрических панелей и комплекта мусоросборного оборудования в корпусе судна.

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{бат}} &\geq \frac{N(v, P_e, t, \eta_p, \eta_m, \eta_{\text{п}})}{U_{\text{бат}}} - (C_{\text{сб}}(L, B) + \Omega) \\ n_{\text{эл}} &\geq n_1^{\text{эл}}(U_{\text{бат}}; C_{\text{бат}}) + n_2^{\text{эл}}(U_{\text{бат}}; C_{\text{бат}}) \\ S_{\text{сб}}^{\text{эл}}(L, B) &\leq S_{\text{SD}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $C_{\text{бат}}$ – общая емкость аккумулятора, Ач;
 P_e – потребляемая мощность лодочного электромотора;
 η_p – КПД редуктора лодочного мотора;
 $\eta_{\text{в}}$ – КПД винта;
 $\eta_{\text{п}}$ – КПД мотор-редуктора конвейерной линии;
 $U_{\text{бат}}$ – напряжение основной электрической сети, В;
 $C_{\text{бат}}$ – емкость фотоэлектрических панелей;
 $C_{\text{сб}}(L, B)$ – емкость фотоэлектрических панелей, Ач;
 Ω – это общая емкость, получаемая при подзарядке во время стоянки маломерного судна;

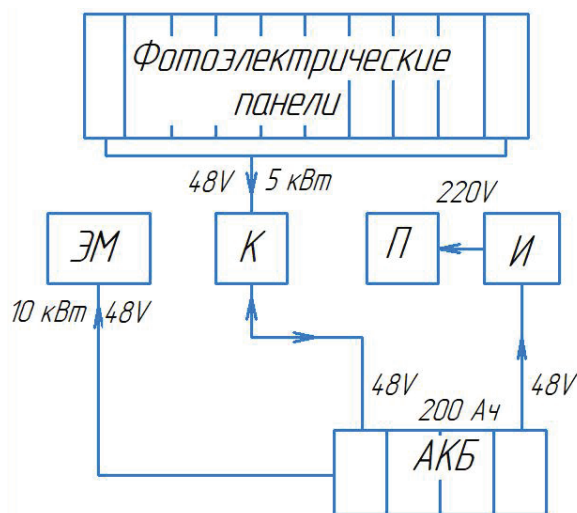
$n_{\text{эл}}$ – количество панелей, обеспечивающих необходимое напряжение и мощность для движения комплекса с заданной скоростью и работы конвейерной линии сбора мусора;

$n_1^{\text{эл}}$ – количество последовательно соединенных панелей;

$n_2^{\text{эл}}$ – количество параллельно соединенных панелей;

$S_{\text{сб}}^{\text{эл}}$ – общая площадь солнечных панелей;

S_{SD} – площадь крыши для размещения фотоэлектрических панелей;



ЭМ – лодочный электромотор; К – контроллер солнечного заряда; АКБ – аккумуляторная батарея; П – привод конвейера; И – инвертор;

Рисунок 2 – Структурная схема работы мобильного комплекса

На рисунке 2 показана структурная схема энергосистемы разрабатываемого комплекса. Накопление и передача энергии осуществляется с помощью блока аккумуляторов, получающего электроэнергию от фотоэлементов солнечных панелей, передающего энергию для питания лодочного электромотора, а также к инвертору солнечного заряда, преобразующего ее для обеспечения питанием мотор-редуктора привода конвейерной ленты.

Рассмотрим параметры сборочной конвейерной ленты.

Расчетная производительность конвейера найдем по формуле

$$Q_P = Q \frac{k_H}{k_B}, \quad (2)$$

где $k_H = 1,1-1,2$ – коэффициент неравномерности подачи мусора на конвейер, $k_B = 0,8-0,95$ – коэффициент использования машины во времени.

Требуемую ширину ленты (м) получаем из выражения

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{Q_P}{k_{\Pi} \vartheta \gamma k_B}} + 0,05 \right), \quad (3)$$

где k_{Π} – коэффициент площади поперечного сечения груза на ленте,

k_B – коэффициент уменьшения площади поперечного сечения груза на конвейере.

ϑ – скорость ленты, м/с;

γ – угол наклона ленты.

В данном случае грузом является неоднородный пластиковый мусор. Площадь поперечного сечения берем исходя из максимальной вместимости ленты.

Расчетную толщину ленты определяют по формуле

$$\delta_L = i_p \cdot \delta_{\Pi} + \delta_1 + \delta_2, \quad (4)$$

где i_p и δ_{Π} – число прокладок и расчетная толщина одной прокладки, δ_1 и δ_2 – толщина рабочей и нерабочей обкладок, мм.

Объемная производительность конвейера

$$V_M = 3,6 \frac{i_K}{t_{\Pi}} \vartheta, \quad \frac{M^3}{ч}, \quad (5)$$

где i_K – заданная производительность, м³/ч;

t_{Π} – расстояние между роликами.

Заданная производительность конвейера обеспечивается при условии

$$i_k \geq \frac{V_M \cdot t_{\Pi}}{3,6\vartheta}, \quad (6)$$

где t_{Π} – расстояние между роликами

V_M – объемная производительность конвейерной ленты

Результаты и обсуждение

Автономный экотримаран для уборки водоемов от мусора и водорослей (рисунок 3) представляет собой разборное маломерное судно с тремя монолитными плавучими элементами 1, металлической рамой с крышей 2, на которой закреплены солнечные панели 3, лодочного электромотора 4 с пультом дистанционного управления 5, снабженный конвейерным устройством 6, электрическим мотор-редуктором 7 для сбора и перемещения мусора из воды в накопительный сеточный бункер 8. Конвейерная линия имеет транспортное и рабочее положение, угол опускания линии регулируется с помощью винтовой передачи 9.

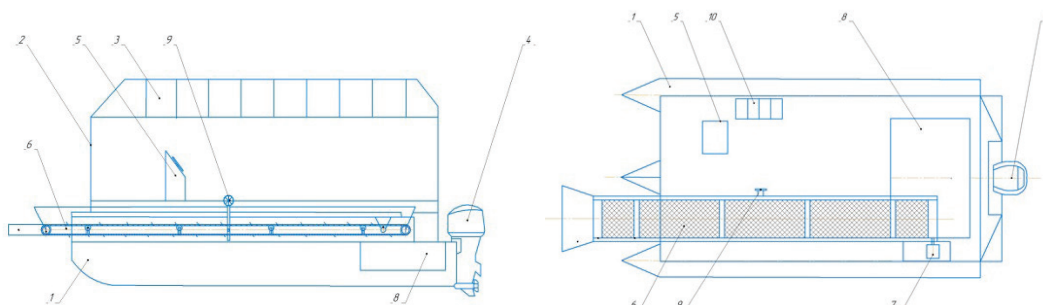


Рисунок 3 – Мобильный комплекс

Отличительной особенностью экотримарана является экологичность судна за счет отсутствия выбросов лодочного мотора и рабочих агрегатов, использование солнечных панелей в качестве источника энергии, что позволяет использовать судно в течении дня, а также применение монолитных плавучих элементов, состоящих из полистирольных блоков, покрытых стекловолокном, сохраняющих плавучесть судна в случае повреждений, не подверженных гниению и коррозии и не наносящих ущерб окружающей среде.

По данному проекту получено два патента на полезную модель. Понтон, обеспечивающий плавучесть судна, представляет собой пенополистирольные блоки 1 (Рисунок 4), имеющие продольные углубления 2 в средней части для закладки каркаса из металлической профильной трубы. Блоки стягиваются между собой, образуя монолитный понтон. Пенополистирольные блоки покрываются стекловолокном и пропитываются эпоксидной смолой. Форма понтона имеет усеченные носовую и нижнюю части для меньшего сопротивления воды при движении. Металлический каркас необходим для обеспечения соединения понтонов с рамой судна, повышения устойчивости судна. Металлический каркас закладывается в полости, предварительно вырезанной в пенополистирольных

блоках, имеет выступающие в верхней части понтона элементы с отверстиями для болтовых либо сварных соединений с элементами рамы.

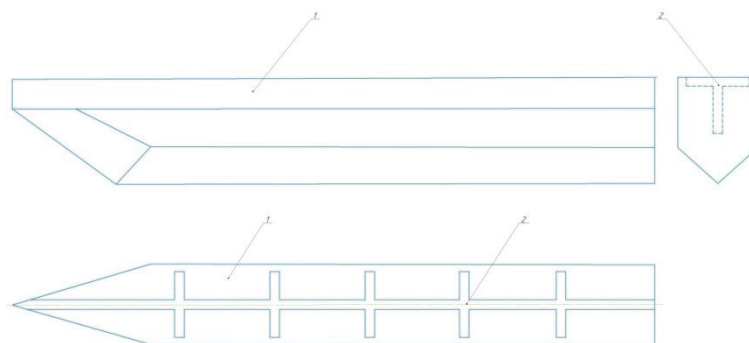


Рисунок 4 – Понтон

Испытания опытного образца мобильного комплекса производились на реке Иртыш. Внешний вид комплекса представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Общий вид опытного образца мобильного комплекса



Рисунок 6 – Диаграмма изменения напряжения

В ходе испытания в течении светового дня производились измерения напряжения в сети, каждое из которых отмечены контрольными точками. В точке 1 (рисунок 6) производится запуск лодочного электромотора и конвейерной линии при полном заряде аккумуляторов. В точках 1-6 наблюдалось падение напряжения до 37 В, в точке 7 подключены солнечные панели, как видно на графике, наблюдается рост напряжения до полного заряда с незначительными колебаниями.

Выводы

Загрязнение водоемов твердыми бытовыми отходами является весомой проблемой в сфере защиты окружающей среды.

Целью научно-исследовательской и опытно-конструкторской разработки, описанной в данной статье, является проектирование и изготовление опытного образца понтонного судна с оборудованием для очистки водоемов от мусора и водорослей, с электродвигателем и солнечными панелями питания, имеющего доступ к водоемам, находящимся в природоохранных зонах, с последующей коммерциализацией.

В ходе работы над проектом собрана рама мобильного комплекса для уборки водоемов, подобраны элементы управления энергоснабжением, установлена связь между зарядом солнечной энергии и потреблением, параметры конвейерной линии, опытный образец испытан в реальных условиях.

При размещении десяти солнечных панелей общей мощностью 4 кВт энергоснабжение комплекса позволяет производить работу по очистке водоема в течении светового дня.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Официальный сайт Министерства информации и общественного развития Республики Казахстан: информационный портал. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: [http:// www.gov.kz](http://www.gov.kz). 2023. – 1 с.

2 Официальный информационный ресурс Премьер-министра Республики Казахстан: информационный портал. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://primeminister.kz/ru/nationalprojects/nacionalnyy-proekt-zelyonyy-kazahstan>. 2023. – 1 с.

3 **Adarsh J. K. et al.** Journal Physical.: Conference Series, 2115, 2021.

4 **Chikhalkar S., Kamble M., Ubalel A., Loli V., Kapre P., Tale V.** Design and Fabrication of River Water Cleaning System International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT) Volume 2, Issue 2, May 2022

5 Официальный сайт выставки [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://www.kmfexpo.kz>. 2023. – 1 с.

6 Официальный сайт компании DragFlow [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: [http:// www.dragflow.net](http://www.dragflow.net). 2023. – 1 с.

7 **Spagnolo G. S., Papalillo D., Martocchia A., Makary G.** Solar-Electric Boat Journal of Transportation Technologies, 2012, 2, P. 144–149. – <https://doi.org/10.4236/jtts.2012.22015>.

8 **Georgakis D., Papathanassiou S., Hatziaargyriou N., Engler A., and Hardt C.** «Operation of a prototype microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces», in Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC '04), Vol. 4. – P. 2521–2526. – June 2004.

9 **Peša, T.; Krcum, M.; Kero, G.; Šoda, J.** Retrofitting Vessel with Solar and Wind Renewable Energy Sources as an Example of the Croatia Study-Case. J. Mar. Sci. Eng. 2022. – 10. – P. 1471. – <https://doi.org/10.3390/jmse10101471>.

10 **Zaripov, R., Tkachuk, A., Miller, S., Zigangirov, S., Gavrilovs, P.** On the Development of Electric Vehicles for the Tourism Industry Transport Means - Proceedings of the International Conference. – 2022, 2022-October, P. 911–915.

11 **Behrouzian E., Tabesh A., Bahrainian F., and Zamani A.** «Power electronics for photovoltaic energy system of an oceanographic buoy» in Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC '11), P. 1–4, April 2011.

12 **Hoppmann J., Huenteler J., Girod B.** Compulsive policymaking—the evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power. Research Policy. – Vol. 43. – № 8. – P. 1422–1441. – 2014.

13 **Mandal P., Madhira S. T. S., Haque A. U.** Forecasting Power Output of Solar Photovoltaic System Using Wavelet Transform and Artificial Intelligence Techniques. Procedia Computer Science, Vol. 12. – № 1. – P. 332–337. – 2012.

14 **Tiwari, R. V., Maheshwari, A., Srivastava, M. C., & Sharma, A.** Design and fabrication of project on water bodies cleaning robot. International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR), 8(3), P. 15–17.

15 **Praneeth, K., James, T., & Sridhar, S.** Design of novel ultrafiltration systems based on robust polyphenylsulfone hollow fiber membranes for treatment of contaminated surface water. Chemical Engineering Journal, № 248. P. 297–306.

16 **Zaripov R., Gavrilovs P., Mukanov R., Mazdubay A., Zhekenov A.** Development and research of a small electric-powered vessel using photovoltaic cells/ Наука и техника Казахстана № 3, 2023. – С. 266–275.

17 **Behrouzian E., Tabesh A., Bahrainian F., and Zamanin A.** «Power electronics for photovoltaic energy system of an oceanographic buoy» in Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC '11), P. 1–4, April 2011.

18. Пат. №7368 Республика Казахстан, В63В 35/34 (2006.01) Понтон для маломерных судов / Зарипов Р. Ю., Муканов Р. Б., Миллер С. А., Зигангиров С. А., Маздубай А. В., Ткачук А. А., Бегентаев М. М.; заявитель и патентообладатель Зарипов Р. Ю. – № 2022/0447.2; заявл. 20.05.2022; опубл. 19.08.2022, Бюл. № 33. – 2 с.

19 Пат. №7331 Республика Казахстан, В62D 3/00 (2006.01) Мобильный тагово-рулевой модуль / Зарипов Р. Ю., Муканов Р. Б., Миллер С. А., Зигангиров С. А., Маздубай А. В., Ткачук А. А. заявитель и патентообладатель Зарипов Р.Ю. – № 2022/0448.2; заявл. 20.05.2022; опубл. 26.05.2023, Бюл. № 21. – 2 с.

20 **Luongo S., Di Vito V., Fasano G., Accardo D., Forlenza L. and Moccia A.** «Automatic Collision Avoidance System: Design, development and flight tests». – 2011. – IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, 2011. – P. 1–21. – <https://doi.org/10.1109/DASC.2011.6096245>.

REFERENCES

1 Oficial'nyj sajt Ministerstva informacii i obshchestvennogo razvitiya Respubliki Kazahstan: informacionnyj portal.[Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <http://www.gov.kz>, 2023. – 1 c.

2 Oficial'nyj informacionnyj resurs Prem'er-ministra Respubliki Kazahstan: informacionnyj portal. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <https://primeminister.kz/ru/nationalprojects/nacionalnyy-proekt-zelyonnyy-kazahstan> , 2023. – 1 c.

3 **Adarsh J. K. et al.** Journal Physical.: Conference Series, 2115, 2021

4 Chikhalkar S., Kamble M., Ubale A., Loli V., Kapre P., Tale V. Design and Fabrication of River Water Cleaning System International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT) Volume 2, Issue 2, May 2022

5 Oficial'nyj sajt vystavki [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <https://www.kmfexpo.kz>. – 2023. – 1 c.

6 Oficial'nyj sajt kompanii DragFlow [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <http://www.dragflow.net>, 2023. – 1 c.

7 **Spagnolo G. S., Papalillo D., Martocchia A., Makary G.** Solar-Electric Boat Journal of Transportation Technologies, 2012. – 2. – P. 144–149. – <https://doi.org/10.4236/jtts.2012.22015>.

8 **Georgakis D., Papathanassiou S., Hatziargyriou N., Engler A., and Hardt C.** «Operation of a prototype microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces» in Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC '04), Vol. 4. – P. 2521–2526. – June 2004.

9 **Peša, T.; Krcum, M.; Kero, G.; Šoda, J.** Retrofitting Vessel with Solar and Wind Renewable Energy Sources as an Example of the Croatia Study-Case. J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – 10. – P. 1471. – <https://doi.org/10.3390/jmse10101471>.

10 **Zaripov, R., Tkachuk, A., Miller, S., Zigangirov, S., Gavrilovs, P.** On the Development of Electric Vehicles for the Tourism Industry Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2022, 2022-October. – P. 911–915.

11 **Behrouzian E., Tabesh A., Bahrainian F., and Zamani A.** «Power electronics for photovoltaic energy system of an oceanographic buoy» in Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC '11), P. 1–4, April 2011.

12 **Hoppmann J., Huenteler J., Girod B.** Compulsive policymaking—the evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power. Research Policy, Vol. 43. – № 8, P. 1422–1441. – 2014.

13 **Mandal P., Madhira S. T. S., Haque A. U.** Forecasting Power Output of Solar Photovoltaic System Using Wavelet Transform and Artificial Intelligence Techniques. *Procedia Computer Science*, Vol. 12. – № 1. – P. 332–337. – 2012.

14 **Tiwari, R. V., Maheshwari, A., Srivastava, M. C., & Sharma, A.** Design and fabrication of project on water bodies cleaning robot. *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*, 8(3), P. 15–17.

15 **Praneeth, K., James, T., & Sridhar, S.** Design of novel ultrafiltration systems based on robust polyphenylsulfone hollow fiber membranes for treatment of contaminated surface water. *Chemical Engineering Journal*, № 248, P. 297–306.

16 **Zaripov R., Gavrilovs P., Mukanov R., Mazdubay A., Zhekenov A.** Development and research of a small electric-powered vessel using photovoltaic cells/ *Nauka i tekhnika Kazahstana* № 3. A. 2023. – P. 266–275.

17 **Behrouzian E., Tabesh A., Bahrainian F., and Zamanin A.** «Power electronics for photovoltaic energy system of an oceanographic buoy» in *Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC '11)*, P. 1–4, April 2011.

18 Pat. №7368 Respublika Kazahstan, B63B 35/34 (2006.01) Ponton dlya malomernykh sudov / Zaripov R. Y., Mukanov R. B., Miller S. A., Zigangirov S. A., Mazdubaj A. V., Tkachuk A. A., Begentaev M. M.; zayavitel' i patentoobladatel' Zaripov R. YU. – № 2022/0447.2; zayavl. 20.05.2022; opubl. 19.08.2022, Byul. № 33. – 2 p.

19 Pat. №7331 Respublika Kazahstan, B62D 3/00 (2006.01) Mobil'nyj tagovorulevoj modul' / Zaripov R. Y., Mukanov R. B., Miller S. A., Zigangirov S. A., Mazdubaj A. V., Tkachuk A. A. zayavitel' i patentoobladatel' Zaripov R. Y. – № 2022/0448.2; zayavl. 20.05.2022; opubl. 26.05.2023, Byul. № 21. – 2 p.

20 **Luongo S., Di Vito V., Fasano G., Accardo D., Forlenza L. and Moccia A.** «Automatic Collision Avoidance System: Design, development and flight tests,» 2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, 2011. – P. 1–21. – <https://doi.org/10.1109/DASC.2011.6096245>.

Поступило в редакцию 28.05.23.

Поступило с исправлениями 10.10.24.

Принято в печать 12.10.2024.

Р. Ю. Зарипов

Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы

28.05.23 ж. баспаға түсті.

10.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

12.10.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

СУ АЙДЫНДАРЫН ЖИНАУҒА АРНАЛҒАН ЖЫЛЖЫМАЛЫ КЕШЕНДІ ӘЗІРЛЕУ

Мақалада Қазақстан Республикасының Су ресурстарының қатты тұрмыстық қалдықтармен ластануына байланысты проблемалар көрсетілген. Негізінен пластик. Автор «Тәуелсіздік ұрпақтары» бағдарламасы бойынша мемлекеттік қаржыландыру аясында ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізеді. Жобаны іске асыру «Торайғыров университеті» КЕАҚ аумағында жүзеге асырылады. Жұмыс электр жетегі және күн панельдері бар Понтондық кеме негізінде су қоймаларынан қоқыстарды жинау құрылғысын әзірлеуді көздейді. Электр жетегі бар кемені пайдалану су айдындарының жағалау аймақтарын тазалаудың тиімділігін, сондай-ақ олардың тазалығын арттыруға мүмкіндік береді.

Жұмыстың мақсаты су айдындарын қоқыстардан және балдырлардан тазартуға арналған жабдықтары бар, кейіннен коммерцияландыра отырып, табиғатты қорғау аймақтарындағы су айдындарына қол жеткізе алатын электр қозғалтқышы мен күн қоректендіру панельдері бар Понтондық кеменің тәжірибелік үлгісін әзірлеу және дайындау болып табылады. Табиғатты қорғау аймақтарының су айдындарына кіруге бәсекелестік артықшылығы бар, өйткені осы аумақтарда дәстүрлі отындарда Энергетикалық қондырғыларды қолдануға тыйым салынады. Күн батареялары кешенді желіден бір зарядта үздіксіз пайдалануға мүмкіндік береді. Әзірленіп жатқан кеменің аналогтарына талдау жасалды, орналасу схемалары ұсынылды, дизайн ерекшеліктері сипатталды, қатты тұрмыстық қалдықтардың мөлшері туралы статистикалық мәліметтер ұсынылды.

Кілтті сөздер: Понтондық кеме, қалдықтар, су айдындарын тазарту, электр қозғалтқышы, снаряд, күн панельдері.

R. Y. Zaripov

Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

Received 28.05.24.

Received in revised form 10.10.23.

Accepted for publication 12.10.24.

DEVELOPMENT OF A MOBILE COMPLEX FOR CLEANING RESERVOIRS

The article reflects the problems associated with the pollution of water resources of the Republic of Kazakhstan by solid household waste. Mainly plastic. The author conducts research work within the framework of state funding under the program «Tauelsizdik urpaktary». The project is being implemented on the territory of the NAO «Toraighyrov University». The work involves the development of a device for cleaning garbage from reservoirs on the basis of a pontoon vessel with an electric drive and solar panels. The use of an electrically powered vessel will increase the efficiency of cleaning coastal areas of reservoirs, as well as their cleanliness.

The aim of the work is to develop and manufacture a prototype of a pontoon vessel with equipment for cleaning reservoirs from garbage and algae, with an electric motor and solar power panels, having access to reservoirs located in protected areas, with subsequent commercialization. Admission to the reservoirs of nature protection zones has a competitive advantage, since the use of power plants on traditional fuels in these territories is prohibited. Solar power panels allow you to use the complex continuously without recharging from the mains. The analysis of analogues of the developed vessel is given, layout schemes are presented, design features are described, statistical data on the amount of solid household waste are presented.

Keywords: pontoon vessel, waste, cleaning of reservoirs, electric motor, dredger, solar panels.

SRSTI 73.00.00

DOI

***N. K. Karbaev¹, I. Menendez-Pidal², T. K. Balgabekov³,
B. T. Orazaliev⁴, Y. N. Saidalin⁵**

^{1,3,4,5}S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,

Republic of Kazakhstan, Astana

²Polytechnic University of Madrid, Spain, Madrid

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7111-5719>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7053-1101>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9184-0897>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8525-236X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2364-1372>

*e-mail: erlan_saidalin@mail.ru

ABOUT INFLUENCE OF REVOLTING INFLUENCES ON FLUCTUATIONS OF AUTOMATICALLY MOVING CONCRETE AMALGAMATOR

This article explores the dynamic behavior of self-propelled concrete mixers within the longitudinal plane, focusing specifically on the effects of road micro-profiles, represented as a one-dimensional function $h(x)$. The study examines a stationary road micro-profile that remains consistent across different road sections and applies Fourier series to analytically model periodic micro-profiles with arbitrary shapes and irregularities. Through this approach, the research delivers a detailed analysis of how road surface variations impact vehicle dynamics, with particular attention to the fluctuations experienced by self-propelled concrete mixers. A significant observation is the pronounced non-uniformity in motion, particularly when these mixers operate on rough surfaces covered by hard coatings. The findings emphasize the necessity of precise road irregularity modeling to enhance the understanding of the operational conditions influencing self-propelled concrete mixers. In addition, the study offers valuable insights for optimizing vehicle design, improving suspension systems, and ensuring better performance, durability, and efficiency under uneven and challenging road conditions.

Keywords: self-propelled, mixers, micro-profile, Fourier series, road irregularities.

Introduction

Vibration analysis of suspension bridge systems (SBS) plays a crucial role in ensuring stability and effective performance. Among various aspects, longitudinal plane vibrations are particularly impactful and can be represented as a one-dimensional function, $h(x)$, simplifying the analysis process [1, 2]. For more complex verification calculations, considering the random function $h(x, y)$ is advantageous, especially when simulating SBS vibrations on computational platforms [3]. This article focuses on the derivation and implications of the governing differential equations, which describe the oscillatory behavior of the SBS, with specific attention to the conditions under which

these equations simplify and the resulting vibration patterns. Additionally, the use of Fourier series in modeling periodic profiles and perturbing functions is explored to understand the amplitude and phase spectra of SBS oscillations.

Materials and Methods

The perturbing function defines the right-hand side of the systems of differential equations:

$$\begin{cases}
 y_1'' + e_1 y_2'' + 2R_1 y_1' + w_1^2 y_1 - 2R_1 x_1' - w_1^2 x_1 = 0; \\
 x_1'' + \left(\frac{2R_1}{\epsilon_1}\right) x_1' + \left(\frac{w_1^2}{\epsilon_1} + w_{k1}^2\right) x_1 - \left(\frac{2R_1}{\epsilon_1}\right) y_1' - \frac{w_1^2}{\epsilon_1} y_1 = w_{k1}^2 h_1; \\
 y_2'' + e_2 y_1'' + 2R_2 y_2' + w_2^2 y_2 - 2R_2 x_2' - w_2^2 x_2 = 0 \\
 x_2'' + \left(\frac{2R_2}{\epsilon_2}\right) x_2' + \left(\frac{w_2^2}{\epsilon_2} + w_{k2}^2\right) x_2 - \left(\frac{2R_2}{\epsilon_2}\right) y_2' - \frac{w_2^2}{\epsilon_2} y_2 = w_{k2}^2 h_2;
 \end{cases} \quad (1)$$

In this system of equations, the constant coupling coefficients of the vibrations of the masses above the front and rear suspensions are determined from the following expressions:

$$\begin{cases}
 \ell_1 = m_3/m_1 = (1 - \mathcal{E})/[(b/a) - \mathcal{E}] \\
 \ell_2 = m_3/m_2 = (1 - \mathcal{E})/[(b/a) - \mathcal{E}]
 \end{cases} \quad (2)$$

where $\mathcal{E} = \epsilon^2/ab$ – coefficient of distribution of sprung mass;

a and b – distance from centre of gravity of SBS, to front and rear axles, respectively;

$m_1 = m(\epsilon^2 + b^2)/(a + b)^2$, $m_2 = m(\epsilon^2 + a^2)/(a + b)^2$ – reduced sprung masses located above front and rear suspensions, $m_3 = m(ab - \epsilon^2)/(a + b)^2$ – conditional sprung mass, characterising interrelation of oscillations of masses located above front and rear suspensions;

$w_{1,2} = \sqrt{Cp_{1,2}/m_{1,2}}$ – natural frequency of oscillations of sprung masses on springs;

$w_{k,1,2} = \sqrt{Cp_{ш,1,2}/m'_{1,2}}$ – natural frequency of oscillations of unsprung masses on machines;

$\epsilon_{1,2} = m_{1,2}/m_{1,2}$ – coefficients of front and rear unsprung masses;

$R_{1,2} = \epsilon_{1,2}/2 m_{1,2}$ – reduced coefficients of inelastic resistance of suspension.

In case the coefficient of distribution of the sprung masses is equal to one, i.e. $\mathcal{E} = 1$, then the coupling coefficients ℓ_1 and ℓ_2 are equal to zero, and the system of equations decomposes into two independent systems of the form.

$$\begin{cases}
 y'' + 2ky' + w^2 y - 2Rx' - w^2 x = 0 \\
 x'' + (2R/\epsilon)x' + [(w^2/\epsilon)]x - (2R/\epsilon)y' - (w^2/\epsilon)y = w_x^2 h
 \end{cases} \quad (3)$$

The obtained systems of differential equations describe the oscillations of the front or rear part of the SBS [4]. Consequently, the equality $\mathcal{E}=1$ is a condition of independence of oscillations of the front and rear parts of the SBS.

Differential equations (2) and (3) characterise the vibration patterns of the SBS.

$$h = h_0[1 - \cos(2\pi/\ell_0)\ell] \tag{4}$$

Some studies recommend taking half of a sinusoid as the profile of a detached bump

$$h = 2h_0 \sin(\pi/\ell_0)\ell \tag{5}$$

Considering the cases of equilibrium of uniform motion on a road section of long $\ell_0 = 2\ell$ with constant speed

$$v = \ell_0/t_0 = \ell/t \tag{6}$$

graph of the perturbing function for time $t_0 = 2t$ can be obtained by proportional scaling of the argument of the micro profile function $h(\ell)$. The analytical expression of the micro profile function $h(\ell)$ should be obtained by substituting into the analytical expression of the micro profile function $h(\ell)$ the value of the argument represented by the equality.

$$\ell = vt \tag{7}$$

Substituting these values into formula (4) and (5), we obtain the following analytical expression for harmonic irregularities:

$$h = h_0[1 - \cos(2\pi v/\ell_0)t] = h_0(1 - \cos\omega t); \tag{8}$$

$$h = 2h_0 \sin(\pi v/\ell)t = 2h_0 \sin\omega t \tag{9}$$

where $\omega = 2\pi v/\ell_0 = \pi v/\ell$ is the frequency of change of perturbing forces.

For analytical expression of periodic profile with arbitrary shape of irregularities it is recommended [1] to use Fourier series. The function of the micro profile $h(\ell)$, defined on a limited segment of length 2ℓ , corresponding to the length of one period of change $h(\ell)$, analytical should be represented as a sum of trigonometric Fourier series consisting of an infinite set of harmonic components of functions. At zero mean of the function values $h(\ell)$ for any point ℓ , the Fourier series should be determined from the expression

$$h = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{n_{cos}} \cos\left(\frac{n\pi x}{l_0}\right) + a_{n_{sin}} \sin\left(\frac{n\pi x}{l_0}\right) \right] \tag{10}$$

where $n=1,2,3,\dots, \mathcal{V}_n = n/t = \mathcal{V}_n \mathcal{V}$ is the frequency of expansion of the perturbing function in Fourier series.

The Fourier coefficients w_{1n} and w_{2n} included in these dependences must be calculated using the formulas (10) and their value does not depend on the speed of the SBS movement along the road section [5]. The latter is explained by the fact that geometrically these coefficients represent the doubled average of the continuous functions $h \cos \omega_n \ell$, defined on the interval from $-\ell$ to $+\ell$. If the argument $\ell = \mathcal{V}t$ changes proportionally, the mean of these functions will not change, then the values of w_{1n} and w_{2n} in expressions (10) and (11) will be the same. Representing the Fourier series of the perturbing functions in a different form, i.e:

$$h = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mathcal{V}_n t y - \varphi_n \quad (11)$$

where $n=1,2,3,\dots, \varphi_n$ it can be established that at constant values of coefficients w_{1n} and w_{2n} amplitudes A_n and initial phase angles φ_n of the components of this series will not depend on the value of uniform speed of motion along this section. Consequently, the line, amplitude, and phase spectra of the Fourier series of the perturbing functions $h(t)$ will have the same ordinates as the analogous spectra of the micro-profile functions $h(\ell)$, if the numbers of n harmonic components of the Fourier series are laid off along the abscissa axis of these spectra [6]. However, the value of the frequency intervals between these ordinates of the spectra γ_1 will change proportionally to the SBS motion velocity

$$\gamma_1 = w/t = w\mathcal{V}/\ell = \gamma_1 \mathcal{V} \quad (12)$$

Consequently, the linear amplitude and phase spectra of the micro-profile functions should be considered as a special case of the corresponding spectra of the perturbing functions at unit velocity of motion, i.e., at velocity v numerically equal to unity.

For an arbitrary micro-profile expressed by the Fourier integral, the perturbing function can be represented in the following form:

$$h = \int_0^{\infty} A_{\omega} \cos(\mathcal{V}t + \varphi_{\omega}) d\mathcal{V} \quad (13)$$

which is the limit of the sum of the infinite series of harmonic summands of functions with elementary amplitudes $A_n = A_v dv$ frequencies γ of harmonic components of functions will differ from each other by a multiple of

$$dv = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega/t = v d\omega \quad (14)$$

And at $t > \infty$ have not discrete but continuously varying values from 0 to ∞ :

$$\omega = \mathcal{V}\omega \quad (15)$$

At unit speed of motion the frequencies ν will be numerically equal to the frequencies γ of the decomposition of the micro-profile functions. As the velocity of uniform VLS motion increases, the frequencies γ and intervals $d\gamma$ will increase proportionally to the VLS velocity.

The amplitude density of the perturbing function spectrum at \mathcal{V} is determined by the following dependence:

$$A_{\mathcal{V}} = A_n/d\nu = \sqrt{w_{1\nu}^2 + w_{2\nu}^2} = A_{\nu}/\nu \tag{16}$$

then integral Fourier coefficients will be respectively equal to

$$w_{1n} = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int_{-t}^{+t} h(t) \cos \nu t d\nu = \left(\frac{1}{\nu\pi}\right) \int_{-\ell}^{+\ell} h(\ell) \cos \nu \ell d\ell = \frac{w_{1\pi}}{\nu} \tag{17}$$

$$w_{2n} = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int_{-t}^{+t} h(t) \sin \nu t d\nu = \left(\frac{1}{\nu\pi}\right) \int_{-\ell}^{+\ell} h(\ell) \sin \nu \ell d\ell = \frac{w_{2\pi}}{\nu} \tag{18}$$

At unit velocity, the spectra (phase and amplitude densities) of the perturbing and micro-profile functions will numerically coincide, while at other velocities they will differ [6]. With increasing velocity, the ordinates of the amplitude density spectrum of the perturbing functions $A_{\nu}(\mathcal{V})$ will decrease, and the abscissas ν will increase in proportion to the magnitude of this velocity.

Considering the random function $h(\ell)$ ergodic and stationary, i.e. such that its averaging over one sufficiently long realisations is equivalent to averaging over separate realisations taken at different sites, and gives constant dispersion, then the density of the amplitude spectrum A_{ν} is related to the correlation function of the micro profile by the following relation

$$K_{\ell} = \lim_{\ell \rightarrow \infty} (1/\pi\ell) \int_0^{\infty} A_{\nu}^2 \cos \ell \nu d\nu = (1/\pi) \int_0^{\infty} C_m \cos(\ell \nu) d\nu, \tag{19}$$

where:

$$C_m = \lim_{\ell \rightarrow \infty} (A_{\nu}^2/\ell) = 2 \int_0^{\infty} K_{\ell} \cos(\nu \ell) d\ell \tag{20}$$

the so-called «energy spectrum» or spectral density of micro profile functions.

From formula (22), we can see that the energy spectrum of the micro profile ℓm can be determined by the Fourier transform of the correlation function of the micro profile. It is known that the area of the energy micro-profile :

$$h_c^2 = (1/\pi) \int_0^{\infty} C_m d\nu \tag{21}$$

Formulas (22) and (23) of the mutual coupling of K_{ℓ} and C_m allow us to use all known properties of Fourier transforms to analyse them.

Taking into account relations (18) and (22), the energy spectrum of the perturbing functions at uniform speeds should be determined according to the following dependence:

$$C_B = \lim_{t \rightarrow \infty} (A_v^2/t) = C_m/v \quad (22)$$

Consequently, the energy spectrum of the perturbing function varies with speed in the same way as the amplitude density A_v [watch formula (18)] [7]. At unit speed, when the length of the road section 2ℓ is numerically equal to the duration $2t$ of the SBS movement along this section, the values of the function $sh(\ell)$ and $h(t)$ with the same value of the arguments t and ℓ will be identically equal [8]. In this case, the amplitude density spectrum and the energy spectrum of the perturbing functions should be obtained by simply replacing the designations and dimensions of the corresponding micro-profile spectra.

When the velocity of uniform motion of the SBS changes, the coordinates of the points of the graphs of the spectra of the perturbing functions should change in such a way that their ordinates decrease and abscissas increase in proportion to the velocity value [9, 10]. In this case, the variance of the perturbing functions will be equal to the variance of the micro-profile functions, i.e.:

$$h_c^2 = (1/\pi) \int_0^\infty C_B dv = (1/\pi) \int_0^\infty C_M dv \quad (23)$$

and the limiting frequency of the energy spectrum of the perturbing function should be determined according to the following dependence:

$$\mathcal{V}_P = \mathcal{V}\mathcal{V}_P \quad (24)$$

The correlation function of the perturbation function is defined as follows:

$$K_\tau = \lim_{t \rightarrow \infty} (1/2t) \int_{-t}^{+t} h(t + \tau)h(t)dt \quad (25)$$

The analysis of formula (25) allows us to establish that the correlation function K_τ geometrically represents the average value of the continuous function $h(t + \tau)h(t)$ defined on the segment from $-t$ to $+t$.

At unit speed, the arguments τ and ℓ are numerically equal and, therefore, the correlation functions will coincide [7, 8]. As the SBS velocity increases, the function K_τ will narrow, and as the velocity decreases, it will stretch along the abscissa. In this case, the extent of the correlation between the heights of the perturbing functions will be determined by the equality:

$$\tau_a = \ell_0/v \quad (26)$$

Consequently, knowing the characteristics of the micro-profile functions, it is relatively easy to determine the corresponding characteristics of the perturbing functions for the case of uniform traffic on the road section, which should be considered in the calculations of SBS oscillations.

In this study, mathematical modeling methods were used to analyze the dynamics of SBS oscillations. Vibrations in the longitudinal plane were emphasized, allowing the road micro-profile to be treated as a one-dimensional function $h(x)$.

Solution Methods. Numerical solutions were obtained using Runge-Kutta methods for solving ordinary differential equations of the second order. Fourier series were applied for the perturbing functions, providing an analytical representation of the micro-profile.

The spectral characteristics of the perturbing functions were analyzed using Fourier transformations, enabling the determination of amplitude and phase spectra and their correlation with the road micro-profile.

Results and Discussion

Natural Frequencies and Vibration Characteristics

The natural frequencies of the sprung masses, expressed through the stiffnesses C_{p1} and C_{p2} , and masses m_1 and m_2 , were found to be $\omega_1 = \sqrt{\frac{C_{p1}}{m_1}}$ and $\omega_2 = \sqrt{\frac{C_{p2}}{m_2}}$. These

frequencies were directly dependent on suspension characteristics and resistance coefficients.

For $\varepsilon = 1$, the front and rear parts of the SBS oscillated independently, confirming the physical behavior of the system under uniform conditions.

For random and stationary functions, the spectral density A_v and correlation function K_l remained constant at unit speed. However, their scaling occurred with variations in speed, which was also reflected in the energy spectra.

The analysis confirmed that considering the micro-profile as a one-dimensional function is effective for analyzing SBS oscillations in the longitudinal plane during uniform motion. Although this simplifies the model, it effectively captures road irregularities' impact on suspension dynamics. For more accurate modeling on complex road surfaces, two-dimensional micro-profiles should be considered.

Fourier series proved highly effective in representing periodic perturbing functions, especially when analyzing harmonic components. However, in cases of random perturbations, computational costs might increase significantly. Future research could explore alternative methods such as wavelet transformations or stochastic models.

The results could be applied to optimizing vehicle suspensions to improve stability and comfort when driving on different types of road surfaces.

Conclusions

The oscillations in the longitudinal plane are decisive, which allows us to restrict further consideration of the microprofile as a one-dimensional function. It is recommended to use Fourier series to analytically express a periodic microprofile with an arbitrary shape of irregularities. The microprofile function, defined on a limited segment of length 2ℓ corresponding to the length of one period of change, should be represented analytically as a sum of trigonometric Fourier series consisting of an infinite set of harmonic component functions.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Dukalski, P., Będkowski, B., Parczewski, K., Wnek, H.** Dynamics of the vehicle rear suspension system with electric motors mounted in wheels [Text] // *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. – 2018. – № 21(1). – P. 125–136. – <https://doi.org/10.17531/ein.2019.1.14>.

2 **Svetlitsky, V. A.** Engineering Vibration Analysis. Worked Problems [Text]. – Berlin : Springer-Verlag, 2004. – P. 134–135. ISBN: 3540207821.

3 **Jonjo, E.** Modeling the Effect of Road Excitation on Vehicle Suspension System [Text] // *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*. – 2020. – № 5(1). – P. 19–28. – <https://doi.org/10.26776/ijemm.05.01.2020.04>.

4 **Talukdar, S., Mazumdar, A., Mullasseril, M., Kalita, K.** Mathematical Modeling in Vehicle Ride Dynamics [Text] // Conference: SAE Technical Papers. – 2012. – <https://doi.org/10.4271/2012-01-0056>.

5 ГОСТ 2.305–2008. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Изображения - виды, разрезы, сечения (с Поправкой) [Текст]. – Москва : Стандартинформ, 2009.

6 **Карбаев, Н. К., Абишев, К. К., Оразалиев, Б. Т., Шонтаев, Д.** К вопросу о влиянии волнистости дороги на колебания самоходного бетоносмесителя [Текст] // *Научный журнал ПГУ им. С. Торайгырова*. – 2018. – № 4.

7 **Каленов, Г. К., Карбаев, Н. К., Оразалиев, Б. Т., Сәрсенқызы, А.** Тауарлы бетон тасымалдау кезінде автомобиль дірілін азайту [Текст] // *Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ Хабаршысы. Техникалық ғылымдар және технологиялар*. – 2023. – № 1. – С. 157–164.

8 **Wong, J. Y.** Theory of Ground Vehicles [Text]. – New York : John Wiley & Sons, 2022. – ISBN: 978-0-470-17038-0.

9 **Пушкарев, С. А., Рамазанов, И. Ш., Панамарчук, В. В.** Моделирование ресурсов производства бетонной смеси [Текст] // *Строительные и дорожные машины*. – Москва, 2002. – С. 198.

10 **Болотник, Н. Н.** Оптимизация систем подвески [Текст]. – Москва : Наука, 1983. – 264 с.

REFERENCES

1 **Dukalski, P., Będkowski, B., Parczewski, K., Wnek, H.** Dynamics of the vehicle rear suspension system with electric motors mounted in wheels [Text] // *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. – 2018. – № 21(1). – P. 125–136. – <https://doi.org/10.17531/ein.2019.1.14>.

2 **Svetlitsky, V. A.** Engineering Vibration Analysis. Worked Problems [Text]. – Berlin : Springer-Verlag, 2004. – P. 134–135. ISBN: 3540207821.

3 **Jonjo, E.** Modeling the Effect of Road Excitation on Vehicle Suspension System [Text] // *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*. – 2020. – № 5(1). – P. 19–28. – <https://doi.org/10.26776/ijemm.05.01.2020.04>.

4 Talukdar, S., Mazumdar, A., Mullasseril, M., Kalita, K. Mathematical Modeling in Vehicle Ride Dynamics [Text] // Conference: SAE Technical Papers. – 2012. – <https://doi.org/10.4271/2012-01-0056>.

5 GOST 2.305–2008. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii (ESKD). Izobrazheniya — vidy, razrezy, secheniya (s Popravkoj) [Unified System for Design Documentation (USD). Views, sections, cuts (with amendment)] [Text]. – М : Standartinform, 2009.

6 Karbaev, N. K., Abishev, K. K., Orazaliev, B. T., Shontaev, D. K voprosu o vliyanii volnistosti dorogi na kolebaniya samokhodnogo betonosmislitelia [On the issue of the impact of road roughness on the vibrations of a self-propelled concrete mixer] [Text] // Nauchnyi zhurnal PGU im. S. Toraygirova. – 2018. – № 4.

7 Kalenov, G. K., Karbaev, N. K., Orazaliev, B. T., Sarsenkyzy, A. Tawarli beton tasyimaldau kezinde avtomobil dirilin azaytu [Reduction of vehicle vibrations during cargo transportation of concrete] [Text] // L.N. Gumilyov atyndagy EYU Khabarshysy. Tekhnicheskie nauki i tekhnologii. – 2023. – № 1. – P. 157–164.

8 Wong, J. Y. Theory of Ground Vehicles [Text]. – New York : John Wiley & Sons, 2022. ISBN: 978-0-470-17038-0.

9 Pushkarev, S. A., Ramazanov, I. Sh., Panamarchuk, V. V. Modelirovanie resursov proizvodstva betonnoi smesi [Resource modeling of concrete mix production] [Text] // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – М : 2002. – P. 198.

10 Bolotnik, N. N. Optimizatsiya sitem podveski [Optimization of suspension systems] [Text]. – М : Nauka, 1983. – 264 p.

Received 16.11.24.

Received in revised form 23.11.23.

Accepted for publication 25.11.24.

**Карбаев¹ Н. К., Менендес-Пидал² И., Балгабеков³ Т. К.,
Оразалиев⁴ Б. Т., Сайдалиев⁵ Е. Н.*

^{1,3,4,5}С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Мадрид политехникалық университеті, Испания, Мадрид қ.
16.11.23 ж. баспаға түсті.

23.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

25.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЫҚПАЛ ЕТУШІ ӘСЕРЛЕРДІҢ ӨЗІНЕН ЖҮРЕТІН БЕТОН АРАЛАСТЫРҒЫШТЫҢ ТЕРБЕЛІСТЕРІНЕ ӘСЕРІ ТУРАЛЫ

Бұл мақала өзін-өзі жүретін бетон араластырғыштарының ұзындықты жазықтықтағы тербелістерін зерттейді, мұнда жолдың микропрофилі бір өлшемді функция $h(x)$ ретінде ұсынылады. Зерттеу әртүрлі жол бөліктерінде өзгермейтін стационарлы жол микропрофилін анықтап, кез келген кедір-бұдырлықтары бар периодтық микропрофильдерді аналитикалық түрде көрсету үшін Форье қатарларын қолданады. Бұл әдіс жол профильдерін

және олардың көлік динамикасына, әсіресе өзін-өзі жүретін бетон араластырғыштардың жұмысына әсерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Басты бақылау – осындай араластырғыштардың қатты жабыны бар кедір-бұдырлы беттерде жұмыс істеу кезінде қозғалыстың елеулі біркелкі еместігі байқалады. Нәтижелер өзін-өзі жүретін бетон араластырғыштарының әртүрлі жұмыс жағдайларында мінез-құлқын жақсы түсіну және болжау үшін жол неровностарын дәл модельдеудің маңыздылығын көрсетеді, бұл көліктің конструкциясы мен өнімділігін жақсартуға арналған маңызды мәліметтер береді.

Кілтті сөздер: өздігінен жүретін, араластырғыштар, микропрофиль, Фурье қатарлары, жол кедір-бұдырлығы.

***Карбаев¹ Н. К., Менендес-Пидал² И., Балгабеков³ Т. К.,
Оразалиев⁴ Б. Т., Сайдалин⁵ Е. Н.**

^{1,3,4,5}Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

²Мадридский политехнический университет, Испания, г. Мадрид

Поступило в редакцию 16.11.24.

Поступило с исправлениями 23.11.24.

Принято в печать 25.11.2024.

О ВЛИЯНИИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОЛЕБАНИЯ САМОХОДНОГО БЕТНОСМЕСИТЕЛЯ (СБС)

В данной статье рассматриваются колебания самоходных бетонных миксеров в продольной плоскости с акцентом на дорожный микропрофиль, представленный как одномерная функция $h(x)$. Корреляционная функция базируется на стационарном дорожном микропрофиле, который остается неизменным на различных участках дороги. Для аналитического описания периодических микропрофилей с произвольной формой неровностей применяются ряды Фурье. Этот подход позволяет детально моделировать дорожные профили и их влияние на динамику транспортных средств, в частности, на поведение самоходных бетонных миксеров. Значительное наблюдение заключается в том, что эксплуатация транзитных миксеров на неровных поверхностях с твердым покрытием приводит к существенной неравномерности движения. Результаты подчеркивают важность точного моделирования дорожных неровностей для лучшего понимания эксплуатационных условий самоходных бетонных миксеров, что предоставляет важные данные для оптимизации их конструкции и работы на неровных дорожных покрытиях.

Ключевые слова: самоходные, бетоносмесителя, микропрофиль, ряды Фурье, дорожные неровности.

**А. Ж. Мурзагалиев¹, *А. К. Каукаров², М. К. Куанышев³,
Н. С. Сауханов⁴, Б. У. Жаманбаев⁵**

^{1,2,3,4}Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,

Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.,

⁵Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4964-681X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5681-5469>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8307-3675>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7292-4752>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-9540>

*e-mail: altynbek-79@mail.ru

АВТОСЕРВИСТИК КӘСІПОРЫННЫҢ ЖҰМЫС БАҒДАРЛАМАСЫН МОДЕЛЬДЕУ

Көлік кәсіпорындарының өндірістік қызметінде әлеуметтік – экономикалық жағдайға, өндірістік сипаттағы объективті себептер кешеніне, тиісті материалдық – техникалық базалардың болуына, оларды тиімді пайдалануға және кәсіпорындардың сапалы менеджментіне байланысты олардың экономикалық және еңбек шығындарын оңтайландыру мәселелері маңызды орын алады. Бұл жұмыста қазіргі жағдайда автомобильдерге техникалық қызмет көрсету станцияларының (ТҚКС) жұмыс бағдарламасын (тапсырыс портфолиосын) қалыптастыру ерекшеліктері келтірілген және олардың тұрақтылығын қамтамасыз етуге баса назар аударылған. Жұмысты жазудың негізгі әдісі - математикалық модельдеу, математикалық және статистикалық талдау әдістері және басқалар. Жұмыста ТҚКС өндірістік бағдарламасы кездейсоқ тәртіппен кәсіпорынға түсетін істен шығулар мен ақаулардың қосындысы ретінде ұсынылған. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ықтималдықтар теориясы мен математикалық статистиканың ережелері негізінде өңделген, жылдық бағдарламаның математикалық модельдері және оны берілген уақыт аралығында бөлу ықтималдығы алынған. ТҚКС құрылымдарының біркелкі жүктелуін қамтамасыз ету арқылы өндірістік бағдарламаны оңтайландыру бойынша іс-шаралар ұсынылған. Сондай-ақ, белгілі бір нәтижелерге негізделген теориялық әдістер бар. Бұл зерттеуде автокөлік мекемелерін жобалау саласындағы эксперименттік-теориялық зерттеулер келтірілген және кәсіпорынға келетін көлік санын топтастыру негізінде жылдық бағдарламаны есептеу әдісі негізделген.

Кілтті сөздер: автокөліктендіру; автокөлік құралдары; техникалық қызмет станциясы; Пуассон заңы; кездейсоқ процестер; регрессия теңдеулері.

Кіріспе

Кез-келген геосаяси бірліктегі дамыған көлік инфрақұрылымы ауқымды экономикалық қызметтің негізі болып табылады: бұл азаматтар мен жүктерді логистикалық нүктелер арқылы тасымалдау процестерін жеңілдетуге, экономикалық мүмкіндіктерді арттыруға, демек, бірқатар авторлардың еңбектерінде атап өтілген елдегі өмір сүру деңгейін арттыруға мүмкіндік береді [1]. Дұрыс құрылған логистика барлық жоспарланған тапсырыстарды уақытында орындауға ғана емес, сонымен қатар компанияның бәсекеге қабілеттілігін арттыруға, демек оның кірістерін арттыруға мүмкіндік беретін бизнеске де қатысты [2]. Сондықтан, көлік кәсіпорындары үшін үздіксіз жұмыс істеу тек өздері үшін ғана емес, сонымен қатар басқа кәсіпорындар мен жалпы экономика үшін де маңызды міндет болып табылады [3]. Бұл олардың жұмыс тиімділігін арттырудың жаңа әдістерін қарастыруды және табуды өзекті етеді. Бұл жұмыста Ақтөбе қаласының қолданыстағы жұмыс істеп тұрған жеңіл автомобильдерге техникалық қызмет көрсету станциясының деректері негізінде істен шығу бойынша эмпирикалық деректерді олардың теориялық шамаларымен салыстыру жүргізілді. Сонымен қатар, қазіргі заманғы нақты жағдайда көлік кәсіпорны бағдарламасын қалыптастыру ерекшеліктері сипатталған.

Осы және онымен байланысты мәселелермен көптеген ғалымдар жұмыс істеді. Олардың ішінде Р. В. Маккуэйд, М. Грейг, О.Смит және Дж. Куперді атап кетуге болады, олар жеткілікті үлкен жұмыста көлік кәсіпорындарының жұмысының көптеген аспектілерін, соның ішінде олардың елдің экономикалық өркендеуіндегі рөлін сипаттады [3]. Өз кезегінде А.Н. Семерин, М.Д. Аязбай, А. Бориханұлы, А.Н. Ысқақов және Б.А. Тукусбаев өз жұмысында көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын құрумен айналысты, алайда автомобильдердің тозу көрсеткіштеріне негізделген оны қалыптастырудың басқа әдістемесін қолданды [4]. Бұл біржақты болғанымен, оны жұмыста сипатталғандармен шебер қолдануға болады, бұл жылдық бағдарламаны құрудың тиімділігін жақсартады. Жылдық әдістемені құрудың ұқсас әдістерін О.С. Таймер, С.В. Лаптева, С.П. Зайцева және Т.Е. Шевнина қолданды [5]. Олар өз жұмыстарында «Солтүстік Біріккен компанияның» эмпирикалық деректерін жылдық бағдарлама жасау үшін зерттеді. Көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын негіздеудің сипатталған әдістемесімен тағы бір жұмыс - О.Н. Яркова мен А.В. Труфанова мақаласы, онда ғалымдар автомобильдердің тозуы, олардың жылдық жүрісі және тасымалдау көлемі туралы деректерді де пайдаланды [6]. Алайда, олардың жұмыста қолданған әдістемесі осы жұмыста қолданылғанға ұқсас болғанын атап өткен жөн.

Осыған байланысты зерттеудің мақсаты көлік кәсіпорындарының жұмыс істеу ерекшеліктерін қарастыру (Ақтөбе қаласының жеңіл автомобильдердің ТҚКС-ның эмпирикалық деректері негізінде) және олардың негізінде көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын қалыптастыру әдістемесін сипаттау болып табылады. Зерттеу нысаны Ақтөбе қаласындағы кәсіпорынның жұмысы туралы тікелей эмпирикалық деректер болып табылады. Жұмыстың жаңалығы нақты мәліметтер

негізінде және оларды теориялық мәліметтермен салыстыру негізінде жүргізілген зерттеулер болып табылады.

Материалдар мен әдістер

Зерттеудің негізі күнтізбелік жыл ішінде жеңіл автомобильдердің ақаулары мен істен шығуын жою бойынша кәсіпорын клиенттерінің кездейсоқ өтініштерінің ағынын нақты бақылау нәтижелері болып табылады. Техникалық пайдалану теориясында бұл процестер үздіксіз уақытпен дискретті кездейсоқ процеске жатады. Статистикалық материалдарды өңдеу ықтималдықтар теориясы мен жаппай қызмет көрсету теориясының элементтері негізінде жүргізілді [7–9]. Бақылау объектілері ТҚК, жөндеу және ақаулықтарды жою бойынша операцияларды жүргізу үшін кәсіпорынға түсетін жеңіл автомобильдердің саны, негізгі тораптар мен агрегаттар болды. Аталған деректер номенклатуралық түрдегі жылдық бағдарламаның және кәсіпорынның жылдық жұмыс көлемінің негізін құрайды. Жұмыста көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын құру ерекшеліктері сипатталады, көлік кәсіпорындарының басқа компаниялардың және тұтастай алғанда елдің экономикасының жұмыс істеуі үшін рөлі көрсетіледі.

Осылайша, жұмыста эмпирикалық әдістер, атап айтқанда мәліметтер массивтерін статистикалық және математикалық талдау үлкен рөл атқарды. Атап айтқанда, графикалық кескін, корреляциялық-регрессиялық модельдердің құрылысы, Пуассон заңының көмегімен тарату функцияларын сипаттау қолданылды. Олар зерттеуде қолданылатын эмпирикалық деректерді сапалы талдауға, оларды теориялық прототиппен салыстыруға және олардың негізінде жұмыс үшін маңызды қорытындылар жасауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, жұмысты жазу кезінде өңделген эмпирикалық статистикалық және теориялық деректердің санын ескере отырып, талдауды атап өткен жөн. Синтез, дедукция және абстракция да маңызды жұмыс атқарды. Сондай-ақ, осы жұмыста сипатталған әдістемемен салыстырғанда басқа ғалымдардың көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын қалыптастыру әдістемелерін сипаттау және олардың ерекшеліктерін бағалау кезінде қолданылған салыстыруды атап өткен жөн.

Жұмысты жазудың бүкіл процесін бірнеше кезеңге бөлуге болады. Бірінші кезеңде кәсіпорындар мен тұтастай мемлекеттің жұмыс істеуі үшін көлік жүйесінің рөлі туралы жалпы мәліметтер қысқаша зерттелді. Екінші кезеңде Ақтөбе қаласы кәсіпорнының эмпирикалық деректері негізінде келіп түскен істен шығу саны туралы қолда бар деректер бағаланды, оларды математикалық өңдеу және әдістемеде сипатталған тиісті әдістердің көмегімен негіздеу жүргізілді. Соңғы кезеңде зерттеу барысында алынған нәтижелерді басқа ғылыми жұмыстардың деректерімен салыстыру жүргізілді. Атап айтқанда, көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын құру бойынша басқа ғалымдардың жекелеген әдістемелерін салыстыру жүргізілді.

Нәтижелер мен талқылаулар

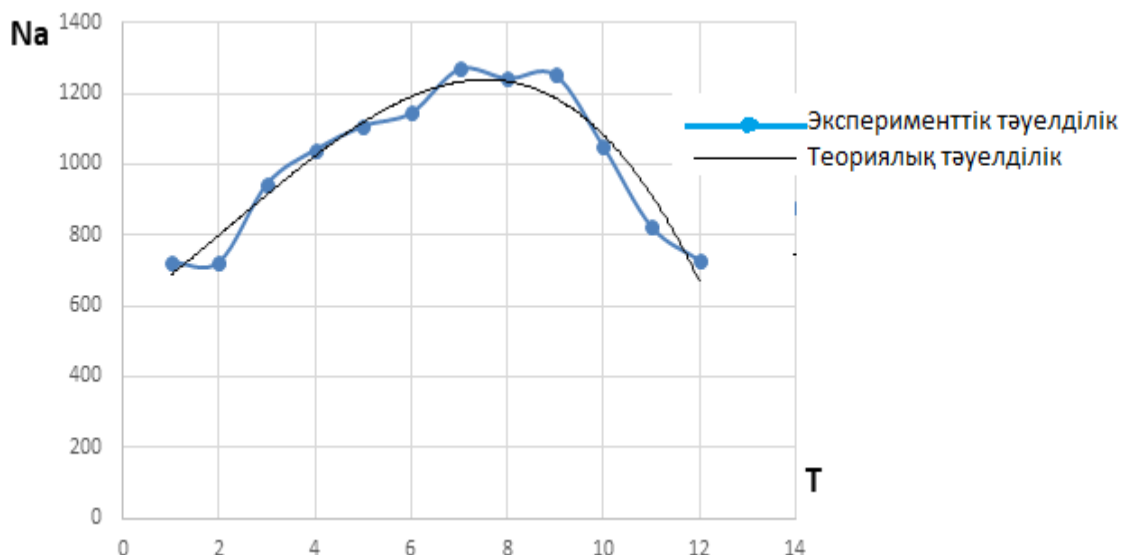
Әлемдік экономиканың жұмыс істеуі үшін көлік саласының рөлі қандай екенін қысқаша қарастырайық. Халықаралық экономикалық жүйеде көлік саласы белгілі бір орынды алады. Мысалы, әлем елдерінің ЖІӨ-дегі көлік үлесі 6% – дан

15% – ға дейін, Қазақстанда – 7–8 %, РФ – 8.5 % [10–12]. Жыл сайын әлемде көліктің барлық түрлерімен 100 млрд.т. астам жүк және 1 трлн. астам жолаушылар тасымалданады. Қазіргі уақытта әлемдік ауқымда автомобильдендіру деңгейінің қарқынды өсу үрдісі байқалуда. Ресми дереккөздердің деректері бойынша автокөлік құралдарының жалпы санының және автомобильдендіру деңгейінің жыл сайынғы қарқынды өсуі байқалады. Мысалы, дереккөзде 2021 жылы әлемде 947 миллион жеңіл және 335 миллион коммерциялық автомобильдер жұмыс істегені көрсетілген [13]. Алайда, мұнда ауыр жол талғамайтын және құрылыс көлігі ескерілмеген. Нәтижесінде талдаушылар әлемде көрсетілген уақытқа 1,2 млрд. машина есептелгенін анықтады. Бұл ретте тіркелген көлік құралдарының жалпы санының 95 % - ын жеңіл автомобильдер құрады. Айта кетейік, парктің мұндай құрылымы ҚР-ға тән, мұнда бұл көрсеткіш 83,2 % - ға сәйкес келеді [14].

2021 жылға арналған Біріккен Ұлттар Ұйымының Еуропалық экономикалық комиссиясының (БҰҰ ЕЭК) мәліметтері бойынша индустриалды дамыған елдердегі автомобильдендіру деңгейі 1000 тұрғынға шаққанда 600–1000 бірлік аралығында. Жекелеген елдер бойынша бұл көрсеткіш келесідей: Сан-Марино-1263; Монако-899; Лихтенштейн-750; Исландия-745; Люксембург-739; Италия-679; Канада-607; Кипр-532; Финляндия-612; Қазақстан-219; Украина-173 [15,16].

Осы мәліметтерден көріп отырғанымыздай, 1000 тұрғынға шаққандағы автомобильдердің ең көп саны дамыған елдерде, ал дамушы елдерде аз, бұл автомобильдендірудің жоғары деңгейі ең алдымен дамыған экономикалардың құзыреті екенін көрсетеді. Автомобильдендіру деңгейі елдердің индустриялық даму дәрежесін сипаттайтын көрсеткіш қана емес, сонымен қатар автопаркті өндірістік жағдайда пайдалану мәселелерімен және тиісті материалдық-техникалық базамен байланысты ұйымдастырушылық – техникалық іс-шаралардың кең кешенін ұсынады. Қазіргі заманғы автопарктің жұмыс істеу және пайдалану ерекшеліктері, қолданыстағы паркті жұмысқа жарамды күйде ұстау, көлік құралдарының сенімділігі мен пайдалану көрсеткіштерін нормативтік талаптарға сай қамтамасыз ету, жеткілікті зерттелген, жүйеленген және тиісті арнайы әдебиеттерде ұсынылған [17–18].

Зерттеу нәтижесінде Ақтөбе қаласы кәсіпорындарының негізгі топтардың, агрегаттар мен тораптардың істен шығуы бойынша статистикалық деректері алынды, олардың жиынтығы кәсіпорын бағдарламасы ретінде қарастырылды. Деректерді өңдеу нәтижесінде келіп түскен істен шығулардың жалпы саны қолданыстағы өндірістік бекеттер мен учаскелерді және операциялардың технологиялық үйлесімділігін ескере отырып топтастырылды және бөлінді: жинау-жуу жұмыстары – 3890; жанармай құю жұмыстары – 2385; диагностика – 1567; жөндеу, техникалық қызмет көрсету – 7786; шанақ жұмыстары – 2637. Алынған мәліметтер негізінде уақыт бойынша істен шығудың таралуының эксперименттік және теориялық тәуелділіктері алынды, олардың графикалық бейнесі 1-суретте көрсетілген.



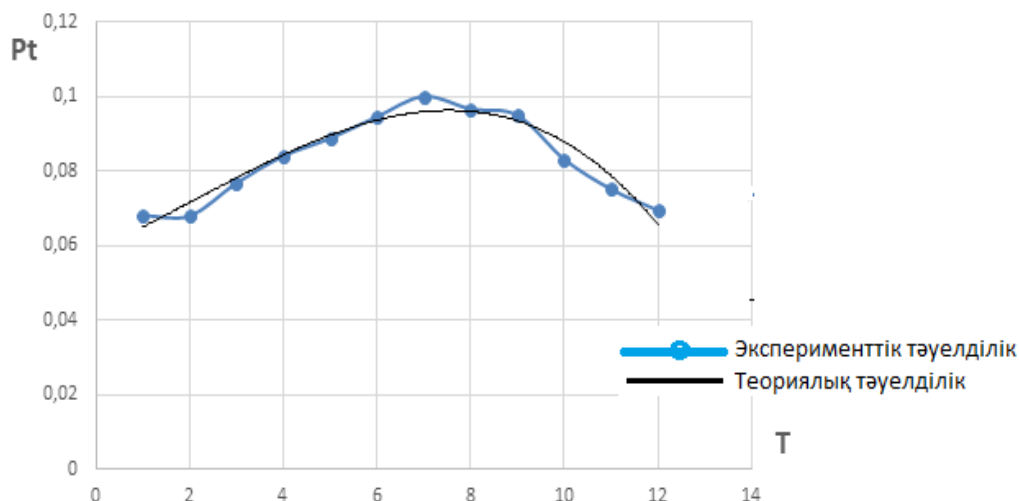
Сурет 1 – Істен шығудың таралу графигі
 N_a – істен шығулар саны; T – уақыт.

1-суреттен уақыт бойынша істен шығу санының теориялық және эксперименттік тәуелділіктері өте ұқсас конфигурацияларға ие екенін көруге болады. Осылайша, келесі түрдің үшінші дәрежелі көпмүшесімен жуықталатын уақытқа тәуелділіктің регрессия теңдеуін алуға болады:

$$y = 1,4235x^3 + 10,05x^2 + 91,604x + 586,78 \quad (1)$$

Ұсынылған модель $R = 0,9703$ тең корреляция коэффициентінде және 55,56-ға тең стандартты қателеде зерттелетін процесті нақты сипаттайды. Осы модельдің нәтижелерін талдау зерттеу кезеңінде істен шығудың біркелкі емес таралуын көрсетеді, бұл оны оңтайландыру қажеттілігін нұсқайды. (1) өрнегінде ұсынылған модель кәсіпорын бағдарламасының белгілі бір жұмыс уақытында өзгеру процесін анықтауға және болжауға мүмкіндік береді және оның біркелкі емес екендігін сипаттайды.

Істен шығу санының өзгеру динамикасы бойынша алынған статистикалық көрсеткіштерді математикалық өңдеу негізінде өндіріс учаскелері бойынша уақытқа байланысты істен шығудың тиісті ықтималдығының мәндері алынды. Жоғарыда көрсетілген деректерді қайта есептеу кезінде жұмыстардың түрлері бойынша істен шығу ықтималдығы бөлінді, олар учаскелер бойынша келесідей бөлінеді: жинау-жуу – 0,21; майлау-жанармай құю – 0,13; бақылау-диагностикалық – 0,09; техникалық қызмет көрсету және ағымдағы жөндеу – 0,43; шанақ – 0,14. Дәл осы деректер жұмыс күні, ауысым, сағат сияқты белгілі бір уақыт аралығындағы істен шығу ықтималдығының статистикалық көрсеткіштерін қайта есептеу үшін қолданылды. 2-суретте T зерттелетін уақыт кезеңінде P_t істен шығу ықтималдығын бөлу графигі көрсетілген, мұнда соңғысы жылдың айлары.



Сурет 2 – Істен шығу ықтималдығын бөлу

P_t – белгілі бір t уақыт ішінде істен шығудың болу ықтималдығы; T – уақыт.

2-суреттегі графикте келтірілген T уақытындағы P_t ақауларының ықтималдығына тәуелділік келесі түрдегі көпмүшемен аппроксимацияланады:

$$y = -7 \dots 10^{-5} - 5x^3 + 0,0005x^2 + 0,0057x + 0,0589 \quad (2)$$

Алынған модель $R = 0,9046$ тең корреляция коэффициентінде және $0,005$ тең стандартты қателігінде автомобиль тораптары мен агрегаттарының істен шығу ықтималдығын бөлудің кездейсоқ процесін жеткілікті түрде сипаттайды, бұл эксперименттік және теориялық деректер нәтижелерінің жоғары бірігу дәрежесін көрсетеді. Бұл модельді талдау күнтізбелік кезеңде істен шығу ықтималдығының біркелкі бөлінбеуін көрсетеді, оны өндірістік учаскелердің біркелкі жүктелуін қамтамасыз ету үшін кәсіпорынның жылдық бағдарламасын құру кезінде ескеру қажет. Бұл іс-шаралар, ең алдымен, сапалы менеджмент пен маркетингтік қызметке байланысты. (2) өрнегінде көрсетілген модель тандалған өлшеу аралығына байланысты кәсіпорынның жүктемесін өзгерту процесін болжауға мүмкіндік береді. (1) және (2) өрнектермен ұсынылған тәуелділіктер жылдың күнтізбелік айларында N_a істен шығу санының көрсеткіштерін және P_t істен шығу ықтималдығын қорытындылау нәтижелерін білдіреді және процестің құрылымдық құрамдас бөліктерінде қарастырылған компоненттердің істен шығуының ықтималдық сипаттамаларын ескермей кездейсоқ процесті іске асырудың жалпы көрінісін сипаттайды, бұл технологиялық топтар үшін қолайлы. Соңғысы жеке қарау және зерттеу мәселесі болып табылады.

Қарастырылған істен шығулардың пайда болу процестері тұрақтылық, бірегейлік және салдардың болмауы талаптарына сәйкес келетін ең қарапайым істен шығу ағындары ретінде қабылданады. Дереккөзге сәйкес, сондай-ақ бір оқиғаның (істен шығудың) шексіз аз уақыт аралығында болу ықтималдығы осы аралықтың ұзындығына шексіз кіші жоғары реттерге дейін пропорционалды деген

шарт сақталады [8,9]. Бұл жағдайда бір күнге тең жұмыс уақыты күнтізбелік жылға тең шексіз аз уақыт аралығын құрайды. Аталған жүйелердің негізгі тораптары мен агрегаттары бойынша істен шығу ықтималдығын бөлу функциялары Пуассон Заңымен сипатталады [7].

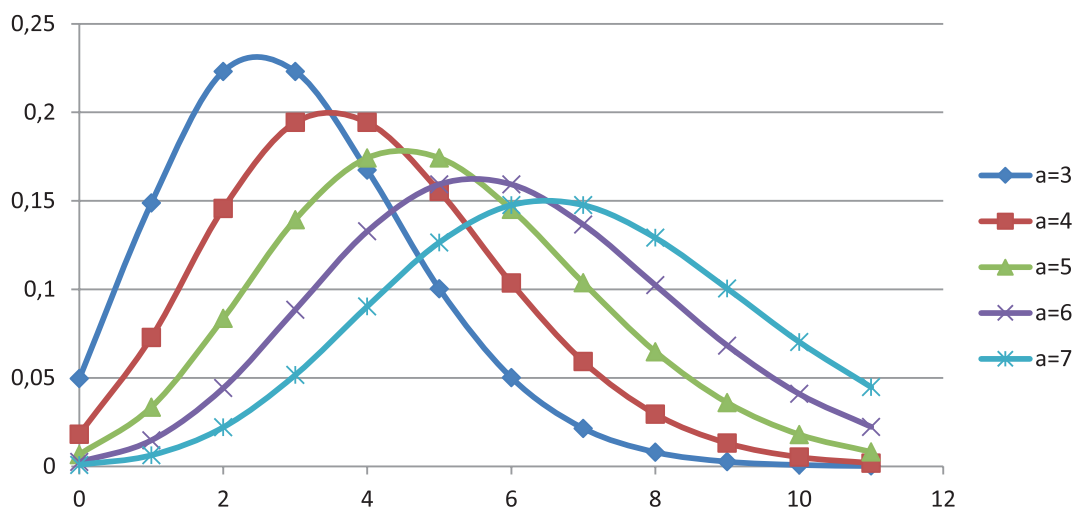
$$P_k(t) = \frac{(\omega t)^k}{k!} e^{-\omega t} \quad (3)$$

мұнда – уақыт ішінде пайда болатын істен шығу саны; істен шығу ағынының параметрі.

Істен шығу ағынының алынған ықтималдық сипаттамаларын өндірістік көрсеткіштерге аудару реті келесідей. Осы мәндер кезінде өндірістік аймаққа келетін істен шығулар ағыны келесі өрнекпен анықталады: $a = \omega \cdot t$. Егер, уақытты $t=1$ деп қабылдасақ, $a = \omega$ тең болады. Қарастырылып отырған жағдай үшін уақытты $t=1$ -ге қайта есептеу нәтижесінде, параметр $a = 4$, бұл уақыт бірлігіндегі істен шығудың орташа санын сипаттайды және өндірісте тораптардың, агрегаттардың ақаулары мен істен шығуларын жою жөніндегі талапты білдіреді. Кәсіпорындарға түсетін талаптар ағыны кәсіпорын бағдарламасы ретінде қарастырылуы керек. Біздің жағдайда (3) формуланы келесідей ұсынамыз:

$$P_{ka} = \left(\frac{a^k}{k!} \right) e^{-a} \quad (4)$$

(4) өрнегінде, мысалы, $a = 4$ параметрі төрт істен шығудың (ақаулардың) жиынтығын немесе жоюды қажет ететін қарапайым талаптар ағынын білдіреді. (4) формула бойынша a параметрінің белгілі мәні кезінде P_k белгілі бір санының пайда болу ықтималдығын есептеуге болады. Мысалы, қарастырылған нұсқа үшін $a = 4$, талабының болмауы ықтималдығы $P_k=0 = 0,02$ немесе 2 %, бір талаптың пайда болу ықтималдығы $P_k=1 = 0,07$ немесе 7 %, екі талаптың пайда болу ықтималдығы $P_k=2 = 0,15$ немесе 15 %, үш талаптың пайда болу ықтималдығы $P_k=3 = 0,19$ немесе 19 % және т. б. Жоғарыда айтылғандарға сәйкес, 3-суретте параметрінің мәндерінен алынған белгілі бір істен шығулар санының пайда болуының Пуассон Заңының графикалық түсіндірмесі көрсетілген $a= 3, 4, 5, 6, 7$ және t уақыт ішінде пайда болатын істен шығулар саны $k = 0, 1, 2, 3, \dots, 11$.



Сурет 3 – Істен шығу ықтималдығын бөрудің графикалық интерпретациясы

3-суретте келтірілген материалдарды талдау кәсіпорынның учаскелері мен жабдықтарын жүктеудің ықтималдық сипатын көрсетеді. $a = 4$ кезінде посттардың 18 % - ы орташа жүктемеге ие болады, посттар мен жабдықтардың 45 % - ы орташадан көп жүктеледі, ал қалған 63 % - ы жүктелмейді. $a \leq 4$ кезінде, мысалы $a = 3$, істен шығу ықтималдығын бөлу графигі посттар мен жабдықтарды жүктеудің біркелкі артуына қарай өзгереді. $a \geq 4$ мәндерінде, графиктерден көрініп тұрғандай, тәуелділік неғұрлым ұзартылған, біркелкі сипатқа ие болады, бұл кәсіпорын құрылымдарын біркелкі жүктеу мүмкіндігін көрсетеді. Осылайша, объектілердің істен шығуының кездейсоқ процестерін тұрақты, бірегейлік қасиеттеріне ие қарапайым ағындар түрінде ұсыну және Пуассон Заңымен сипатталатын салдардың болмауы істен шығу ағынына құрылымдық талдау жүргізуге, кәсіпорынның посттары мен жабдықтарының жүктелу сипатын бағалауға, өндірістік бағдарламаны және авто-қызмет көрсететін кәсіпорынның құрылымын оңтайландыру бойынша іс-шараларды болжауға және жасауға мүмкіндік береді.

Көлік жолдарын құрастыру сапасы елдің дамуы үшін маңызды рөл атқарады: шынында да, жұмыста сипатталғандай, көлік секторы ЖІӨ-нің көп бөлігін алады, шамамен 10 %. Сонымен қатар, зерттеушілер Н. Филип пен К. Попа атап өткендей, көлік елдің экономикалық дамуында ғана емес, сонымен бірге онда болып жатқан ішкі процестерде, соның ішінде әлеуметтік процестерде де маңызды рөл атқарады [18]. Сондай-ақ, көлік инфрақұрылымын дамыту көбінесе аймақтық дамудың негізін қалаушылардың бірі болып табылады. Осылайша, экономикалық және көліктік даму арасындағы өзара байланыс әр түрлі және тұрақты емес. Р. В. МакКуэйд, М. Грейг, О. Смит және Дж. Купер, ішкі және сыртқы жақсы көлік байланысы - бұл әлеуетті инвесторлар орналасқан жер туралы шешім қабылдаған кезде ескеретін аймақ активтері портфелінің бөлігі болып табылады [3]. Әрине, көліктің бизнес қызметіне әсер ету деңгейі, ең алдымен, компанияның

сипаттамаларына, жердің ерекшеліктеріне, сыртқы жағдайларға және қызмет сипатына байланысты, бірақ кез-келген жағдайда көліктің рөлі бар. Кәсіпорындар үшін көліктің рөлі туралы айтатын болсақ, В. С. Лубенцов және А. В. Ефремов нарықтық экономикалардың қазіргі жағдайында логистика ерекше маңызды рөл атқаратынын, ал нарықтардағы бәсекелестік орта автокөлік кәсіпорындарын өз жұмысының икемді әдістеріне көшуді, макро және микро деңгейлерде бірлескен тұрақты жұмыс істеуді талап ететінін атап өтті [19].

Автокөлік кәсіпорындарының материалдық-техникалық базасын құру туралы айта отырып, оған рұқсат беру құжаттамасын ресімдеу, техникалық-экономикалық негіздеме және тікелей жобалау сияқты бірқатар регламенттелген пункттер мен жобалау кезеңдері кіретінін атап өткен жөн. Өз кезегінде, соңғы бөлімде негіздеуге және мұқият әзірлеуге жататын тармақтар бар: технологиялық, құрылыс, техникалық-экономикалық, ұйымдастырушылық, құрылыс бөліктері; қоршаған ортаны қорғау, жобалау-сметалық құжаттама, түсіндірме жазба, бас жоспар және жобаның паспорты [20].

Қазіргі жағдайда шаруашылық жүргізуші субъектілердің кәсіпорындары мен ұйымдары үшін өндірістік бағдарламаның мәнін түсіну біршама өзгерді. А. И. Ильин өз жұмысында сипаттағандай, өндірістік бағдарлама өндірілетін және сатылатын өнімнің көлемін, номенклатурасы мен мерзімдерін анықтайтын қаржылық, маркетингтік, техникалық және өндірістік қызметтердің өзара әрекеттесуінің нәтижесі болып табылады. Бұл ретте, автоқызмет көрсететін кәсіпорындардың басым бөлігі, оның ішінде шаруашылықтың жеке нысандары, олардың технологиялық процестерін кездейсоқ деп сипаттайтын «істен шығуды күту» жүйесі бойынша өндірістік қызметті жүзеге асырады [7].

Ғалымдар автокөлік кәсіпорындарының жұмыс әдістерін жақсарту және олардың жылдық бағдарламасын қалыптастыру әдістерін ұсынатын тағы бір жұмыс – О. Н. Яркова мен А. В. Труфановтың жұмысы, онда ғалымдар сонымен қатар автомобильдің жұмыс процесін белгілі бір кездейсоқ нәтижелерге ие деп сипаттайды [6]. Оларды Пуассон заңы арқылы да сипаттауға болады. Осылайша, ғалымдар автомобильдердің сенімділігін, олардың тозу деңгейлерін жүріске, жүк айналымына және тасымалдау көлеміне және осындай кәсіпорындардың қызметін жүргізу үшін қай автомобильдерді тиімді пайдалану керектігін анықтауға мүмкіндік беретін басқа көрсеткіштерге байланысты есептеуді ұсынады. Осылайша, ғалымдар жұмыста автордың жұмысындағыдай ұқсас әдістерді қолданғанымен, есептеу үшін мүлдем басқа негізгі көрсеткіштерді қолданғандықтан, мақала көлік кәсіпорнының тиімділігін арттыру үшін басқа әдістерді қолдануға мүмкіндік береді. Бұл белгілі бір синергия әсерін тудыруы мүмкін, яғни көлік кәсіпорнының жұмыс режимін одан да жақсартуға мүмкіндік береді. Сонымен, талданған жұмыстарда көлік кәсіпорнының жылдық бағдарламасын құру бойынша ұсынылып отырған әдіске өте ұқсас әдістер жоқ екені анықталды, бұл оны өзінше ерекше етеді.

Қорытынды

Жұмыста елдің дамуы үшін көлік кәсіпорындарының рөлі бағаланды. Бұл сала экономикалық дамумен тығыз өзара байланыста екендігі көрсетілді, атап айтқанда, талдауды қиындататын нақты емес тәсілмен, сонымен бірге саланың тиімділігін арттырудың жана әдістерін іздеуге мәжбүр етеді.

Мақалада жеке тораптар мен агрегаттардың ақауларының комбинациясы ретінде істен шығудың қарапайым ағындары оларды өндірістің белгілі бір учаскесінде жоюға қойылатын талап ретінде қарастырылатындығы нақты мысалмен көрсетілді. Өндірістік көрсеткіштерге істен шығу ағынының алынған ықтималдық сипаттамаларын аудару процедурасы сипатталды. Нәтижесінде $R=0,9703$ және $R=0,9046$ тең корреляция коэффициенттеріне және 55,56 және 0,005 тең стандартты қателеріне сәйкес берілген уақыт аралықтарында істен шығу санының өзгеру динамикасын және олардың пайда болу ықтималдығын нақты сипаттайтын үшінші дәрежелі көпмүшелер түріндегі математикалық модельдер алынды. Қарастырылып отырған кәсіпорынның жағдайлары үшін төрт істен шығудың жиынтығынан тұратын ақаулар ағыны кәсіпорынның біркелкі жүктелуін қамтамасыз етпейді деген қорытындыға келуге болады. Өндірістік бағдарламаны оңтайландыру және автосервистік кәсіпорындардың посттары мен учаскелерін біркелкі жүктеу мақсатында клиенттерге ұсынылатын қызмет түрлерін кеңейту бойынша іс шараларды енгізу ұсынылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Okechukwu, E., Madonsela, N. S., Adetunla, A.** The Effect of Transportation Infrastructure on Economic Development. Conference: Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Harare, № 1. – 2021. – P. 1–8.

2 **Cieplinska, J. R.** The Role of Transport Organisers in the Integration of Passengers and Goods Flows Within Urban Areas. Transportation Research Procedia, № 39. – 2019. – P. 453–461.

3 **McQuaid, R. W., Greig, M., Smyth, A., Cooper, J.** The importance of transport in business location decisions-scoping study. – 2003. – [Электронды ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/277763787_The_importance_of_transport_in_business_location_decisions-scoping_study.

4 **Семернин, А. Н., Аязбай, М. Д., Бөріханұлы, А., Искаков, А. Н., Тукусбаев Б. А.** Методика планирования годовой программы автопредприятия. Научный журнал Механика и технологии. № 1 (59), 2018 г. – С. 74–80.

5 **Тамер, О. С. и др.** Определение производственной программы и плана эксплуатации грузовых автомобилей ООО «Производственно-коммерческая корпорация «Северная объединенная компания» //Вестник Волжского университета им. ВН Татищева. – 2018. – Т. 2. – № 3. – С. 210–216.

6 **Яркова, О. Н., Труфанова, А. В.** Математическое моделирование характеристик эффективности производственной программы автотранспортного

предприятия // Актуальные проблемы социально-экономического развития общества – Оренбург, 2021 том 1, – С. 114–120.

7 Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов / Е. С. Кузнецов, В. П. Воронов, А. П. Болдин и др.; Под ред. Е. С. Кузнецова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2001. – 535 с.

8 **Ивашев – Мусатов О. С.** Теория вероятности и математическая статистика. М.: Изд-во «Наука», Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1979. – 256 с. с илл.

9 **Румшисский, Л. З.** Элементы теории вероятностей. Избранные главы высшей математики для инженеров и студентов вузов. М.: Изд-во «Наука», Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1970. – 256 с. с илл.

10 Транспортный комплекс в современной мировой экономике 2016. – [Электронды ресурс] – URL: <https://finuni.ru/transportnyy-kompleks-v-sovremennoy-mirovoy-ekonomike>.

11 Up to 3.5 % of GDP growth can be provided by transport logistics. – 2022. – [Электронды ресурс] – URL: <https://dknews.kz/en/articles-in-english/225728-up-to-3-5-of-gdp-growth-can-be-provided-by-transport>.

12 **Амиров М. Ш.** Единая транспортная система: учебник / М. Ш. Амиров, С. М. Амиров. – Москва : КноРус, 2018. – 177 с.

13 How many cars are there in the world? 2022. – [Электронды ресурс]. – <https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world>.

14 По итогам 2020 года средний возраст автопарка вырос до 20,7 лет. – [Электронды ресурс]. – 2021. – URL: <https://dknews.kz/ru/dk-life/163480-po-itogam-2020-goda-sredniy-voznrast-avtoparka-vyros>.

15 Информационные карты транспортной статистики. 2021. Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций. – [Электронды ресурс]. – https://unece.org/sites/default/files/2021-04/Infocards_2021_RUS_forweblight.pdf.

16 National Master. Transport. Road. Motor vehicles per 1000 people: Countries Compared. – 2021. – [Электронды ресурс]. – <https://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Road/Motor-vehicles-per-1000-people#>

17 **Власов В. М.** Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. Учебник / В. М. Власов, А. А. – М. : Academia, 2019. – 672 с.

18 **Filip, N., Popa, C.** The Role of Transportation in Economic Development. «Mircea cel Batran» Naval Academy Scientific Bulletin, № 16 (2), 2014. – P. 1–2.

19 **Лубенцова В. С., Ефремов А. В.** Моделирование производственной программы автотранспортного предприятия с использованием марковских случайных процессов. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математических наук. – № 16, 2002 г. – С. 155–160.

20 Проектирование предприятий автомобильного транспорта: учебно-методический комплекс / сост. О. В. Гладков, Ю. И. Сенников - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2010. –132 с.

REFERENCES

1 **Okechukwu, E., Madonsela, N. S., Adetunla, A.** The Effect of Transportation Infrastructure on Economic Development. Conference: Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Harare, № 1. – 2021. – P. 1–8.

2 **Cieplinska, J. R.** The Role of Transport Organisers in the Integration of Passengers and Goods Flows Within Urban Areas. Transportation Research Procedia, № 39. – 2019. – P. 453–461.

3 **McQuaid, R. W., Greig, M., Smyth, A., Cooper, J.** The importance of transport in business location decisions-scoping study. – 2003. – [Electronic resource]. – https://www.researchgate.net/publication/277763787_The_importance_of_transport_in_business_location_decisions-scoping_study.

4 **Semernin, A. N., Ayazbay, M. D., Barikhanuly, A., Iskakov, A. N., Tukusbayev, B. A.** Metodika planirovaniya godovoj programmy` avtopredpriyatiya. [The methodology of planning the annual program of the automobile enterprise] Scientific Journal of Mechanics and Technology. № 1 (59), 2018. – P. 74–80.

5 **Tamer, O. S. and others.** Opredelenie proizvodstvennoj programmy` i plana e`kspluatacii gruzovy`x avtomobilej OOO «Proizvodstvenno-kommercheskaya korporaciya «Severnaya ob`edinennaya kompaniya» [Definition of the production program and operation plan for trucks of LLC Production and Commercial Corporation Northern United Company] // Bulletin of the Volga State University. In N. Tatishcheva. – 2018. – Vol. 2. – № 3. – P. 210–216.

6 **Yarkova, O. N., Trufanova A. V.** Matematicheskoe modelirovanie xarakteristik e`ffektivnosti proizvodstvennoj programmy` avtotransportnogo predpriyatiya [Mathematical modeling of the performance characteristics of the production program of a motor transport company] // Actual problems of socio-economic development of society – Orenburg, 2021. – Vol. 1, P. 114–120.

7 **Texnicheskaya e`kspluataciya avtomobilej [7. Technical operation of vehicles]:** Textbook for universities / E. S. Kuznetsov, V. P. Voronov, A. P. Boldin and others; Edited by E. S. Kuznetsov. – 4th ed., reprint and additional – M. : Nauka, 2001. – 535 p.

8 **Ivashev – Musatov O. S.** Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. M.: Publishing house «Nauka», Editor-in-chief of Physics and Mathematics. literature, 1979. – 256 p. with fig.

9 **Rumshinsky, L. Z.** E`lementy` teorii veroyatnostej. Izbranny`e glavy` vy`sshej matamatiiki dlya inzhenerov i studentov vuzov. [Elements of probability theory. Selected chapters of Higher mathematics for engineers and university students.]. M.: Publishing house «Nauka», Editor-in-chief of Physics and Mathematics. literature, 1970. – 256 p. with fig.

10 **Transportny`j kompleks v sovremennoj mirovoj e`konomike [The transport complex in the modern world economy].** – [Electronic resource] – 2016. – URL: <https://finuni.ru/transportnyy-kompleks-v-sovremennoy-mirovoy-ekonomike>.

11 Up to 3.5% of GDP growth can be provided by transport logistics. [Electronic resource] – 2022. – URL: <https://dknews.kz/en/articles-in-english/225728-up-to-3-5-of-gdp-growth-can-be-provided-by-transport>.

12 **Amirov, M. Sh.** Edinaya transportnaya sistema [Unified transport system] : textbook / M. S. Amirov, S. M. Amirov. – Moscow : KnoRus, 2018. – 177 p.

13 How many cars are there in the world? 2022. – [Electronic resource]. – <https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world>.

14 Po itogam 2020 goda srednij vozrast avtoparka vy`ros do 20,7 let. [By the end of 2020, the average age of the fleet has increased to 20.7 years.]. – [Electronic resource]. – 2021. – URL: [https:// dknews.kz/ru/dk-life/163480-po-itogam-2020-goda-sredniy-vozrast-avtoparka-vyros](https://dknews.kz/ru/dk-life/163480-po-itogam-2020-goda-sredniy-vozrast-avtoparka-vyros).

15 Informacionny`e karty` transportnoj statistiki. 2021. Evropejskaya e`konomicheskaya komissiya Organizacii Ob``edinenny`x Nacij. [Information maps of transport statistics. 2021. United Nations Economic Commission for Europe.]. [Electronic resource]. – https://unece.org/sites/default/files/2021-04/Infocards_2021_RUS_forweblight.pdf.

16 National Master. Transport. Road. Motor vehicles per 1000 people: Countries Compared. – 2021. – [Electronic resource]. – <https://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Road/Motor-vehicles-per-1000-people#>

17 **Vlasov, V. M.** Texnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobilej [Car maintenance and repair]. Textbook / V. M. Vlasov, A. A. – M.: Academia, 2019. – 672 p.

18 **Filip, N., Popa, C.** The Role of Transportation in Economic Development. «Mircea cel Batran» Naval Academy Scientific Bulletin, № 16 (2), 2014. – P. 1–2.

19 **Lubentsova, V. S., Efremov, A.V.** Modelirovanie proizvodstvennoj programmy` avtotransportnogo predpriyatiya s ispol`zovaniem markovskix sluchajny`x processov. [Modeling of the production program of a motor transport company using Markov random processes.]. Bulletin of the Samara State Technical University. Series of Physical and Mathematical Sciences. № 16. – 2002. – P. 155–160.

20 Proektirovanie predpriyatij avtomobil`nogo transporta [Design of road transport enterprises] : educational and methodological complex / comp. O.V. Gladkov, Yu.I. Sennikov - St. Petersburg: Publishing House of NWTU, 2010. -132 p.

23.09.23 ж. баспаға түсті.

18.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

12.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Ж. Мурзагалиев¹, *А. К. Каукаров², М. К. Куанышев³,
Н. С. Сауханов⁴, Б. У. Жаманбаев⁵*

^{1,2,3,4}Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актөбе

⁵Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана

Поступило в редакцию 23.09.24.

Поступило с исправлениями 18.10.24.

Принято в печать 12.11.2024.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ РАБОТЫ АВТОСЕРВИСНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В производственной деятельности транспортных предприятий важное место занимают вопросы оптимизации их экономических и трудовых затрат, которые зависят от социально-экономической ситуации, комплекса объективных причин производственного характера, наличия соответствующей материально-технической баз, их эффективного использования и качественного менеджмента предприятий. В данной работе приведены особенности формирования программы работы (портфолио заказов) станций технического обслуживания автомобилей (СТОА) в современных условиях и акцентировано внимание на обеспечении их стабильности. Основным методом при написании работы являются методы математического моделирования, математического и статистического анализа и другие. В работе производственная программа СТОА представлена как сумма отказов и неисправностей, поступающих на предприятие в случайном порядке. Результаты экспериментальных исследований обработаны на основе положений теории вероятностей и математической статистики, получены математические модели годовой программы и вероятностей её распределения в заданном временном интервале. Рекомендованы мероприятия по оптимизации производственной программы с обеспечением равномерной загрузки структур СТОА. Также существуют теоретические методики, основанные на определенных результатах. В данном исследовании приведена экспериментально-теоретических исследований в области проектирования автотранспортных учреждений и обоснован метод расчет годовой программы на основе группировки количества автотранспорта, поступающего на предприятие.

Ключевые слова: автомобилизация; автотранспортные средства; станция технического обслуживания; закон Пуассона; случайные процессы; уравнения регрессии.

*A. Zh. Murzagaliev*¹, **A. K. Kaukarov*², *M. K. Kuanyshev*³,
*N. S. Saukhanov*⁴, *B. U. Zhamanbayev*⁵

^{1,2,3,4}Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe

⁵L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana

Received 23.09.24.

Received in revised form 18.10.23.

Accepted for publication 12.11.24.

MODELING THE WORK PROGRAM OF A CAR SERVICE COMPANY

In the production activities of transport enterprises, an important place is occupied by issues of optimizing their economic and labor costs, which depend on the socio-economic situation, a set of objective reasons of a production nature, the availability of appropriate material and technical bases, their effective use and high-quality management of enterprises. This paper presents the features of the formation of the work program (order portfolios) of car service stations (CSS) in modern conditions and focuses on ensuring their stability. The main method in writing the work is the methods of mathematical modeling, mathematical and statistical analysis, and others. In the work, the production program of the CSS is presented as the sum of failures and malfunctions that arrive at the enterprise in a random order. The results of experimental studies are processed on the basis of the provisions of probability theory and mathematical statistics, mathematical models of the annual program and the probability of its distribution over a given time interval are obtained. Measures are recommended to optimize the production program by ensuring uniform loading of service station structures. There are also theoretical techniques based on certain results. This study provides experimental and theoretical research in the field of designing motor transport institutions and substantiates the method of calculating the annual program based on grouping the number of vehicles entering the enterprise.

Keywords: motorization; motor vehicles; service station; Poisson's law; random processes; regression equations.

***А. Т. Турдалиев¹, Б. Т. Сазамбаева²,
Р. С. Устемирова³, А. П. Карпов⁴**

^{1,3,4}Международный транспортно-гуманитарный университет,

Республика Казахстан, г. Алматы

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2697-1396>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5227-9707>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2559-6899>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8795-0233>

*e-mail: raigul_1980@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА КОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

В данной статье предложен анализ предыдущих исследований в области разработки фрезерных режущих устройств для резания отработанного асфальта. Рассмотрены кинематические параметры рабочего органа навесного оборудования, физико-механические свойства асфальта, конструктивные параметры рабочего органа. На основании математической модели, составленной на базе системы уравнений, описывающих движение навесного рабочего органа, разработаны его оптимальные параметры.

Математическое моделирование фрезерного рабочего органа ковшовых экскаваторов является важным инструментом для оптимизации и улучшения процесса экскавации. Моделирование позволяет учесть различные параметры, такие как размер ковша, скорость вращения, глубина резания, угол атаки и другие факторы, которые влияют на производительность и качество работы рабочего органа.

С помощью математических моделей можно оптимизировать форму и конструкцию фрезерного рабочего органа, чтобы повысить его эффективность и снизить износ. Моделирование также позволяет проводить анализ напряжений и деформаций в рабочем органе, что позволяет улучшить его прочность и долговечность. Одной из основных задач математического моделирования фрезерного рабочего органа является оптимизация процесса резания, чтобы достичь максимальной производительности при минимальном расходе энергии и износе оборудования. Моделирование также позволяет учесть различные типы грунтов и условия эксплуатации, чтобы выбрать оптимальные параметры для конкретной задачи.

Ключевые слова: дорожная одежда, экскаватор, навесное оборудование, нагрузка, уравнение движения, усилие резания.

Введение

Новые методы ремонта асфальтобетонных покрытий стремительно набирают популярность благодаря использованию переработанного материала, извлеченного из старого дорожного покрытия, и его регенерации на месте или в стационарных условиях. Для внедрения этих передовых методов необходимо разработать и наладить производство специальной техники и оборудования. Разрушение верхних слоев асфальтобетона является важным этапом процесса восстановления дорожного полотна.

Создание эффективного, недорогого и простого в изготовлении оборудования для разрушения верхних слоев асфальтобетона является актуальной задачей. Цель данной статьи – определить параметры процесса резания отработанного асфальтного слоя диско-фрезерными элементами на основе теоретических исследований.

Материалы и методы

Основные задачи статьи:

- 1 Провести теоретическое исследование асфальтобетонного покрытия и анализ взаимодействия оборудования с материалом.
- 2 Разработать математическую модель процесса резания с помощью навесного оборудования.
- 3 Создать усовершенствованную конструкцию режущих дисков на основе анализа.

Одним из перспективных направлений является выбор оптимальных параметров и режимов работы оборудования с учетом особенностей технологии восстановления асфальтобетонных покрытий, что позволит снизить энергоемкость процесса. Повышение производительности экскаватора возможно за счет использования навесного оборудования, которое разрезает старое асфальтовое покрытие и облегчает работу ковша.

Советские ученые, такие как В. Д. Абезгауз, В. И. Баловнев, Л. А. Хмара, Б. В. Белецкий, Д. И. Волков, Ю. А. Ветров, М. И. Гальперин, Н. Г. Домбровский и И. А. Недорезов, внесли значительный вклад в исследования процессов резания горных пород и грунтов [2,3,4,5,6,7,8,9]. В свою очередь, Ю. Г. Глебов, В. Н. Бибииков и В. Ф. Кулепов исследовали процессы резания асфальтобетонных покрытий диско-фрезерными рабочими органами в реальных условиях, решая вопросы взаимодействия пассивных рабочих органов с предварительно разогретым асфальтобетоном [10].

Асфальтобетонное покрытие дороги состоит из самого покрытия, основания и дополнительного слоя основания изображенных на рисунке. 1-а, б, в, г. Типовые конструкции дорожных одежд для городских улиц включают: а – трехслойные основания из крупнозернистого асфальтобетона и известнякового щебня; б - крупнозернистого асфальтобетона и тощего бетона; в, г - двухслойные основания из монолитного бетона: 1 – покрытие; 2 – верхний слой основания; 3, 4 – несущие слои основания; 5 – дополнительный слой (дренирующий) основания; 6 – грунт земляного полотна. Покрытие принимает вертикальные и горизонтальные

нагрузки от транспорта и воздействие атмосферных факторов, поэтому оно должно быть износостойким, термостойким, водопроницаемым, ровным и шероховатым. Основание распределяет нагрузку по земляному полотну, предотвращая накопление остаточных деформаций, которые могут вызвать расслоение слоев [2].

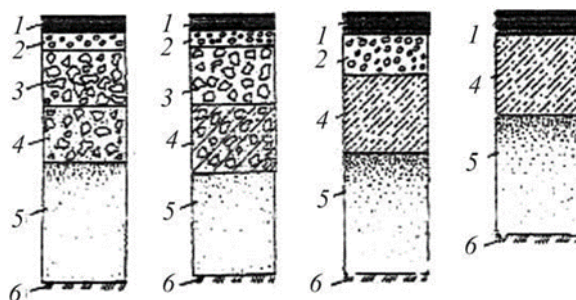


Рисунок 1 – Асфальтобетонное покрытие дорожной одежды [2]

Известно, что снижение прочности нежестких дорожных конструкций ведет к появлению трещин, колеиности, выбоин, просадок и проломов. Это может быть связано с переувлажнением грунтов земляного полотна, заиливанием нижних слоев дорожного основания, растрескиванием слоев дорожной одежды или их сочетании.

Необратимые деформации дорожных покрытий происходят из-за погодных условий и износа от автомобильного транспорта, что снижает эффективность автоперевозок. Ремонт изношенных участков требует использования строительной техники.

В неблагоприятных климатических и гидрологических условиях под воздействием движения транспорта ухудшаются эксплуатационные характеристики дорог. Анализ исследований показывает недостаток данных о параметрах фрезерных рабочих органов для обработки твердых грунтов и асфальта. Для разработки таких поверхностей необходимо создать рабочий орган, который обеспечит отделение разрезанного материала и его подачу основным рабочим органом.

Результаты и обсуждение

Ранее авторами были проведены работы [11,12] по созданию многофункционального рабочего органа гидравлического экскаватора. Получен патент Республики Казахстан на рабочий орган с механическим приводом для нарезания асфальта № 5564 от 13.11.2020 [13].

Дополнительный режущий орган в виде дисков для нарезания асфальта или горных пород повышает производительность экскаватора, уменьшая износ зубьев ковша и снижая эксплуатационные расходы. Исследования показали, что использование дополнительного оборудования уменьшает износ ковша. На основании данных предложена модель навесного оборудования, приведенная на рисунке 2.

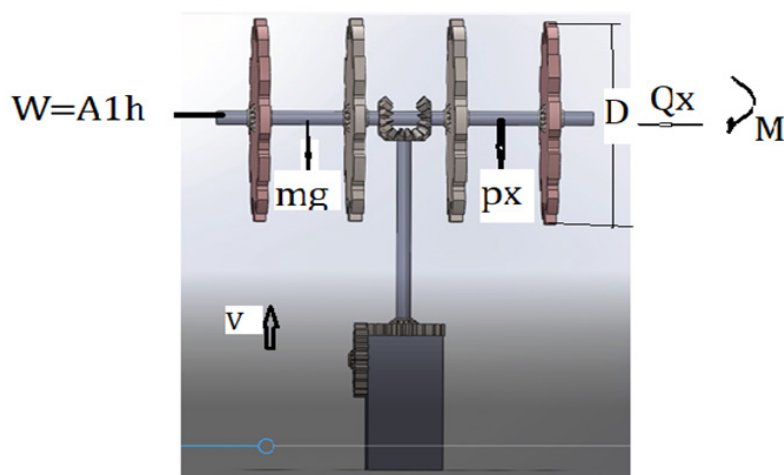


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на дисковый рабочий орган

Рабочий орган экскаватора включает диски с ножами (фрезы), передаточный механизм из звездочек и цепной передачи или конический редуктор, получающий вращение от коробки передач. Основные узлы: диски с ножами, вращаемые валом, соединенные с цепной передачей и получающие вращение от вала отбора мощности экскаватора МТЗ-92 через конический редуктор.

Дополнительный рабочий элемент - режущие диски - выполняют процесс вскалывания асфальтового покрытия передней гранью диска. При этом грунт уплотняется и в нем возникают внутренние напряжения. Когда напряжения превышают предел сопротивления сдвигу, грунт начинает двигаться. Режущая часть диска, продвигаясь вперед, воздействует на следующий участок, повторяя процесс. Отделенные части грунта формируют стружку, которая перемещается вперед. В процессе рыхления и разрушения асфальта, твердого грунта или другого материала диски играют ключевую роль, защищая участки граней и кромок ножей ковша от абразивного износа. Это увеличивает срок службы ножей и повышает работоспособность рабочего органа. Износ ножей ковша уменьшается, так как они в основном контактируют с уже разрушенным и ослабленным материалом. Преимущество предлагаемой конструкции оборудования заключается в том, что оно может быть установлено на стандартное тракторное полноприводное колесное оборудование с минимальными затратами на модернизацию.

В этой работе рассматриваются задачи, связанные с определением зависимостей между следующими параметрами:

- кинематическими характеристиками рабочего органа: скоростью подачи рабочего органа в направлении движения добывающего комплекса и скоростью его вращения;
- физико-механическими свойствами снятого асфальтового слоя: сопротивлением смятию, сопротивлением срезу и плотностью;
- конструктивными параметрами рабочего органа: диаметром фрез, длиной вала, на который насажены фрезы, и количеством фрез.

Математическая модель дискового рабочего органа, предназначенного для разработки отработанной асфальтной поверхности, была построена на основе анализа сил, действующих на рабочий орган. В результате была составлена система уравнений, описывающая движение дискового рабочего органа, которая выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m + \frac{\rho z}{g} V \frac{dV}{dz} = Ah - Q - mg \sin \alpha - \rho z \cdot \sin \alpha \\ M = b \cdot R \cdot h + (m + \rho z) R^2 \omega^2 \end{array} \right. \quad (1)$$

Допущения:

- пренебрегаем гидростатическими силами, в том числе архимедовой,
- взаимодействие с базовой машиной сводится к силе подачи.

Опыт работы по разработке асфальтного покрытия показал, что на рабочий орган будут действовать следующие силы. На рисунке 2 представлена схема сил, действующих на фрезерный рабочий орган при разработке изношенных асфальтных покрытий.

Условные обозначения:

m – масса рабочего органа, кг;

z – перемещение рабочего органа, м;

V – скорость перемещения (подачи) рабочего органа, м/с;

$A1$ – усилие подачи рабочего органа, Н;

dz – элементарное приращение подачи, м;

mg – сила тяжести рабочего органа, Н;

G – сила тяжести разрабатываемой поверхности на единицу длины рабочего органа, Н/м;

ρz – сила тяжести разрабатываемой поверхности, находящейся на рабочем органе (между фрезами), Н. В этот параметр входит высота фрезы, внедряемая в поверхность для резки, равная h – толщине отделяемой стружки, м;

ρ – плотность асфальта, кг/м³;

$W_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления перемещению рабочего органа от асфальтной поверхности, Н;

$A1$ – удельная сила сопротивления перемещению рабочего органа (сопротивление подаче) – зависит от физико-механических свойств асфальта и конструктивных параметров рабочего органа на единицу толщины срезаемого слоя, Н/м;

M – крутящий момент на валу рабочего органа, Н*м;

$D=2R$ – внешний диаметр диска (фрезы), м;

l – длина рабочего органа, м;

S – лобовая площадь рабочего органа, м²;

α – угол наклона рабочего органа к горизонту, рад;

β – угол наклона диска (фрезы) от перпендикуляра к оси вала, рад;

K_1 – удельная сила сопротивления вращению рабочего органа при разрушении асфальта (сопротивление срезу) – зависит от физико-механических свойств асфальта и конструктивных параметров рабочего органа, определяет величину момента, необходимого для отделения (разрушения) слоя толщиной h , м;

ω – угловая скорость вращения рабочего органа, c^{-1} ;

mg – сила тяжести рабочего органа;

R – радиус режущего диска, м;

ρ – плотность асфальта;

V – скорость перемещения рабочего органа;

b – ширина резания.

Момент на рабочем органе равен сумме моментов, возникающих из-за сопротивления резанию, и момента инерции вращающихся масс.

Введя обозначения $A = \frac{A_1}{\sin\alpha}$, $Q = \frac{Q_1}{\sin\alpha}$ преобразив первое уравнение

системы и выразив через глубину резания h , получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(mg+\rho z)}{g} \cdot V \frac{dV}{dz} = Ah - Q - \rho z \\ h = \frac{M-(m+\rho z)R^2\omega^2}{bR} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Выражая из первого уравнения $V \frac{dV}{dz}$, получим

$$\left\{ \begin{array}{l} V \frac{dV}{dz} = \frac{A \cdot h - Q - \rho z}{mg + \rho z} g \\ h = \frac{M - (m + \rho z) R^2 \cdot \omega^2}{bR} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

подставляя второе уравнение системы в первое получим

$$V \frac{dV}{dz} = \left[\frac{A \cdot (M - (m + \rho z) R^2 \cdot \omega^2)}{bR} - Q - \rho z \right] g; \quad (4)$$

$$V \frac{dV}{dz} = \left[A \frac{M}{bR} - \frac{A \cdot M \cdot R^2 \omega^2}{bR} - \frac{A \cdot \rho \cdot z R^2 \omega^2}{bR} - Q - \rho \right] g$$

введем обозначение $c = A/b$, тогда $V \frac{dV}{dz} = \frac{(cR^2\omega^2 + R)}{R(mg + \rho z)} \rho z g$.

В начальный момент

$$C(M - mR^2\omega^2) = QR;$$

$$V \frac{dV}{dz} = \left[\frac{cM - cmR^2\omega^2 - QR}{R(mg + \rho z)} - \frac{cR^2\omega^2 + R}{R(mg + \rho z)} \right] \rho z g$$

$M = mR^2\omega^2$, т.е. нет налипшего асфальта. Момент сопротивления равен моменту инерции, тогда $V \frac{dV}{dz} = \frac{cR^2\omega^2 + R}{R(mg + \rho z)} \rho z g$, решая это уравнение получим

$$\int VdV = \frac{cR^2\omega^2 + R}{R} \cdot \rho z \int \frac{zdz}{mg + \rho z},$$

$$\frac{V^2}{2} = \frac{(cR^2 + 1)g}{\rho} \cdot [\rho z + mg(1 - \ln[\rho z + mg])]$$

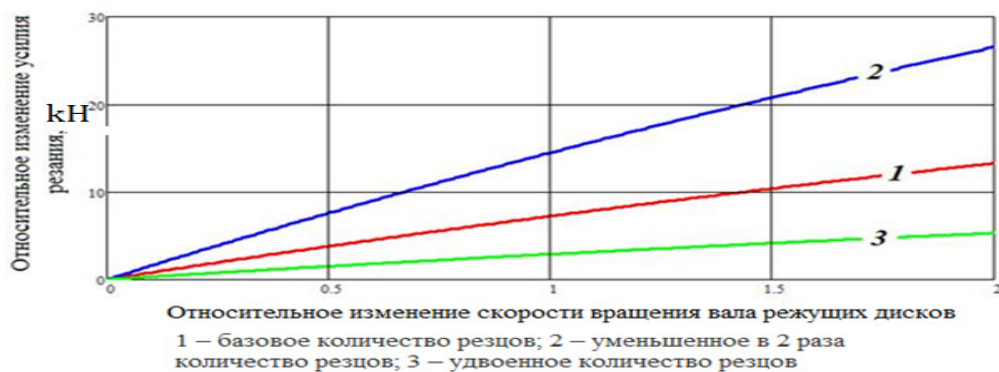
Скорость перемещения рабочего органа –дисковых фрез.

$$V = \sqrt{\frac{2(c-R\omega^2+1)g}{\rho} [\rho z + mg(1 - \ln[\rho z + mg])]}$$

где скорость резания V- функция от глубины h, радиуса диска R, плотности обрабатываемой поверхности ρ , оборота вала навесного оборудования, массы режущих дисков, $V=f(h=A/b, \omega, R, \rho, m)$.

$$F_{рез} = b \cdot h \cdot k_b; \quad V_0 = \omega R$$

Отношение изменения силы резания к числу режущих дисков представлено на рисунке 3.



1-базовое количество резцов; 2-уменьшенное в 2 раза;
3-удвоенное количество резцов

Рисунок 3 – График, показывающий зависимость относительного изменения усилия резания от числа режущих дисков.

Зависимость силы резания $P_{рез}$ от длины резания l представлена на рисунке 4.

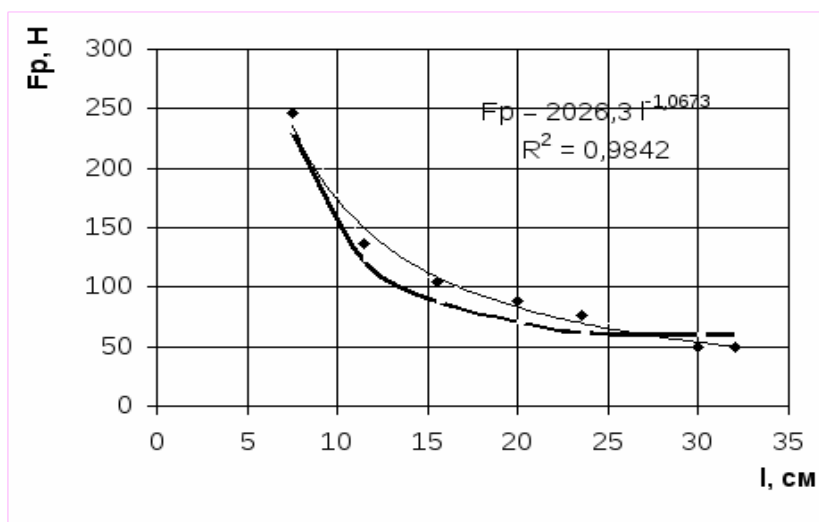


Рисунок 4 – Зависимость Р рез от длины резания, где R^2 – коэффициент корреляции

Анализ статического напряжения режущих зубьев фрезы представлен на рисунке 5.

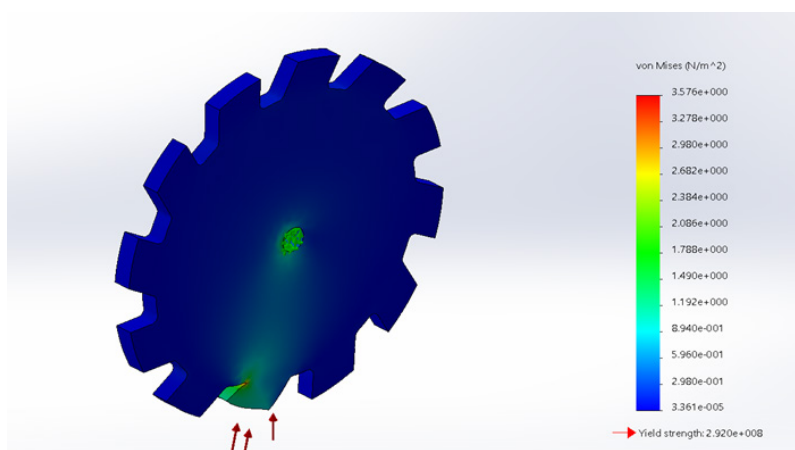


Рисунок 5 – Напряженное состояние режущего диска

На рисунке 6 представлен статический анализ напряжений режущих зубьев фрез.

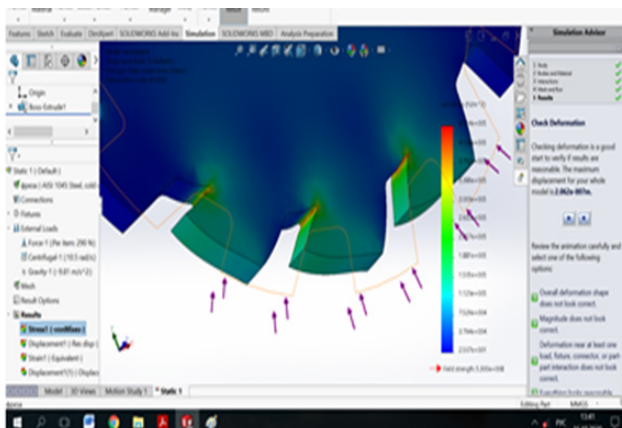


Рисунок 6 – Статический анализ напряжения режущих зубьев фрез

На рисунке 7 показаны изменения сопротивления асфальта разрушению в зависимости от колебаний силы резания и их изменения по глубине проходки.

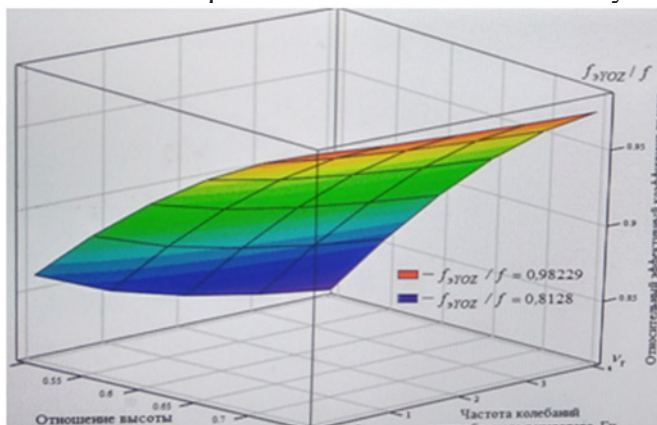


Рисунок 7 – Относительный коэффициент трения режущих дисков об асфальт, зависимости от высоты резания к диаметру: h/D и от частоты колебания вала

Выводы

1 Модернизация рабочих органов ГЭ на основе МТЗ расширяет технологические возможности машин за счет оснащения их набором сменных быстро устанавливаемых рабочих элементов.

2 Экспериментальные исследования показали, что относительный коэффициент трения находится в диапазоне 0,81-0,98.

3 Установлено, что наиболее напряженно-деформированной частью режущего органа является кромка зуба режущего элемента - диска.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Ширяев, А. О., Высоцкая, М. А.** Минеральный порошок в современной системе проектирования асфальтобетонных смесей. Вестник БГТУ им.В.Г. Шухова № 2, 2022 г., С. 8–16.
- 2 **Абезгауз, В. Д.** Режущие органы машин фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов. М.: Машиностроение, 1965. – С. 280.
- 3 **Баловнев, В. И., Хмара, Л. А.** Повышение производительности машин для земляных работ К.: Будивэльнык, 1988. – 152 с.: ил. формат pdf размер 3,42 МБ добавлен 30 сентября 2012 г.
- 4 **Белецкий, Б. Ф.** Строительные машины и оборудование / Б. Ф. Белецкий, И. Г. Булгакова. – СПб. : Лань, 2012. – 608 с.
- 5 **Волков, Д. П., Алешин Н. И. и др.** Строительные машины и оборудование, М. – 2016 г, добавлен формат djvu размер 9.35 МБ
- 6 **Ветров, Ю. А.** Строительные, дорожные машины и оборудование.-Киев: Вища школа, 2010. – 370с.
- 7 **Гальперин, М. И., Домбровский, Н. Г.** Строительные машины М.: Машиностроение, 2000. – 342 с.
- 8 **Недорезов, И. А., Звягинцев, А. Н., Исаев, О. К.** Навесной рыхлитель к гидравлическим экскаваторам. Строительные и дорожные машины. – 1978. – С. 6–7.
- 9 **Зеленин, А. Н., Баловнев, В. И., Керов, И. П.** Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. – 2. Сазамбаева Б. Т., Тогизбаева Б. Б., Маханов, Сарсенбаев Б. К расчету многоцелевых рабочих органов гидравлических экскаваторов//Компьютерное моделирование многоцелевого рабочего оборудования одноковшового экскаватора.
- 10 **Кулепов, В. Ф.** Исследование процесса резания асфальтобетонных покрытий диско-фрезерными машинами//РГБ, научный электронный архив. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004028111/27.12.2019>.
- 11 **Сазамбаева, Б. Т., Тогизбаева, Б. Б., Маханов, М., Джундибаев, В. Е., Канаева, Ж.** К вопросу определения напряженно-деформированного состояния режущего диска рабочего оборудования гидравлического экскаватора/ «Механика и технологии». – Тараз, ТГУ имени М. Х. Дулати. – 2019.
- 12 **Togizbaeva, B. B., Karazhanov, A. A., Kenesbek, A. B.** « Simulation of operation of neural network with purpose of utilization of hydraulic actuators in complicated technical conditions»/ INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING, Volume:13 Issue 1, pages:11-19, DoI:10.25165/j.igabe20201301.3965 Published: JAN 2020. View Journal Impact.
- 13 **Сазамбаева, Б. Т., Тогизбаева, Б. Б., Масанов, Г. К., Балабекова, К. Г.** Патент на полезную модель за номером 5564 Класс МПК E02F3/40, номер заявки 2020/0616.2 Модель рабочего органа с механическим приводом для нарезания асфальта.

REFERENCES

1 **Shiryayev, A. O., Vysockaya, M. A.** Mineral'nyj poroshok v sovremennoj sisteme proektirovaniya asfal'tobetonyh smesey [Mineral powder in the modern asphalt concrete mix design system.]. Vesnik BGTU im.V.G.SHuhova № 2. – 2022. – P. 8 – 16.

2 **Abezgauz, V. D.** Rezhushhie organy` mashin frezernogo tipa dlya razrabotki gornyx porod i gruntov [Cutting bodies of milling machines for mining rocks and soils]. M.: Mashinostroenie, 1965. – 280 p.

3 **Balovnev, V. I., Xmara, L. A.** Povyshenie proizvoditel'nosti mashin dlya zemlyany`x rabot [Improving the productivity of earthmoving machines]: Budivel'nyk, 1988. – 152 p.: il. format pdf razmer 3,42 MB dobavlen 30 sentyabrya 2012.

4 **Beleczkij, B. F.** Stroitel'ny'e mashiny` i oborudovanie [Construction machinery and equipment] / B. F. Beleczkij, I. G. Bulgakova. – SPb.: Lan`, 2012. – 608 p.

5 **Volkov, D. P., Aleshin, N. I. i dr.** Stroitel'ny'e mashiny` i oborudovanie [Construction machinery and equipment], M. – 2016, dobavlen format djvu razmer 9.35 MB

6 **Vetrov, Yu. A.** Stroitel'ny'e, dorozhny'e mashiny` i oborudovanie [Construction, road machinery and equipment].-Kiev: Vishha shkola, 2010.-370s.

7 **Gal'perin, M. I., Dombrovskij, N. G.** Stroitel'ny'e mashiny [Construction machines] M.: Mashinostroenie, 2000. – 342 p.

8 **Nedorezov, I. A., Zvyaginцев, A. N., Isaev, O. K.** Navesnoj ry`xlitel` k gidravlicheskim e`kskavatoram. Stroitel'ny'e i dorozhny'e mashiny [Mounted ripper for hydraulic excavators. Construction and road vehicles]. – 1978. – P. 6–7.

9 **Zelenin, A. N., Balovnev, V. I., Kerov, I. P.** Mashiny` dlya zemlyany`x rabot [Machines for earthworks]. M.: Mashinostroenie, 1975. 2. Sazambaeva B. T., Togizbaeva B. B., Maxanov, Sarsenbaev B. K raschetu mnogocelevy`x rabochix organov gidravlicheskih e`kskavatorov //Komp'yuternoe modelirovanie mnogocelevogo rabocheho oborudovaniya odnokovshovogo e`kskavatora.

10 **Kulepov, V. F.** Issledovanie processa rezaniya asfal'tobetony`x pokry'tij disko-frezerny`mi mashinami [Investigation of the process of cutting asphalt concrete pavements with disc milling machines] //RGB, nauchny`j e`lektronny`j arxiv. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004028111/27.12.2019>.

11 **Sazambaeva, B. T., Togizbaeva, B. B., Maxanov, M., Dzhundibaev, V. E., Kanaeva, Zh.** K voprosu opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rezhushhego diska rabocheho oborudovaniya gidravlicheskogo e`kskavatora [On the issue of determining the stress-strain state of the cutting disc of the working equipment of a hydraulic excavator]/ «Mexanika i texnologii». – Taraz, TGU imeni M. X. Dulati. 2019.

12 **Togizbaeva, B. B., Karazhanov, A. A., Kenesbek, A. B., Kokosila, M.** «Simulation of operation of neural network with purpose of utilization of hydraulic actuators in complicated technical conditions»/ INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING, Volume:13 Issue 1, pages:11-19, Dol:10.25165/j.igabe20201301.3965 Published: JAN 2020. View Journal Impact.

13 Sazambaeva B. T., Togizbaeva B. B., Masanov G. K., Balabekova K. G. Patent na poleznuyu model' za nomerom 5564 Klass MPK E02F3/40 [Utility model patent number 5564 IPC Class E02F 3/40], nomer zayavki 2020/0616.2 Model' rabocheho organa s mexanicheskim privodom dlya narezaniya asfalta.

Поступило в редакцию 16.03.24.

Поступило с исправлениями 16.09.24.

Принято в печать 02.10.2024.

А. Т. Тұрдалиев¹, Б. Т. Сазамбаева², Р. С. Үстемірова³, А. П. Карпов⁴

^{1,3,4}Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.,

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

16.03.23 ж. баспаға түсті.

16.09.24 ж. түзетулерімен түсті.

02.10.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ШӨМІШТІ ЭКСКАВАТОРЛАРДЫҢ ФРЕЗЕРЛІК ЖҰМЫС ОРГАНЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада пайдаланылған асфальтты кесуге арналған фрезерлік кескіш құрылғыларды әзірлеу саласындағы алдыңғы зерттеулерге талдау ұсынылған. Аспалы жабдықтың жұмыс органының кинематикалық параметрлері, асфальттың физикалық-механикалық қасиеттері, жұмыс органының құрылымдық параметрлері қарастырылады. Топсалы жұмыс органының қозғалысын сипаттайтын теңдеулер жүйесі негізінде жасалған математикалық модель негізінде оның оңтайлы параметрлері жасалды.

Шөмішті экскаваторлардың фрезерлік жұмыс органын математикалық модельдеу экскавация процесін оңтайландыру мен жақсартудың маңызды құралы болып табылады. Модельдеу шелектің өлшемі, айналу жылдамдығы, кесу тереңдігі, шабуыл бұрышы және жұмыс органының өнімділігі мен сапасына әсер ететін басқа факторлар сияқты әртүрлі параметрлерді ескеруге мүмкіндік береді.

Математикалық модельдердің көмегімен фрезерлік жұмыс органының тиімділігі мен тозуын азайту үшін оның пішіні мен дизайнын оңтайландыруға болады. Модельдеу сонымен қатар жұмыс органындағы кернеулер мен деформацияларды талдауға мүмкіндік береді, бұл оның беріктігі мен беріктігін жақсартуға мүмкіндік береді. Фрезерлік жұмыс органын математикалық модельдеудің негізгі міндеттерінің бірі-ең аз энергия шығыны мен жабдықтың тозуы кезінде максималды өнімділікке жету үшін кесу процесін оңтайландыру.

Кілтті сөздер: жол киімдері, экскаватор, қондырмалар, жүктежелер, қозғалыс теңдеуі, кесу күші.

A. Turdaliev¹, B. Sazambayeva², R. Ustemirova³, A. Karpov⁴

^{1,3,4}International University of Transport and Humanities,

Republic of Kazakhstan, Almaty

²L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana

Received 16.03.24.

Received in revised form 16.09.23.

Accepted for publication 02.10.24.

MATHEMATICAL MODELING OF THE MILLING WORKING BODY OF BUCKET EXCAVATORS

This article provides an analysis of previous research in the field of development of milling cutting devices for cutting used asphalt. The kinematic parameters of the working body of the attachments, the physical and mechanical properties of asphalt, and the design parameters of the working body are considered. Based on a mathematical model compiled on the basis of a system of equations describing the movement of a hinged working body, its optimal parameters have been developed. Mathematical modeling of the milling working body of bucket excavators is an important tool for optimizing and improving the excavation process. Modeling allows you to take into account various parameters such as bucket size, rotation speed, cutting depth, angle of attack and other factors that affect the productivity and quality of the working body.

Using mathematical models, it is possible to optimize the shape and design of the milling working body in order to increase its efficiency and reduce wear. Modeling also allows the analysis of stresses and deformations in the working body, which improves its strength and durability.

One of the main tasks of mathematical modeling of a milling working body is to optimize the cutting process in order to achieve maximum productivity with minimal energy consumption and equipment wear.

Keywords: road clothes, excavator, attachments, loads, equation of motion, cutting force.

***Ж. Е. Шукманов¹, Г. А. Сүлейменова², М. Б. Орунбеков²,
Л. Н. Есмаханова¹, Б. Б. Тлемисов¹**

¹М.Х.Дулата атындағы Тараз университеті, Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

²М.Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7099-8441>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0220-4053>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0049-6224>

*e-mail: shukamanov@bk.ru

ПҚИРЖ-Е ЖҮЙЕСІНДЕ РАДИОБАЙЛАНЫСТЫҢ РҰҚСАТ ЕТІЛГЕН ЕҢ ҰЗАҚ БОЛМАУ УАҚЫТЫН ЕСЕПТЕУ

Бұл мақалада радиобайланыс негізінде пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінде радиобайланыстың рұқсат етілген ең ұзақ болмау уақытын есептеу әдісі қарастырылған. Қазақстан Республикасының теміржол желісінде соңғы үлгідегі радиобайланыс арнасының негізінде жұмыс істейтін пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесі қарқынды енгізіліп келеді. Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінің бұл түрінде жылжымалы блок-телімдері қолданылады. Бұл жүйе қазіргі таңда «Қазақстан темір жолы» Ұлттық компаниясы» акционерлік қоғамына қарасты Узень – Болашақ (143 км), Жетыген – Алтынкөл (280 км), Арқалық-Шұбаркөл (214 км), Шалқар – Бейнеу (471 км) және Жезқазған-Сексеуіл (517 км) теміржол телімдеріне енгізілген. Алайда, қазіргі таңда радиобайланыс негізінде пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесі эксплуатацияға берілген теміржол телімдерінде радиобайланыс орталығы мен пойыз құрамының борттық жүйесі арасында радиобайланыстың жоғалуы кең байқалуда. Радиобайланыстың жоғалуы неғұрлым ұзақ уақытқа созылуы, пойыздар қозғалыс графигінің орындалуына үлкен кері әсерін тигізеді. Осы орайда, мұндай жүйелерде радиобайланыс арнасының рұқсат етілген ең ұзақ болмау уақытын есептеу арқылы, радиобайланысты қалпына келтіру уақытының максималды шегін белгілеу өзекті мәселелердің бірі. Мақалада көрсетілген есептеу әдістерін тәжірибеде қолдану арқылы, радиобайланысты қалпына келтіруге кететін уақытты ескере отыра, жүйенің тоқтаусыз жұмыс істеуі үшін, осы уақыт аралығына резервті байланыс арнасын қолдану мүмкіндігін қарастыруға болады.

Кілтті сөздер: пойыз аралық интервал, радиобайланыс, блок-телім, базалық станция, интервалды реттеу.

Кіріспе

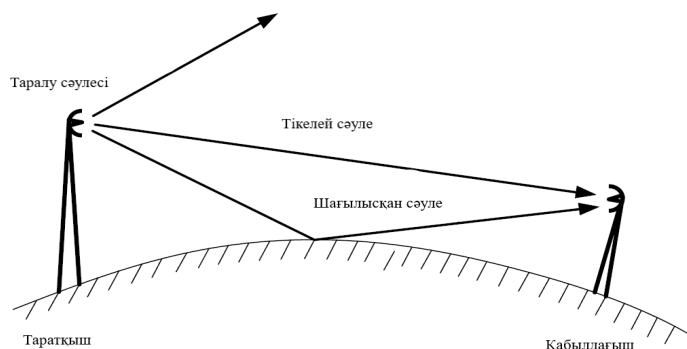
Цифрлық радиоарна базасындағы пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесі радио блоктау принциптері негізінде жұмыс істейді. Қазіргі уақытта цифрлық радиоарна базасындағы пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінде TETRA, GSM-R және DMR цифрлы радиобайланыс стандарттары қолданады. Бұл стандарттар ультрақысқа толқынды диапазондарды пайдаланады (УКВ) [1].

Ионосферадан ультра қысқа толқындар шағылыспайды, олар еркін өтеді, яғни бұл толқындарда кеңістіктік ионосфералық толқын болмайды. Беттік ультра-айналмалы толқынның екі маңызды кемшілігі бар:

- ол жер бетін және үлкен кедергілерді айналып өтпейді;
- топырақта қатты сінеді.

Ультра қысқа толқындар кіші радиусты радиостанция іс-әрекеті кезінде кеңінен қолданылады, байланыс әдетте тікелей көріну шектерімен шектеледі (50–60 км) немесе бұл қашықтықтан сәл асады (80–100 км) [2].

Бұл жағдайда байланыс кеңістіктік тропосфералық толқынмен жүзеге асырылады. Ультрақысқа диапазондағы радиотолқындарының таралуы 1-суретте көрсетілген.



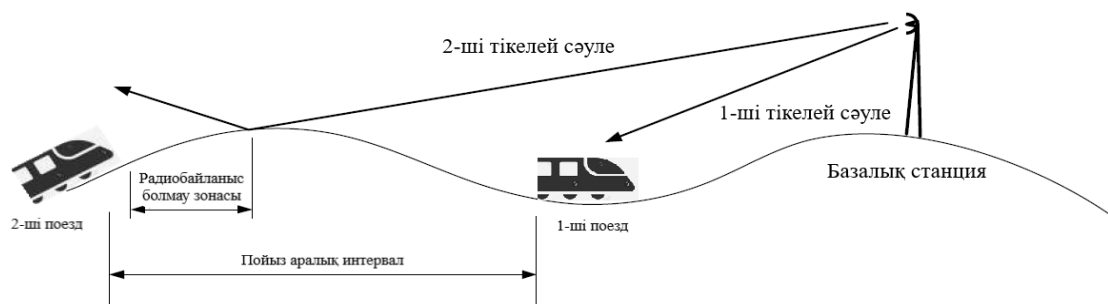
Сурет 1 – Қысқа толқынды диапазондағы толқындардың таралуы

УКВ-диапазон радиотолқындарының таралу проблемаларын шешу үшін жиілік-аумақтық жоспарлау (ЧТП) қолданылады. Байланыс желілерін жиіліктік-аумақтық жоспарлау жылжымалы объектілермен желінің құрылымын (конфигурациясын), базалық станцияларды (БС) орнату орнын таңдауды, антенналардың типін, биіктігін және бағдарын таңдауды, базалық станциялар арасында жиіліктерді бөлуді көздейді. Күрделі шығындарды азайту үшін жиілік-аумақтық жоспарды оңтайландыру қажет, яғни оны әзірлеу қажет, яғни берілген қызмет көрсету аймағын, желінің сыйымдылығын, базалық станциялардың ең аз саны мен пайдаланылатын жиіліктер кезінде талап етілетін қызмет көрсету сапасын қамтамасыз ететін жоспарды жүзеге асыру қажет.

Қос қабатты желіні құру, сонымен қатар көрші базалық станциялар арасындағы жиілік ресурсы мен электромагниттік үйлесімділікті бөлу экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Сондықтан, ЧТП сәйкес базалық станциялар теміржол бойымен ауарайының нашар жағдайында көрші базалық станциялар арасында «нашар аймақтардың» болмауын ескере отырып орнатылады. Белгілі бір базалық станция қамту аймағының шегінде аралықтағы немесе станциядағы барлық пойыздарға тек осы базалық станция қызмет көрсетеді [2].

Материалдар және әдістері

Жер бедерінің қатты өзгеру мүмкіндігін және оның ерекшелігін ескере отырып, цифрлық радиоарна базасында пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінің жұмысында жыралар мен арқалықтардағы радиобайланыстың болмауы (үнсіздік аймағы) радиоблоктау орталығының (РБЦ) мен жүріп келе жатқан пойыз арасында туындауы мүмкін, ол үшін мақсат қою нүктесіне қауіпсіз тежеу қисығы есептеледі. Радиобайланыстың болмау аймағы 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Радио байланыстың болмау зонасы

Радиобайланыстың болмау зонасын ескере отыра, екі пойыз арасындағы қашықтықты келесі формуламен анықтауға болады:

$$\Delta S = g_{i+1}(t) - g_{i+2}(t) \tag{1}$$

мұнда:

ΔS - 2 пойыздың мақсатты нүктеге дейін қауіпсіз тежеу қисығы;

$g_{i+1}(t)$ және $g_{i+2}(t)$ – тиісінше 1 және 2 пойыздардың ағымдағы координаттары (одометрияның бортық құрылғыларымен айқындалады).

Осыған байланысты пойыздар қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету критерийіне және пойыздар қозғалысының өткізу қабілетін төмендету критерийіне әсер етпейтін цифрлық радиоарна базасында пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінің жұмысында жүріп келе жатқан пойыз және РБЦ арасында радиобайланыстың болмауының рұқсат етілген ең ұзақ уақытын айқындау қажет.

Пойыз құрамдарының рұқсат етілген минималды ара қашықтығы келесі формуламен анықталады:

$$L_{u \min} > S_1 + S_{\text{запас}} \quad (2)$$

мұнда

S_1 – поездың максималды тежеу жолы;

$S_{\text{запас}}$ – поездаралық аралықтың блок-учаскенің ұзындығынан үлкен немесе оған тең қоры.

Аралықтардағы пойыздар қозғалысын интервалдық реттеу жүйелеріне қойылатын пайдалану-техникалық талаптарға сәйкес локомотив машинисі локомотивті қолдана отырып тоқтату үшін жеткілікті, бірінен соң бірі жүретін поездардың қауіпсіз аралығының қоры кемінде 300 м болуы тиіс, яғни $S_{\text{запас}} = 300$ м. 1 кестеде пойыздар жүруінің ең аз рұқсат етілген аралығының мәндері S_1 және $L_{u \min}$ мәндері келтірілген.

Кесте 1 – Пойыз құрамдарының ең жоғары тежеу жолының және ең аз рұқсат етілген аралығының мәндері

$V_{1\phi}$, км/сағ	30	40	50	60	70	80
S_1 , м	200	350	550	790	1075	1400
$L_{u \min}$, м	500	650	850	1090	1375	1700

Жалпы түрде жүйенің жұмысында радиобайланыстың болмауының рұқсат етілген ең ұзақ уақыты радиоарна базасындағы пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінде келесі формула бойынша анықталатын болады [3]:

$$t_{\text{max доп}} = t_1 - t_2, \quad (3)$$

мұнда:

t_1 – ең жоғары рұқсат етілген қозғалыс жылдамдығымен 2-ші пойыздың жүру уақыты;

t_2 – шұғыл тежеу кезінде 1- пойызбен жұмсалатын уақыт (толық тоқтауға дейін).

Ол келесі формуламен анықталады [3]:

$$t_2 = \frac{V_{1\text{max}} - V_{1\phi}}{a_{1\text{max}}}, \quad (4)$$

мұнда:

$V_{1\text{max}}$ – осы учаскедегі 1-ші пойыздың рұқсат етілген ең жоғары қозғалыс жылдамдығы;

$V_{1\phi}$ – радиобайланыс жоғалған сәтте 1-ші пойыздың нақты қозғалыс жылдамдығы (поезд толық тоқтаған жағдайда $V_{1\phi} = 0$ м/с);

$a_{1\text{max}}$ – 1-ші пойыздың максималды тоқтату үдерісі, м/с², ол келесі формуламен анықталады [3]:

$$a_{1\max} = \frac{V_{1\max}^2}{2S_1}, \quad (5)$$

мұнда:

S_1 – 1-ші пойыздың максималды тежеу жолы.

Нәтижелер және талқылау

Жоғарыдағы көрсетілген 5 формула бойынша, алдымен, 1-ші пойыздың максималды тоқтату үдерісін есептейміз:

$$a_{1\max} = \frac{80^2}{1400} = 4,57$$

Келесі кезекте шұғыл тежеу кезінде 1-поезбен жұмсалатын уақытты есептейміз:

$$t_2 = \frac{80-30}{4,57} = 10,9$$

Жүйенің жұмысында радиобайланыстың болмауының рұқсат етілген ең ұзақ уақыты келесідей есептеледі:

$$t_{\max \text{ доп}} = 35,5 - 10,9 = 24,6$$

Шұғыл тежеу кезінде 1-ші пойыз өтетін қашықтық S_{1T} мынадай формула бойынша анықталады:

$$S_{1T} = V_{1\phi} \cdot t_2 + \frac{a_{1\max} \cdot t_2^2}{2}.$$

Олай болса, жоғарыдағы көрсеткіштерді пайдалана отыра есептейміз:

$$S_{1T} = 80 \cdot 10,9 + \frac{4,57 \cdot 10,9^2}{2} = 1143,4 \text{ метр}$$

Пойыздардың қауіпті жақындасуының есептік қашықтығы (ықтимал соқтығысуға дейін) мынадай формула бойынша анықталады:

$$L_p = L_{\text{и min}} + S_{1T}$$

Олай болса, 1 кестеде көрсетілген мәнге сәйкес пойыздардың қауіпті жақындасуының есептік қашықтығын анықтаймыз:

$$L_p = 1700 + 1143,4 = 2843,4$$

Уақыт t_1 келесі формуламен анықталады:

$$t_1 = \frac{L_p}{V_{2max}}$$

L_p мәнін есепке ала отыра, t_1 мәнін есептейміз:

$$t_1 = \frac{2843,4}{80} = 35,5$$

1 кестеде көрсетілген мәндердің ішінде пойыз құрамының ең максималды жылдамдығы 80 км/сағ шамасын ала отыра, есептеулер жүргізудің нәтижесінде $t_{max доп} = 24,6$ минутқа тең болды.

Келесі теңдеу пойыздардың өткізу қабілетін төмендету критерийі үшін радиобайланыстың болмауының барынша рұқсат етілген уақытын айқындауға сәйкес келеді:

$$t_{c. п. с} = \frac{L_{и min} + [V_{1\phi} \cdot (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{V_{1max}^2}) + \frac{V_{1max}^2 \cdot (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{V_{1max}^2})^2}{2S_1}]}{V_{2max}} - \frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{V_{1max}^2} \quad (9)$$

1-ші пойыздың шұғыл тежеу кезінде толығымен тоқтаған жағдайда, пойыздар қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету критерийі үшін радиобайланыстың болмауының барынша рұқсат етілген уақытын анықтауға сәйкес келетін келесі теңдеуді аламыз:

$$t_{б. д} = \frac{L_{и min} + [V_{1\phi} \cdot (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{V_{1max}^2}) + \frac{V_{1max}^2 \cdot (\frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{V_{1max}^2})^2}{2S_1}]}{V_{2max}} - \frac{(V_{1max} - V_{1\phi}) \cdot 2S_1}{V_{1max}^2} = \frac{L_{и min} + S_1}{V_{2max}} - \frac{2S_1}{V_{1max}} \quad (10)$$

Радиобайланыстың болмауының барынша рұқсат етілген уақытының шамасы цифрлық радиоарна базасында пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінің бағдарламалық қамтамасыз етілуінде жазылуы тиіс [4].

Пойыздар қозғалысының ең аз жоларалық интервалы кезіндегі немесе қарқынды қозғалыс жағдайларында пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінде радиобайланыс қысқа мерзімді болмаудың барынша рұқсат етілген уақытының мәнін есепке алу – радиоарна негізінде поездардың қауіпті жақындасу ықтималдығын толығымен болдырмауға (пойыздар қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету критерийлерін іске асыруға) және жол берілетін пойыздар қозғалысының жылдамдық режимін сақтауға мүмкіндік береді (пойыздар қозғалысының өткізу қабілетін төмендету критерийлерін іске асыру).

Қаржыландыру

Мақала Қазақстан Республикасы ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылым Комитетінің қаржылық қолдауымен, ИРН АР22685501 «Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінің темір жол желілерінің өткізу қабілеттілігіне әсерін бағалау» жобасы аясында жүзеге асырылды.

Қорытынды

Радиоарна негізінде пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінде радиобайланыстың рұқсат етілген ең ұзақ болмау уақытын есептеу жүргізілді. Бүгінгі күнде темір жол желісіндегі пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесіндегі ең негізгі істен шығудың бірі, ол – радиобайланыстың үзілуі, яғни жоғалуы. Осының салдарынан аралықта пойыздар қозғалысын ұйымдастыруда қиындықтар туындап, қозғалыс қауіпсіздігіне толықтай қауіп төнеді. Осы жағдайды ескере отыра, радиобайланыстың рұқсат етілген ең ұзақ болмау уақытын есептеу арқылы бір бағытта жүріп келе жатқан пойыздың арасында қауіпсіз интервалды сақтап қалу шарасын ұйымдастыруға мүмкіндік беретін шешімдерді алуға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Воронин, В. А., Воробьев, В. В., Ермаков, Е. В.** Оптоволоконная рефлектометрия в системах интервального регулирования движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2020. – № 4. – С. 55–57.

2 **Шерстюков, О. С.** Основные направления развития систем интервального регулирования движения поездов на железных дорогах России // В сборнике: Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2019»). труды международной Научно-практической конференции: секция «Теоретические и практические вопросы транспорта». – 2019. – С. 162–165.

3 **Шерстюков, О. С.** Направления развития систем интервального регулирования движения поездов // В сборнике: естественные и технические науки: проблемы трансдисциплинарного синтеза. сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Белгород, 2020. – С. 61–65.

4 **Попов, А. Н.** Расчет рельсовых цепей. Учебно-методическое пособие по дисциплине «Автоматика и телемеханика на перегонах». – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2021. – 100 с.

5 **Канатбаев, Т. А.** Развитие бортовых систем безопасности на железных дорогах Казахстана // Железные дороги мира. – 2021. – № 12. – С. 67–70.

6 **Лисенков, В. М.** (ред.) Системы управления движением поездов на перегонах. Часть 3. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 174 с.

7 **Пшеничников, Л. Н.** Временные отдельные пункты на перегонах с АБТЦ // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 9. – С. 40–42.

8 **Демьянов, В. В., Скоробогатов, М. Э.** (сост.) Оборудование перегона и промежуточной станции устройствами автоматики и телемеханики. Учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2017. – 112 с

9 **Пшеничников, Л. Н.** Временные отдельные пункты на перегонах с АБТЦ // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 9. С. 40-42.

10 **Попов, П. А.** Интервальное регулирование на основе цифрового радиоканала / П. А. Попов, А. В. Озеров // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10

REFERENCES

1 **Voronin, V. A., Vorobyov, V. V., Ermakov, E. V.** Optovolokonnaya reflektometriya v sistemah interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Fiber-optic reflectometry in systems of interval regulation of train movement] // Railway transport. – 2020. – № 4. – P. 55–57.

2 **Sherstyukov, O. S.** Osnovnye napravleniya razvitiya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na zheleznyh dorogah Rossii [The main directions of development of systems of interval regulation of train traffic on the railways of Russia] // In the collection: Transport: science, education, production («Transport-2019»). proceedings of the International Scientific and Practical Conference: section «Theoretical and practical issues of transport». – 2019. – P. 162–165.

3 **Sherstyukov, O. S.** Napravleniya razvitiya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Directions of development of systems of interval regulation of train traffic] // In the collection: natural and technical sciences: problems of transdisciplinary synthesis. collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference. Belgorod, 2020. – P. 61–65.

4 **Попов, А. Н.** Raschet rel'sovyh cepej [Calculation of rail chains]. Educational and methodical manual on the discipline “Automation and telemechanics on stages”. – Yekaterinburg: Ural State University of Railway Engineering, 2021. – 100 p.

5 **Kanatbaev T. A.** Razvitie bortovyh sistem bezopasnosti na zheleznyh dorogah Kazahstana [Development of on-board safety systems on the railways of Kazakhstan] // Railways of the world. – 2021. – № 12. – P. 67–70.

6 **Lisenkov, V. M.** (ed.) Sistemy upravleniya dvizheniem poezdov na peregonah [Train traffic control systems on stages]. Part 3. M.: Educational and methodological center for education in railway transport, 2016. - 174 p.

7 **Pshenichnikov, L. N.** Vremennye razdel'nye punkty na peregonah s ABTC [Temporary separate points on the stretches from the ABTC] // Automation, communications, informatics. – 2016. – № 9. – P. 40–42.

8 **Demyanov, V. V., Skorobogatov, M. E.** (comp.) Oborudovanie pereгона i promezhutochnoj stancii ustrojstvami avtomatiki i telemekhaniki [Equipment of the stage and intermediate station with automation and telemechanics devices.] A study guide. – Irkutsk: IrGUPS, 2017. – 112 p.

9 **Pshenichnikov, L. N.** Vremennye razdel'nye punkty na peregonaх s АВТС [Temporary separate points on the stretches from the АВТС] // Automation, communications, informatics. – 2016. – № 9. – P. 40–42.

10 **Popov, P. A.** Interval'noe regulirovanie na osnove cifrovogo radiokanala [Interval regulation based on a digital radio channel] / P. A. Popov, A.V. Ozerov // Automation, communications, informatics. – 2016. – № 10.

18.10.24 ж. баспаға түсті.

02.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

04.11.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Ж. Е. Шукманов¹, Г. А. Сүлейменова², М. Б. Орунбеков²,**

Л. Н. Есмаханова¹, Б. Б. Тлемисов¹

¹Таразский университет имени М.Х. Дулати, Республика Казахстан, г. Тараз

²АЛТ университет имени М.Тынышпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 18.10.24.

Поступило с исправлениями 02.11.24.

Принято в печать 04.11.2024.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ ОТСУТСТВИЯ РАДИОСВЯЗИ В СИСТЕМЕ СИРДП-Е

В данной статье рассмотрен метод расчета максимально допустимого времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движения поездов на основе радиосвязи. На железнодорожной сети Республики Казахстан интенсивно внедряется система интервального регулирования движения поездов, функционирующая на базе канала радиосвязи последнего типа. В системе интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала используются подвижные блок-участки. В настоящее время данная система функционирует на участках железной дороги дислоцированных на базе Акционерного общества «Национальная компания» Қазақстан темір жолы» Узень – Болашақ (143 км), Жетыген – Алтынколь (280 км), Аркалык-Шубарколь (214 км), Шалкар – Бейнеу (471 км) и Жезказган-Саксаульская (517 км). Однако в настоящее время на железнодорожных участках, где введена в эксплуатацию система интервального регулирования движения поездов на основе радиосвязи, наблюдается большая потеря радиосвязи между центром радиосвязи и бортовой системой состава поездов. Чем дольше сохраняется потеря радиосвязи, тем большее негативное влияние поезда оказывают на выполнение графика движения. В этой связи одним из актуальных вопросов является установление максимального предела времени восстановления радиосвязи путем расчета максимально допустимого времени отсутствия канала радиосвязи в таких системах. Применяя на практике описанные в статье методы расчета, учитывая время, затрачиваемое на восстановление радиосвязи, можно рассмотреть возможность применения резервного канала связи на этот временной интервал для бесперебойной работы рассматриваемой системы.

Ключевые слова: межпоездной интервал, радиосвязь, блок-участок, базовая станция, интервальное регулирование.

***Zh. Shukamanov¹, G. Suleimenova², M. Orunbekov²,
L. Yesmakhanova¹, B. Plemissov¹**

¹M. H. Dulati Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz

²ALT University named after M. Tynyshpaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 18.10.24.

Received in revised form 02.11.24.

Accepted for publication 04.11.24.

CALCULATION OF THE MAXIMUM ALLOWABLE TIME OF ABSENCE OF RADIO COMMUNICATION IN THE SIRDП-E SYSTEM

This article discusses a method for calculating the maximum allowable time of absence of radio communication in interval train control systems based on radio communication. A system of interval regulation of train traffic, operating on the basis of a radio communication channel of the latter type, is being intensively implemented on the railway network of the Republic of Kazakhstan. Mobile block sections are used in the system of interval control of train traffic based on the radio channel. Currently, this system operates on sections of the railway stationed on the basis of the Joint-Stock Company «National Company»Kazakhstan Temir Zholy» Uzen – Bolashak (143 km), Zhetygen - Altynkol (280 km), Arkalyk-Shubarkol (214 km), Shalkar –Beineu (471 km) and Zhezkazgan-Saksaulskaya (517 km). However, at present, on railway sections where a radio-based interval train control system has been put into operation, there is a large loss of radio communication between the radio communication center and the on-board train system. The longer the loss of radio communication persists, the greater the negative impact trains have on the schedule. In this regard, one of the urgent issues is to establish the maximum time limit for restoring radio communications by calculating the maximum allowable time of absence of a radio communication channel in such systems. Applying in practice the calculation methods described in the article, taking into account the time spent on restoring radio communications, it is possible to consider the possibility of using a backup communication channel for this time interval for the smooth operation of the system in question.

Keywords: inter-train interval, radio communication, block section, base station, interval regulation.

СТРОИТЕЛЬСТВО

МРНТИ 81.33.35

Г. А. Ульева¹, В. В. Меркулов², *А. А. Епанешникова³¹АО «Qarmet», Республика Казахстан, г. Темиртау^{2,3}Карагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3600-1318>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-3890>³ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8295-1367>*e-mail: a.epaneshnikova@tttu.edu.kz**РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
КОРРОЗИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ**

В данной работе были получены сополимеры, отработана методика их синтеза. Были выбраны различные наполнители для получения полимерного покрытия – микросилика и диоксид титана. Разработана новая рецептура защитного полимерного покрытия на основе сополимеров, обладающих коррозионными свойствами. Приводится возможность использования этих полимерных покрытий в целях защиты от воздействия агрессивных сред неметаллических поверхностей различных изделий. Были определены физико-химические свойства неметаллических образцов (бетонов) с защитным полимерным покрытием, свежеприготовленные и выдержанные в течение трех месяцев, а именно водопоглощение и предел прочности на сжатие. Так, у образцов с полимерным покрытием после трехмесячной выдержки выше предел прочности на сжатие составляет 93,3 кгс/см², у свежеприготовленных – 53,0 кгс/см². Такая же картина наблюдается у выдержанных и свежеприготовленных образцов после водопоглощения (75,2 кгс/см² против 24,0 кгс/см², соответственно). Процент водопоглощения у выдержанных образцов составляет 0,0–11,63, кроме образца с комбинированным полимерным покрытием серии 1 (водопоглощение составляет 23,28 %). Процент водопоглощения свежеприготовленных образцов составляет 4,8–15,1, что находится в хороших пределах. При этом образцы с полимерным покрытием и наполнителем микросилика (серия 3) и комбинированным полимерным покрытием серии 3 обладают минимальным водопоглощением (4,8 %).

Ключевые слова: синтез сополимеров, сополимер, полимер, полимерное покрытие, защитное покрытие, бетоны, наполнитель, диоксид титана.

Введение

Одним из важнейших вопросов, стоящим перед современным материаловедением, является обеспечение надежной защиты конструкционных металлических и неметаллических материалов, подвергающиеся в процессе эксплуатации внешним воздействия. Защита от коррозии является одной из важнейших научных, экологических, социальных, экономических, проблем, так как технический прогресс во многих отраслях промышленности тормозится из-за ряда нерешенных проблем борьбы с нею. Поэтому необходимы пути изыскания эффективных мер, способных привести к разработке защитных полимерных покрытий новых рецептур. В настоящее время большой интерес представляет применение полимерных покрытий в качестве защиты поверхности металлических и неметаллических поверхностей от воздействия неблагоприятных условий эксплуатации: атмосферные осадки, кислотные дожди и т.д. Их применение обеспечивает хорошую защиту от коррозии, прочную адгезию к поверхности, невысокое водопоглощение, легкость нанесения покрытия и хороший внешний эстетический вид [1, 2].

Значение коррозионных исследований определяется тремя аспектами:

- экономический – имеет целью уменьшение материальных потерь в результате коррозии металлических и неметаллических конструкций и изделий;
- повышение надежности оборудования, которое в результате коррозии может разрушаться с катастрофическими последствиями;
- сохранность металлического фонда. Мировые ресурсы металла ограничены, а потери металла в результате коррозии ведут, кроме того, к дополнительным затратам энергии и воды. Не менее важно, что человеческий труд, затрачиваемый на проектирование и реконструкцию металлического оборудования, пострадавшего от коррозии, может быть направлен на решение других общественно полезных задач [1–4].

Для защиты металлов от коррозии широкое применение находят полимерные покрытия. Они не только защищают металл от коррозионных и прочих химических воздействий, но и придают изделию отличные электроизоляционные, декоративные, антисептические и другие свойства. По сравнению с лакокрасочным и эмалевым полимерные покрытия имеют ряд преимуществ. Они более прочны, эластичны, лучше связаны с металлом; в процессе эксплуатации стираются и растрескиваются значительно меньше, чем эмали [5].

К полимерным покрытиям предъявляют достаточно серьезные требования. Во-первых, они должны обладать очень высоким сцеплением с поверхностью, так как они связываются с металлическим основанием на молекулярном уровне, а не просто его покрывают. Полимерные покрытия не только защищают металлы от воздействия агрессивных сред, но и повышают их износостойкость, снижая прилипаемость различных веществ к рабочим поверхностям, позволяют экономить цветные металлы и другие дефицитные материалы [6-8].

Существует множество работ научно-исследовательского характера, направленные на создание технологических мероприятия по защите

неметаллических материалов, изделий от воздействия коррозии. Так, в работе [9] разработана композиция для защитного покрытия бетона, включающая (мас.%) латекс – 2-25, твердый парафиновый компонент – 3-25, жирную кислоту фракции С13 – 0,5-3,0, щелочной компонент триэтанолламин – 0,3-5,0, поверхностно-активное вещество ОП-7 или ОП-10 – 0,1-0,5, загуститель – 0,1-0,5 и воду (остальное). Однако данная композиция обладает недостаточной способностью снижать влагопоглощение бетона и защищать его от образования мелких трещин.

Авторы работы [10] предлагают разработанную композицию для получения полимерных покрытий с целью защиты бетона от вредных воздействий, содержащая компоненты при их соотношении, мас.ч.: прозрачный эпоксидный компаунд Этал-27НТ/12НТ – 100; микрокальцит с частицами фракции 0,5-1 мм – 72-120; микрокальцит с частицами фракции менее 0,2 мм – 112-80. Эпоксидный компаунд Этал-27НТ/12НТ образован совмещением бесцветной прозрачной низковязкой эпоксидной смолы и низковязкого отвердителя типа ЭТАЛ, при соотношении 81,6:18,4 мас.ч. Такое технологическое решение обеспечивает повышение прочностных характеристик при сжатии и изгибе полимерной композиции. Однако, широкое использование таких составов в значительной мере ограничено высокой стоимостью эпоксидных связующих.

В настоящее время основным способом снижения стоимости защитных покрытий является уменьшение расхода связующих за счет введения в их состав различных наполнителей, в качестве которых широко используют кварцевый песок и другие. Кроме природных наполнителей при получении полимерных композитов также используются различные техногенные отходы, что позволяет получать материалы с новыми свойствами, а также частично решает проблемы утилизации [10].

В работе [11] разработано защитное полимерное покрытие – эпоксидный полимерраствор, содержащий эпоксидную диановую смолу, аминный отвердитель, пластификатор и наполнитель, в качестве которого используют отходы производства керамзита. На разработанная композиция обладает недостаточно высокой прочностью, не превышающей 24,7 МПа при сжатии и 16,6 МПа при изгибе (20°C).

Авторы данной статьи на протяжении многих лет занимаются проблемой коррозии металлических и неметаллических изделий, конструкций. Так, в работе [12] авторы приводят композицию защитного полимерного покрытия на основе сополимеров винил-н-бутилового эфира, метилметакрилата, малеинового ангидрида, предназначенных для защиты деталей и элементов конструкций из сталей и железобетона от воздействия агрессивных сред (кислотного и основного характера) и абразивного износа при истирании во время эксплуатации изделий. Соотношение исходных материалов (% мас. ч.): сополимер винилбутилового эфира:малеинового ангидрида:металиметакрилата 30-70; растворитель 10-50; модификатор 0,5-1,5; наполнитель 20-60. Предлагаемое защитное полимерное покрытие обладает повышенной твердостью, эластичностью, влагостойкостью, устойчивостью к щелочной, слабокислой и солевой среде, перепадам температур

до 150°C при сохранении высокого уровня адгезии к железобетонным изделиям и различным сталям.

Много научных исследований направлено на получение композиционного защитного полимерного покрытия с использованием отходов кремниевого производства – микрокремнезема (микросилики, наносилики), а также с отходами цинкового производства – изгари цинка [12-16].

Наполнитель для полимерных покрытий выбирается в зависимости от назначения. Например, для полимерного покрытия бетонных полов в состав может вводиться кварцевый песок, корунд и другие вещества, повышающие прочность и устойчивость к истиранию. Для металлических поверхностей – стальная, алюминиевая и другая – пудра, а также фибра. Продукты с такими наполнителями приближены по прочности к материалу основания. В составы также могут включаться красители [17, 18].

Поэтому необходимы пути изыскания эффективных мер, способных привести к разработке полимерных защитных покрытий новых рецептур.

Авторы данной статьи, проделав литературно-патентный анализ, предлагают технологию создания полимерного покрытия, обладающего коррозионной стойкостью для защиты неметаллических изделий (в частности, бетонов), с использованием различных наполнителей.

Для решения данной проблемы поставлены следующие задачи:

- разработка технологии получения сополимеров;
- разработка комплексной технологии получения защитного полимерного покрытия на основе сополимеров;
- подбор рецептуры для нового полимерного покрытия для защиты неметаллических материалов (бетонов) от воздействия агрессивных сред;
- подбор наполнителей для создания защитных полимерных покрытий.

Материалы и методы

Объект исследования представляет собой защитное полимерное покрытие с наполнителем отхода кремниевого производства (микросилики), окиси титана, а также полимерное покрытие с комбинированными наполнителями при одинаковом соотношении сополимера и наполнителя 3:1 (рисунок 1).

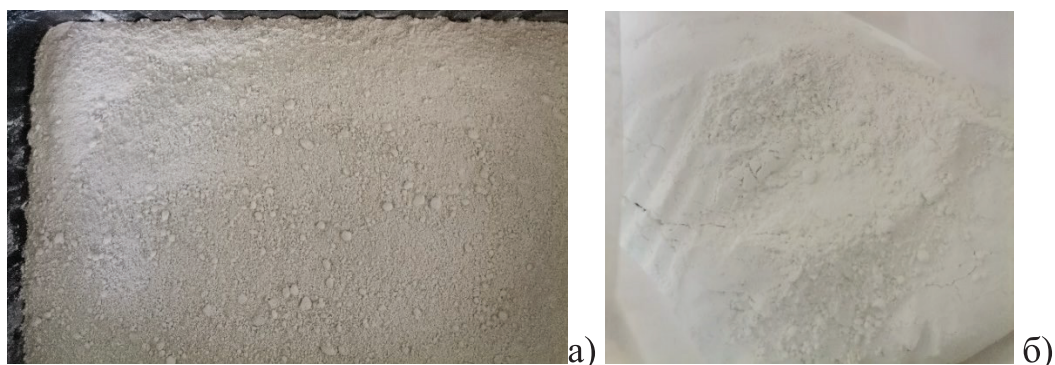


Рисунок 1 – Внешний вид наполнителя: а) микросилики; б) окиси титана

Бетонные образцы размером размером 40x40x40 мм (бетонные кубики) были получены согласно ГОСТ 26633-2015 и имеют состав цемент марки М400 590 г, песчано-гравийная смесь 1500 г, вода 195 мл. Все компоненты перемешивали в течении 15 мин для получения однородности.

Процесс изготовления и внешний вид бетонных образцов приводится на рисунке 2.



Рисунок 2 – Процесс изготовления бетонных образцов и их внешний вид

Для создания полимерного покрытия для неметаллических образцов покрытия 1 было взято метилметакрилат, винилбутиловый эфир, стирол в количестве по 7 мл каждого. Для покрытия 2 было взято метилметакрилат, стирол, винилбутиловый эфир в количестве по 7 мл каждого. Для покрытия 3 было взято винилбутиловый эфир и метилметакрилат в количестве по 7 мл каждого.

Количество наполнителя в каждом покрытии составляет 3 г, при создании комбинированного полимерного покрытия наполнителя берется по 1,5 г каждого.

В трехгорлую колбу наливали метилметакрилат и винилбутиловый эфир и загружали малеиновый ангидрид (сополимер 1). После растворения малеинового ангидрида загружали 100 г толуола. Температура нагревания смеси мономеров составляет около 60°C. Затем добавляли инициатор полимеризации динитрилазоизомасляной кислоты количеством 0,2 г. Сополимеризация происходит при медленном нагревании до температуры 70–80 °С в течении 1–2 часов. Для вызревания сополимера реакцию смесь выдерживали 24 часа (1 сутки).

Подобным образом проводили синтез сополимера 2 (метилметакрилат и винилбутиловый эфир) и сополимер 3 (винилбутиловый эфир и метилметакрилат) с различным соотношением исходных компонентов. Полученные сополимеры смешивали с наполнителями – микросилика, окись титана и совместно окись титана и микросилика с целью направленного изменения их технологических и эксплуатационных свойств.

Процесс приготовления полимерного покрытия приводится на рисунках 3-7.



Рисунок 3 – Приготовление сополимера



Рисунок 4 – Готовые сополимерные материалы для создания покрытия

При смешении сополимеров с наполнителями происходит обильное газовыделение – процесс сольватации (рисунок 5).



Рисунок 5 – Процесс сольватации при смешении компонентов

Процесс смешивания полимерных покрытий с наполнителями приводится на рисунке 6. Готовые полимерные покрытия с различными наполнителями для неметаллических образцов приводятся на рисунке 7.

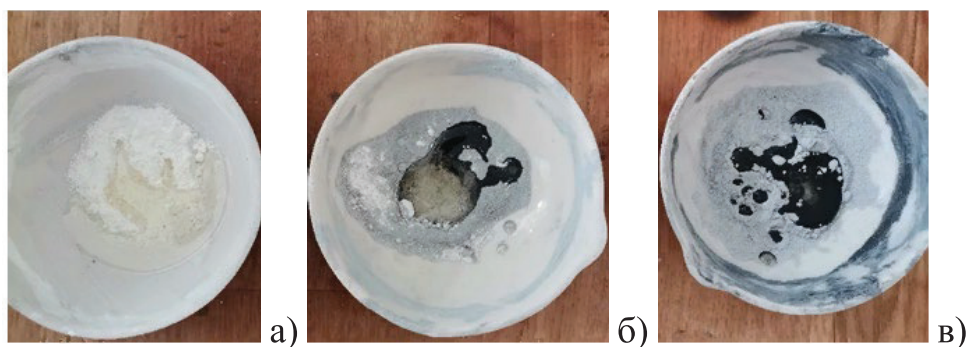


Рисунок 6 – Процесс смешивания сополимеров и наполнителей:
а – окись титана; б – комбинированное; в – микросилика

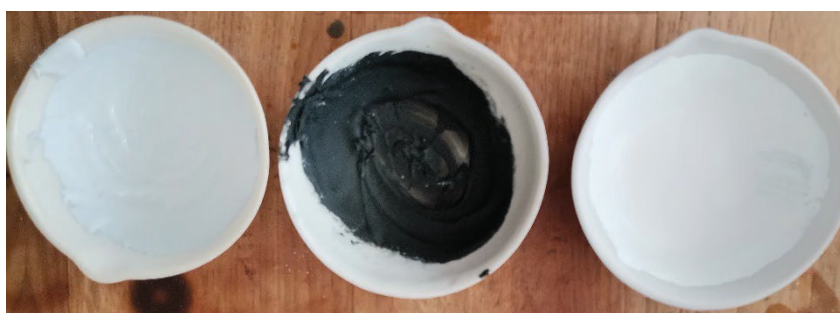


Рисунок 7 – Готовые полимерные покрытия для неметаллических образцов

В таблице 1 приводится композиционный состав полимерного покрытия для неметаллических образцов.

Таблица 1 – Состав покрытий для бетонных образцов

Номер серии	Состав покрытия					
	ММА, мл	МА, мл	ВБЭ, мл	Стирол, мл	SiO ₂ , г	TiO ₂ , г
1	+	+	+		+	
	+	+	+			+
	+	+	+		+	+
2	+		+	+	+	
	+		+	+		+
	+		+	+	+	+
3	+		+		+	
	+		+			+
	+		+		+	+
К	0	0	0	0	0	

Примечание: ММА – метилметакрилат; МА – малеиновый ангидрид; ВБЭ – винилбутиловый эфир.

Процесс нанесения полимерного покрытия с различными наполнителями на бетонные образцы приводится на рисунке 8-10.



Рисунок 8 – Процесс изготовления полимерного покрытия с наполнителем микросиликой



Рисунок 9 – Процесс изготовления полимерного покрытия с наполнителем окисью титана



Рисунок 10 – Процесс изготовления комбинированного полимерного покрытия

Полимерное покрытие на неметаллических материалах (бетонных образцах) плотно прилегает, покрытия тонкие, ровные; пор, трещин, микротрещин, несплошностей на поверхности бетонных образцов с полимерным покрытием не имеется. Это относится ко всем созданным типам полимерного покрытия: с микросиликой, с окисью титана, с микросиликой и окисью титана –

комбинированное. Полимерное покрытие с наполнителем микрокремнезема имеет блестящий вид, а полимерное покрытие с наполнителем окись титана и комбинированное имеет матовый вид.

Масса неметаллических образцов до и после нанесения полимерного покрытия приводится в таблице 2.

Таблица 2 – Масса бетонных образцов до и после нанесения полимерного покрытия с различными наполнителями

Масса, г	Полимерное покрытие с наполнителем микрокремнезема			Полимерное покрытие с наполнителем окись титана			Комбинированное полимерное покрытие с наполнителями микрокремнезема и окись титана		
	серия 1	серия 2	серия 3	серия 1	серия 2	серия 3	серия 1	серия 2	серия 3
Начальная масса, г	124,31	130,48	119,45	132,53	139,81	149,75	134,52	138,26	128,15
Конечная масса, г	126,50	132,56	121,47	135,49	141,83	151,01	136,71	140,79	130,26
Разница, г	+2,19	+2,08	+2,02	+2,96	+2,02	+1,26	+2,19	+2,53	+2,11

Результаты и обсуждение

Испытание на сжатие проводилось в соответствии с ГОСТ 10180-2012. В таблице 3, таблице 4 приводятся результаты испытаний бетонных образцов на сжатие. Испытание на сжатие бетонных образцов проводили на гидравлическом прессе П50 лаборатории железобетонных изделий и вторичных материалов АО «Qarmet» до и после водопоглощения.

Причем были повторены испытания после вылежки бетонных образцов с полимерным покрытием в течение 3 месяца.

Таблица 3 – Результаты испытания на прочность сжатия бетонных образцов после вылежки в 3 месяца, кгс/см²

Бетонные образцы с покрытием после выдержки 3 месяца				Бетонные образцы с покрытием после водопоглощения и выдержки 3 месяца		
серия	наполнитель микрокремнезема	наполнитель окись титана	комбинированное покрытие	наполнитель микрокремнезема	наполнитель окись титана	комбинированное покрытие
1	105,2	89,2	73,3	50,14	70,1	67,0
2	105,2	89,2	103,2	45,45	93,0	100,7
3	79,7	80,2	112,2	58,30	82,9	113,4
Контр	107,1			90,5		
Ср.	96,2	86,9	96,7	51,3	82,0	93,7
Ср. в целом	93,3			75,6		

Таблица 4 – Результаты испытания на прочность сжатия свежих бетонных образцов, кгс/см²

Свежие бетонные образцы с покрытием				Свежие бетонные образцы с покрытием после водопоглощения		
серия	наполнитель микро-силика	наполнитель окись титана	комбинированное покрытие	наполнитель микро-силика	наполнитель окись титана	комбинированное покрытие
1	25,5	57,3	51,0	12,7	26,8	38,2
2	41,4	31,9	44,6	22,3	26,8	19,1
3	60,5	44,6	47,8	25,5	19,1	25,5
Контр	40,8			18,6		
Ср.	42,5	44,6	47,8	20,2	24,2	27,6
Ср. в целом	53,0			24,0		

Как видно из таблиц 3 и 4, предел прочности на сжатие у образцов с полимерным покрытием после трехмесячной выдержки выше (93,3 кгс/см²), чем у свежеприготовленных (53,0 кгс/см²). Такая же картина наблюдается у выдержанных и свежеприготовленных образцов после водопоглощения (75,2 кгс/см² против 24,0 кгс/см²) (рисунок 11). Это говорит о том, что образцы приготовлены правильно, и происходит работа цемента на повышение прочности. У образцов с комбинированным полимерным покрытием предел прочности на сжатие выше после выдержки.

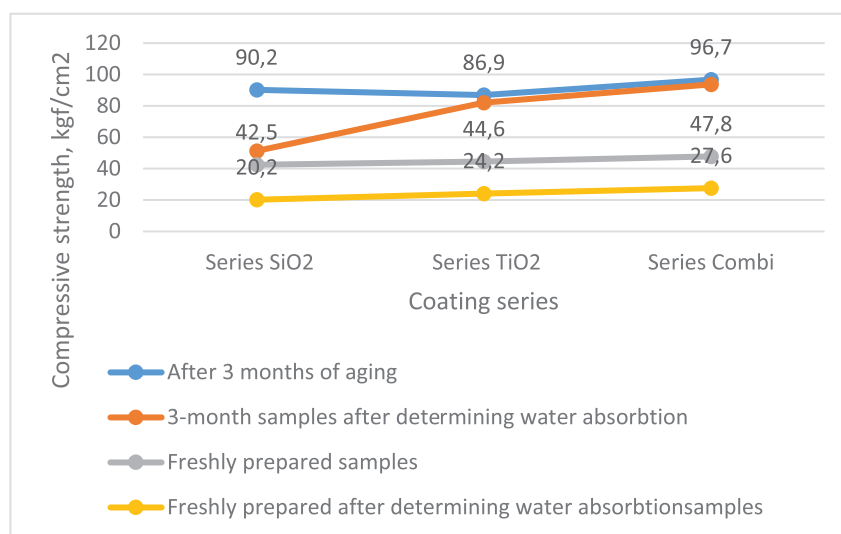


Рисунок 11 – Соотношение предела прочности на сжатие

Поведение образцов при испытании соответствовало ГОСТ 10180-2012, то есть была выдержана соосность образцов (рисунок 12), кроме одного образца, который разрушился по диагонали (образец с наполнителем двуокиси титана

серии 3) (рисунок 13). Выдержанные 3 месяца образцы с наполнителем двуокиси титана (серия 1) (рисунок 14) и образец с наполнителем микросилика (серия 1) (рисунок 15), свежеприготовленный образец с комбинированным полимерным покрытием (серия 3) (рисунок 16) не разрушились. Некоторые образцы также выдержали испытание, но треснули или по одной грани, или по двум граням, но при этом не разрушились.

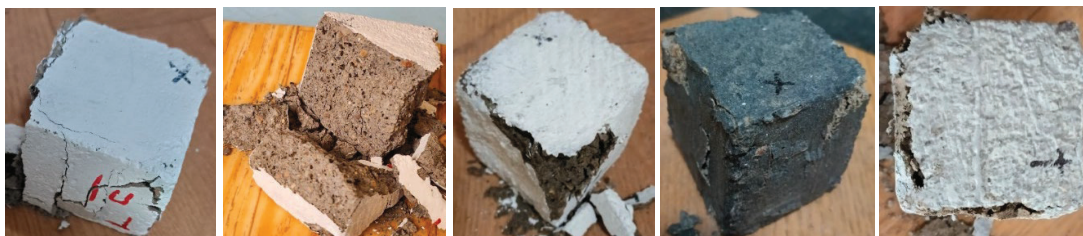


Рисунок (12 - 16)

Определение водопоглощения неметаллических образцов. С целью определения водостойкости полимерных покрытий различной рецептуры было проведено испытание бетонных образцов на водопоглощение в соответствии ГОСТ 12730.3-2020.

Поведение образцов при погружении в воду различно. Например, при погружении образцов с полимерными покрытиями (наполнитель микросилика) происходило обильное выделение пузырьков. При погружении образцов с полимерными покрытиями (наполнитель окись титана) происходило слабое выделение пузырьков. А при погружении образцов с комбинированным полимерными покрытиями (наполнители микросилика и окись титана совместно) газовыделения не происходило долгое время. Это говорит, о том, что комбинированное полимерное покрытие очень плотное, без микротрещин и микропор.

Все созданные полимерные покрытия на бетонных образцах после погружения в воду не отслоились от подложки, имеют вид ровного и тонкого строения, шероховатостей нет (рисунок 17).



Рисунок 17 – Образцы после погружения в воду

В таблице 5 приводятся массы неметаллических выдержанных в течение 3 месяцев образцов до и после погружения в воду.

Таблица 5 – Результаты испытания на водопоглощение полимерных покрытий на бетонных образцах

Масса, г	Полимерное покрытие с наполнителем микросилика			Полимерное покрытие с наполнителем окись титана			Комбинированное полимерное покрытие с наполнителями микросилика и окись титана		
	серия 1	серия 2	серия 3	серия 1	серия 2	серия 3	серия 1	серия 2	серия 3
Начальная масса, г	130	139	136	126	135	129	114	128	127
Масса после покрытия, г	132	141	138	127	137	131	116	129	129
Масса после воздействия воды, г	146	156	153	141	151	143	143	144	129
Водопоглощение, %	10,61	10,64	10,87	11,02	10,22	9,16	23,28	11,63	0

Как видно по данным таблицы 5, после погружения в воду наблюдается увеличение массы всех образцов, что говорит о поглощении ими воды. Процент водопоглощения составляет 0,0–11,63, что находится в хороших пределах, кроме образца с комбинированным полимерным покрытием серии 1 (водопоглощение составляет 23,28 %). При этом образец с комбинированным полимерным покрытием серии 3 обладает минимальным водопоглощением (0 %).

В таблице 6 приводятся массы неметаллических свежеприготовленных образцов до и после погружения в воду.

Таблица 6 – Результаты испытания на водопоглощение полимерных покрытий на бетонных образцах

Масса, г	Полимерное покрытие с наполнителем микрокремнезема			Полимерное покрытие с наполнителем оксид титана			Комбинированное полимерное покрытие с наполнителями микрокремнезема и оксид титана		
	серия 1	серия 2	серия 3	серия 1	серия 2	серия 3	серия 1	серия 2	серия 3
Начальная масса, г	136	135	141	127	131	134	125	130	124
Масса после покрытия, г	138	137	144	129	133	136	126	131	126
Масса после воздействия воды, г	146	147	151	144	150	144	145	148	132
Водопоглощение, %	5,8	7,3	4,8	11,6	12,7	5,9	15,1	13,0	4,8

Как показывают результаты таблицы 6, у всех образцов после погружения в воду также наблюдается увеличение массы, что говорит о поглощении ими воды. Процент водопоглощения составляет 4,8-15,1, что находится в хороших пределах. При этом образцы с полимерным покрытием и наполнителем микрокремнезема (серия 3) и комбинированным полимерным покрытием серии 3 обладают минимальным водопоглощением (4,8%). При этом наблюдается соответствие данных о водопоглощении для образцов предыдущей серии (см. табл. 5), значения водопоглощения у свежеприготовленных образцов ниже.

Таким образом, у комбинированного полимерного покрытия сочетаются наименьший процент водопоглощения и наибольшие значения предела прочности на сжатие. На данный факт оказывают влияние состав полимера и совместная работа наполнителей – микрокремнезема и диоксида титана.

Выводы

Установлено, что выдержанные 3 месяца неметаллические образцы с комбинированным полимерным покрытием обладают повышенными значениями предела прочности на сжатие, что говорит о наращивании прочности самим цементом.

При этом возможно использование наполнителей диоксида титана и микрокремнезема при создании коррозионноустойчивых полимерных покрытий для неметаллических материалов, но титановый наполнитель будет являться активным компонентом, а микрокремнезем – инертным, при этом снижающим себестоимость и материалоемкость продукции, в также уменьшающим экологическую нагрузку региона.

Разработанная технология защитных покрытий нового состава, используемых для неметаллических изделий, работающих в агрессивных средах, выгодно отличает предлагаемый состав от существующих.

Экономически целесообразнее наладить производство защитных полимерных покрытий в Казахстане, чем производить закупки их в других странах. Такое решение приведет к снижению экспорта продукции, увеличению импортозамещения и, тем самым, повышению конкурентоспособности страны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Сайт [Электронный ресурс]. – <https://www.kmg.kz/ru/press-center/media-about-kmg/NPZ-korroziya>. Коррозия. (дата обращения 15.01.2024).].

2 Сайт [Электронный ресурс]. – https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=235. Коррозия и ее последствия. (дата обращения 16.01.2024).

3 **Merkulov, V. V., Ulyeva, G. A., Volokitin, A. V., Akhmetova, G. E.** Synthesis of copolymers for protective coatings // «Chemical technology and metallurgy», Vol. 59, № 3, 2024. – P. 639–646.

4 **Ulyeva, G. A., Akhmetova, G., Tuyskhan, K., Volokitina, I.** Composite materials from industrial waste by spark plasma sintering method // Journal of Chemical technology and metallurgy, № 58(3), 2023, С. 499–506.

5 Сайт [Электронный ресурс]. – <https://portal.tpu.ru/SHARED/b/BONDLI/s/>. Полимерные композиционные материалы. (дата обращения 16.01.2024).

6 **Kgabi, N.** A review of current and future challenges in paints and coatings chemistry // J Progress Multidiscipl Res. – 2013. – № 3. – P. 75–76.

7 **Khanna, A. S.** High-Performance Organic Coatings // High-Performance Organic Coatings. – 2008. – P. 1–454.

8 Сайт [Электронный ресурс]. – <https://vils.ru/articles/polimernoe-pokrytie-vidy-svoystva-nanesenie>. Полимерное покрытие: виды, свойства, нанесение. (дата обращения 14.01.2024).

9 **Попов, С. Ю., Попов, Ю. В., Совина, О. А.** Патент RU 2455265 С2 «Композиция для защитного покрытия бетона». Опубликовано 10.07.2012. Бюл. № 19.

10 **Низина, Т. А., Чернов, А. Н., Низин, Д. Р., Попова, А. И.** Патент RU 2683079 С1 «Полимерная композиция для антикоррозионного покрытия». Опубликовано 26.03.2018. Бюл. № 9.

11 **Воронков, А. Г., Ярцев, В. П.** RU 2248950, МПК С04В26/14, С08J11/00, С09D163/02 и др., «Эпоксидный полимерраствор». Опубликовано 27.03.2005.

12 Патент Меркулов В. В., Ульева Г. А., Шишов Ж. Д., Алмазов А. И. «Состав для защиты металлических и бетонных конструкций» №34563. Опубликовано 04.09.2020 г. Бюл. №35

13 **Fernández-álvarez, M., Velasco, F., Bautista, A., Lobo, F.C.M., Fernandes, E. M., Reis, R. L.** Manufacturing and characterization of coatings from polyamide

powders functionalized with nanosilica // *Polymers*. – 2020. – №12 (10). – P. 1–20. – art. № 2298.

14 **Pourjavadi, A., Fakoorpoor, S. M., Khaloo, A., Hosseini, P.** Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles // *Materials and Design*. – 2012. – № 42. – P. 94–101.

15 **Fallah, F., Khorasani, M., Ebrahimi, M.** Improving the mechanical properties of waterborne nitrocellulose coating using nanosilica particles // *Progress in Organic Coatings*. – 2017. – № 109. – P. 110–116.

16 **Malaki, M., Hashemzadeh, Y., Karevan, M.** Effect of nanosilica on the mechanical properties of acrylic polyurethane coatings // *Progress in Organic Coatings*. – 2016. – № 101. – P. 477–485.

17 **Itou, Y., Tsuji, M., Kubo, M.** Study on concrete mixed with cooled high absorption polymer // *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. – 1994. – № 490. – P. 5–23. – P. 71–80.

18 **Zhan, F., Liu, M., Guo, M., Wu, L.** Preparation of superabsorbent polymer with slow-release phosphate fertilizer // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2004. – № 92 (5). – P. 3417–3421.

REFERENCES

1 Sait [Electronic resource]. – <https://www.kmg.kz/ru/press-center/media-about-kmg/NPZ-korroziya>. Korroziya. (data obrashheniya 15.01.2024).].

2 Sait [Electronic resource]. – https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=235. Korroziya i ee posledstviya. (data obrashheniya 16.01.2024)

3 **Merkulov, V. V., Ulyeva, G. A., Volokitin, A. V., Akhmetova, G. E.** Synthesis of copolymers for protective coatings // «*Chemical technology and metallurgy*», Vol. 59, № 3, 2024. – P. 639–646.

4 **Ulyeva, G. A., Akhmetova, G., Tuyskhan, K., Volokitina, I.** Composite materials from industrial waste by spark plasma sintering method // *Journal of Chemical technology and metallurgy*, №58(3), 2023, C. 499–506.

5 Sajt [Electronic resource]. – [https://portal.tpu.ru/SHARED/b/BONDLI/s/Polimerny`e kompozicionny`e materialy`. \[E`lektronny`j resurs\].](https://portal.tpu.ru/SHARED/b/BONDLI/s/Polimerny%e%20kompozicionny%e%20materialy%20.%20%5B%20Elektronny%20resurs%20.%20%5D%20%28%20data%20obrashheniya%2016.01.2024%29%2E) (data obrashheniya 16.01.2024).

6 **Kgabi, N.** A review of current and future challenges in paints and coatings chemistry // *J Progress Multidiscipl Res*. – 2013. – № 3. – P. 75–76.

7 **Khanna, A. S.** High-Performance Organic Coatings // *High-Performance Organic Coatings*. – 2008. – P. 1–454.

8 Sajt [Electronic resource]. – <https://vils.ru/articles/polimernoe-pokrytie-vidy-svoystva-nanesenie> [E`lektronny`j resurs]. Polimernoe pokry`tie: vidy`, svoystva, nanesenie. (data obrashheniya 14.01.2024).

9 **Popov, S. Yu., Popov, Yu. V., Sovina, O. A.** Patent RU 2455265 S2 «Kompoziciya dlya zashhitnogo pokry`tiya betona». [«Composition for protective coating of concrete»]. Opublikovano 10.07.2012. Byul. № 19.

10 **Nizina, T. A., Chernov, A. N., Nizin, D. R., Popova, A. I.** Patent RU 2683079 S1 «Polimernaya kompozitsiya dlya antikorrozionnogo pokry`tiya». [«Polymer composition for anti-corrosion coating»]. Opublikovano 26.03.2018. Byul. № 9.

11 **Voronkov, A. G., Yarcev, V. P.** RU 2248950, MPK C04B26/14, C08J11/00, C09D163/02 i dr., «E`poksidny`j polimerrastvor». [«Epoxy polymer solution»]. Opublikovano 27.03.2005.

12 Patent Merkulov V. V., Ul`eva G. A., Shishov Zh. D., Almazov A. I. «Sostav dlya zashhity` metallicheskih i betonny`x konstrukcij» [«Composition for protection of metal and concrete structures»]. №34563. Opublikovano 04.09.2020 g. Byul. №35

13 **Fernández-álvarez, M., Velasco, F., Bautista, A., Lobo, F.C.M., Fernandes, E. M., Reis R. L.** Manufacturing and characterization of coatings from polyamide powders functionalized with nanosilica // *Polymers*. – 2020. – №12 (10). – P. 1–20. – art. № 2298.

14 **Pourjavadi A., Fakoorpoor S.M., Khaloo A., Hosseini P.** Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles // *Materials and Design*. – 2012. – № 42. – P. 94–101.

15 **Fallah F., Khorasani M., Ebrahimi M.** Improving the mechanical properties of waterborne nitrocellulose coating using nanosilica particles // *Progress in Organic Coatings*. – 2017. – № 109. – P. 110–116.

16 **Malaki M., Hashemzadeh Y., Karevan M.** Effect of nanosilica on the mechanical properties of acrylic polyurethane coatings // *Progress in Organic Coatings*. – 2016. – № 101. – P. 477–485.

17 **Itou, Y., Tsuji, M., Kubo, M.** Study on concrete mixed with cooled high absorption polymer // *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. – 1994. – № 490. – P. 5–23. – P. 71–80.

18 **Zhan F., Liu M., Guo M., Wu L.** Preparation of superabsorbent polymer with slow-release phosphate fertilizer // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2004. – № 92 (5). – P. 3417–3421.

Поступило в редакцию 13.08.24.

Поступило с исправлениями 29.08.24.

Принято в печать 04.10.2024.

*Г. А. Ульева¹, В. В. Меркулов², *А. А. Епанешникова³*

¹АҚ «Qarmet», Қазақстан Республикасы, Темиртау қ.

^{2,3}Қарағанды индустриялық университет,

Қазақстан Республикасы, Темиртау қ.

13.08.23 ж. баспаға түсті.

29.08.24 ж. түзетулерімен түсті.

04.10.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

**ПОЛИМЕРЛІ ЖАБЫНДАР ҚОРҒАУ ҮШІН МЕТАЛЛ
ЕМЕС МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ӘСЕРІНЕН
КОРРОЗИЯЛЫҚ ҚҰБЫЛЫСТАРДЫҢ**

Бұл жұмыста сополимерлер алынды, оларды синтездеу әдістемесі пысықталды. Полимерлі жабынды алу үшін әртүрлі толтырғыштар таңдалды – микросилик және титан диоксиді. Коррозиялық қасиеттері бар сополимерлер негізінде қорғаныш полимерлі жабынның жаңа рецептурасы жасалды. Бұл полимерлі жабындарды әртүрлі өнімдердің металл емес беттерінің агрессивті ортасының әсерінен қорғау үшін пайдалану мүмкіндігі келтірілген. Қорғаныш полимерлі жабыны бар металл емес үлгілердің (бетондардың) үш ай бойы жаңадан дайындалған және қартайған физикалық-химиялық қасиеттері, атап айтқанда суды сіңіру және сығылу беріктігі анықталды. Сонымен, полимермен қапталған үлгілерде үш айлық экспозициядан кейін қысу беріктігінің шегі 93,3 кгс/см², жаңадан дайындалғандарда – 53,0 кгс/см² құрайды. Дәл осындай көрініс суды сіңіргеннен кейін ескі және жаңадан дайындалған үлгілерде байқалады (сәйкесінше 75,2 кгс/см² және 24,0 кгс/см²). Ескі үлгілердегі суды сіңіру пайызы 0,0-11,63 құрайды, 1 сериялы аралас полимерлі жабыны бар үлгіден басқа (суды сіңіру 23,28 % құрайды). Жаңадан дайындалған үлгілердің суды сіңіру пайызы 4,8-15,1 құрайды, бұл жақсы шектерде. Бұл ретте полимерлі жабыны және микросилик толтырғышы (3 серия) және 3 сериялы аралас полимерлі жабыны бар үлгілер судың ең аз сіңуіне ие (4,8%).

Кілтті сөздер: сополимер синтезі, сополимер, полимер, полимер жабыны, қорғаныс жабыны, бетондар, толтырғыш, титан диоксиді.

G. A. Ulyeva¹, V. V. Merkulov², *A. A. Epaneshnikova³

¹JSK«Qarmet», Republic of Kazakhstan, Temirtau

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Received 13.08.24.

Received in revised form 29.08.23.

Accepted for publication 04.10.24.

DEVELOPMENT OF POLYMER COATINGS FOR THE PROTECTION OF NON-METALLIC MATERIALS FROM THE EFFECTS OF CORROSION PHENOMENA

In this work, copolymers were obtained and a method for their synthesis was developed. Various fillers were selected to produce a polymer coating – microsilica and titanium dioxide. A new formulation of a protective polymer coating based on copolymers with corrosive properties has been developed. The possibility of using these polymer coatings in order to protect non-metallic surfaces of various products from the effects of aggressive media is given. The physicochemical properties of non-metallic samples (concretes) with a protective polymer coating, freshly prepared and aged for three months, namely water absorption and compressive strength, were determined. So, for samples with a polymer coating, after three months of exposure above the compressive strength is 93.3 kgf/cm², for freshly prepared samples – 53.0 kgf/cm². The same pattern is observed in aged and freshly prepared samples after water absorption (75.2 kgf/cm² versus 24.0 kgf/cm², respectively). The percentage of

water absorption in aged samples is 0.0-11.63, except for the sample with a combined polymer coating of series 1 (water absorption is 23.28 %). The percentage of water absorption of freshly prepared samples is 4.8-15.1, which is within good limits. At the same time, samples with a polymer coating and a microsilicon filler (series 3) and a combined polymer coating of series 3 have a minimum water absorption (4.8 %).

Keywords: synthesis of copolymers, copolymer, polymer, polymer coating, protective coating, concretes, filler, titanium dioxide.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдугалиева Гульнур Баймурзаевна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulnura84@mail.ru

Абдугалиева Гульнур Баймурзаевна, кандидат технических наук, доцент, Карагандинский технический университет, имени Абылқаса Сагинова г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: gulnura84@mail.ru

Abdugaliyeva Gulnur Baymurzaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylqas Saginov, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulnura84@mail.ru

Абшенов Хасен Асанбекұлы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., 160016, Қазақстан Республикасы e-mail: hasen8585@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0173-2524>

Абшенов Хасен Асанбекович, кандидат технических наук, доцент, факультет «Механика и нефтегазовое дело», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, 160016, Республика Казахстан, e-mail: hasen8585@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0173-2524>

Abshenov Khasen Asanbekovich, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of mechanics and oil and gas business, South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan, e-mail: hasen8585@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0173-2524>

Азаматов Бағдат Нұрланұлы, PhD, «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы

Азаматов Бағдат Нурланович, PhD, руководитель Центра компетенций «Smart Engineering», Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан

Azamatov Bagdat Nurlanuly, PhD, Head of the «Smart Engineering» Competence Center, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, 070000, Republic of Kazakhstan

Айткенов Нурбек Болатович, PhD, аға оқытушы, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurbek.aitkenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7495-6337>

Айткенов Нурбек Болатович, PhD, ст. преподаватель, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 1014000, Республика Казахстан, e-mail: nurbek.aitkenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7495-6337>

Aitkenov Nurbek Bolatovich, PhD, Senior lecturer, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 1014000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbek.aitkenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7495-6337>

Акижанова Жанар Темирбайқызы, тмо магистрі, Қарағанды қ., 100018, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zhanar_1988@inbox.ru

Акижанова Жанар Темирбайқызы, магистр тмо, г. Караганда, 100018, Республика Казахстан, e-mail: Zhanar_1988@inbox.ru

Akizhanova Zhanar Temirbaykyzy, Master of tmo Karaganda, 100018, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zhanar_1988@inbox.ru

Алибекова Балым Алаибекқызы, С.Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беткі инженерия және трибология» ғылыми зерттеу орталығының инженері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: balymalibekova304@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>

Алибекова Балым Алаибекқызы, Инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>

Alibekova Balym, Engineer of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at P. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: balymalibekova304@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, техника ғылымдарының кандидаты, «Металлургия» мамандығы, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының аға ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: amanlaotero@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1606-838X>

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, кандидат технических наук, специальность «Металлургия», ст. научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: amanlaotero@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1606-838X>

Akhmetov Amankeldy Serikbaevich, Candidate of Technical Sciences, in «Metallurgy», Senior Researcher at the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: amanlaotero@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1606-838X>

Ахметова Гульжайнат Есенжоловна, PhD, доцент, Metallургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: agulzhajnat@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8244-5027>

Ахметова Гульжайнат Есенжоловна, PhD, доцент, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: agulzhajnat@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8244-5027>

Akhmetova Gulzhaynat Yesenzholovna, PhD, Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: agulzhajnat@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8244-5027>

Байгереев Самат Рахимгалиевич, PhD, қауымд. профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: samat.baigereyev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7773-5457>

Байгереев Самат Рахимгалиевич, PhD, ассоц. профессор, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: samat.baigereyev@mail.ru, <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: samat.baigereyev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7773-5457>

Байқожаева Бақыткүл Ұзаққызы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Стандарттау және сертификаттау кафедрасы, Транспорт және энергетика факультеті, Евразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Bajxozhaeva63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3042-6427>

Байқожаева Бақыткүл Ұзақовна, доктор технических наук, профессор, кафедра Стандартизация и сертификация, Факультет транспорта и энергетики, Евразийский национальный университет, г. Астана, Республика Казахстан, e-mail: Bajxozhaeva63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3042-6427>

Baykozhaeva Bakytkul Uzakovna, Doctor of Engineering, Professor, Department of Standardization and Certification, Faculty of Transport and Energy, Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: Bajxozhaeva63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3042-6427>

Балгабеков Толеу Кунжолович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tdi_kstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9184-0897>

Балгабеков Толеу Кунжолович, кандидат технических наук, доцент, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: tdi_kstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9184-0897>

Balgabekov Toleu Kunzholovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Technical Faculty, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tdi_kstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9184-0897>

Бартенева Игорь Анатольевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: igor_svar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4516-0699>

Бартенева Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: igor_svar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4516-0699>

Bartenev Igor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: igor_svar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4516-0699>

Басқанбаева Динара Джумабаевна, PhD, Энергетика және машина жасау институтының директорының орынбасары, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>

Басқанбаева Динара Джумабаевна, PhD, заместитель директора Института энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>

Baskanbayeva Dinara Dzhumabayevna, PhD, Deputy Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>

Бегалиев Рустем Алибаевич, докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: rustem_begaliev_pvl@mail.ru

Бегалиев Рустем Алибаевич, докторант, Факультет Инженерии, Торайғыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: rustem_begaliev_pvl@mail.ru

Begaliev Rustem Alibaevich, PhD student, Faculty of Engineering, Toraihyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: rustem_begaliev_pvl@mail.ru

Бейсембаев Каким Мананович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kakim08@mail.ru

Бейсембаев Каким Мананович, доктор технических наук, профессор, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: Kakim08@mail.ru

Beisembayev Kakim Manapovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kakim08@mail.ru

Берг Александра Сергеевна, PhD, оқытушы, «Технологиялық жабдық, машина жасау және стандарттау» кафедрасы, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kibeko_1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0528-640X>

Берг Александра Сергеевна, PhD, преподаватель, кафедра «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», Факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: kibeko_1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0528-640X>

Berg Alexandra Sergeevna, PhD, Lecturer, Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kibeko_1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0528-640X>

Берг Андрей Алексеевич, оқытушы, «Технологиялық жабдық, машина жасау және стандарттау» кафедрасы, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 22526633@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8907-1803>

Берг Андрей Алексеевич, преподаватель, кафедра «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», Факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: 22526633@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8907-1803>

Berg Andrey Alekseevich, Lecturer, Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 22526633@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8907-1803>

Богомоллов Алексей Витальевич, техника ғылымдарының 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>

Богомоллов Алексей Витальевич, кандидат технических наук, профессор, кафедра «Металлургия», Факультет инженерии, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bogomolov71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4926-0925>

Bogomolov Aleksey Vitalievich, PhD, Engineering, Professor, Department of «Metallurgy», Faculty of Engineering, Toraihyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bogomolov71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4926-0925>

Борисов Александр Анатольевич, «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының зерттеуші инженері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы

Борисов Александр Анатольевич, инженер-исследователь Центра компетенций «Smart Engineering», г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан

Borisov Alexander Anatolyevich, Research Engineer of «Smart Engineering» Competence Center, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan

Бузауова Тоты Мейрбековна, техника ғылымдарының кандидаты, профессордың м.а., қауымд. профессор, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: toty_77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7219-6274>

Бузауова Тоты Мейрбековна, и.о. профессора, кандидат технических наук, асоц. профессор, Машиностроительный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: toty_77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7219-6274>

Buzauova Toty, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: toty_77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7219-6274>

Бүйткенов Дастан Болатұлы, PhD, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми зерттеу орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: buitkenovd@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0239-5849>

Буйткенов Дастан Болатұлы, PhD, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: buitkenovd@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0239-5849>

Buitkenov Dastan Bolatuly, PhD, Leading Researcher of Scientific Research Center “Surface Engineering and Tribology” at P. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: buitkenovd@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0239-5849>

Быков Петр Олегович, техникалық ғылыми кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7540-7882>

Быков Петр Олегович, кандидат технических наук, профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров Университет, 140008, г. Павлодар, 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, Toraihyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7540-7882>

Васильева Ольга Юрьевна, аға оқытушы, Жер туралы ғылымдар мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: ovasilyeva@edu.ektu.kz

Виктор Борисович Шулятьев, техника ғылымдарының докторы, аға ғылыми қызметкер, РФА С. А. Христианович атындағы теориялық және қолданбалы механика институты, Новосибирск қ., 630090, Ресей Федерациясы, e-mail: shulyat@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0193-6690>

Варбанов Петар Сабев, профессор, Сечени Иштван университеті, Elsevier негізгі «Cleaner Energy Systems» журналының бірлескен редакторы, Elsevier «Энергия – The International Journal» журналының тақырыптық редакторы және «Clean Technologies and Environmental Policy» Springer журналының Еуропалық редакторы. Дьёр, 9026, Венгрия, e-mail: petar.varbanov@prise-know.techvarbanov.petar.sabev@sze.hu, <https://orcid.org/0000-0001-5261-1645>

Васильева Ольга Юрьевна, ст. преподаватель, Школы наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: ovasilyeva@edu.ektu.kz

Виктор Борисович Шулятьев, доктор технических наук, ст.научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация, e-mail: shulyat@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0193-6690>

Варбанов Петар Сабев, является профессором Széchenyi István University, соредактором главного журнала Elsevier «Cleaner Energy Systems», тематическим редактором журнала Elsevier «Energy – The International Journal» и европейским редактором журнала Springer «Clean Technologies and Environmental Policy», Дьёр, 9026 Венгрия e-mail: petar.varbanov@prise-know.techvarbanov.petar.sabev@sze.hu, <https://orcid.org/0000-0001-5261-1645>

Vasilyeva Olga Yurievna, senior lecturer of the School of Earth Sciences, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: ovasilyeva@edu.ektu.kz

Viktor Borisovich Shulyatyev, Doctor of technical sciences, Senior Researcher, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: shulyat@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0193-6690>

Varbanov Petar Sabev, is a professor at Széchenyi István University, the co-editor of the flagship Elsevier journal Cleaner Energy Systems, the subject editor of Elsevier's Energy – The International Journal and the European Editor of Springer's Clean Technologies and Environmental Policy, Győr, 9026 Hungary, e-mail: petar.varbanov@prise-know.techvarbanov.petar.sabev@sze.hu, <https://orcid.org/0000-0001-5261-1645>

Гурьянов Георгий Александрович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: gguryanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>

Гурьянов Георгий Александрович, кандидат технических 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, Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>

Диас Тлектесұлы Қабдымали, «Машина жасау және реверс-инжиниринг» мамандығы бойынша 1 курс студенті, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dias312005@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7127-9377>

Диас Тлектесұлы Қабдымали, студент 1 курса по специальности «Машиностроение и реверс-инжиниринг», Факультет инженерии, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: dias312005@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7127-9377>

Dias Kabdymali, 1st year student majoring in Mechanical Engineering and Reverse Engineering, Faculty of engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: dias312005@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7127-9377>

Доненбаев Бакытжан Серикович, PhD, зерттеуші, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 010027, Қазақстан Республикасы, e-mail: bahytshan09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6923-3476>

Доненбаев Бакытжан Серикович, PhD, научный сотрудник, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, 010027, Республика Казахстан, e-mail: bahytshan09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6923-3476>

Donenbayev Bakhytzhан Serikovich, PhD, Researcher, Karaganda Technical University named after A. Saginov, 010027, Republic of Kazakhstan, e-mail: bahytshan09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6923-3476>

Елемесов Қасым Көптлеуұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, директор, Энергетика және машина жасау институты, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

Елемесов Қасым Көптлеуевич, кандидат технических наук, профессор, директор Института энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

Yelemessov Kassym Koptleuevich, Candidate of technical sciences, professor, Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Sat-bayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

Епанешникова Анастасия Андреевна, магистрант, «Металлургия және материалтану» кафедрасы, Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.epaneshnikova@tttu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-8295-1367>

Епанешникова Анастасия Андреевна, магистрант, кафедра «Металлургия и материаловедение», Карагандинский индустриальный университет, г. Теміртау, 100000, Республика Казахстан, e-mail: a.epaneshnikova@tttu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-8295-1367>

Epaneshnikova Anastasia Andreevna, Master's Student, Department of Metallurgy and Materials Science, Karaganda Industrial University, Temirtau, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.epaneshnikova@tttu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-8295-1367>

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация», Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Yesmakhanova Laura Nurlanovna, PhD, Doctor of the Department of Automation and Telecommunications, Taraz University named M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Жакупов Алибек Ныгматуллович, постдокторант, PhD Торайғыров университеті, г. Павлодар, 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhakupov.a@tou.edu.kz

Жакупов Алибек Ныгматуллович, постдокторант, PhD, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: zhakupov.a@tou.edu.kz

Zhakupov Alibek, Postdoctoralstudent, PhD, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhakupov.a@tou.edu.kz

Жакупова Арай Толепбергеновна, PhD, постдокторант, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aray_zhakupova86@mail.ru

Жакупова Арай Толепбергеновна, PhD, постдокторант, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: aray_zhakupova86@mail.ru

Zhakupova Aray Tolepbergenovna, PhD, Postdoctoralstudent, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aray_zhakupova86@mail.ru

Жақан Армат Медетұлы, докторант, «Металлургия» мамандығы, «Феррокорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Торайғыров университеті, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: armat.01.01@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3810-0528>

Жақан Армат Медетұлы, докторант, специальность «Металлургия», младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Торайғыров университет, Химико-металлургический институт имени Ж.Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: armat.01.01@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3810-0528>

Zhakan Armat Medetuly, Doctoral student, «Metallurgy», Junior researcher at the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Toraighyrov University, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: armat.01.01@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3810-0528>

Жаманбаев Бауржан Уалиханович, PhD, аға оқытушы, «Көлік, көлік техникасы және технологиясы» кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaman78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9027-9540>

Жаманбаев Бауржан Уалиханович, PhD, ст. преподаватель, кафедра «Транспорт, транспортная техника и технологии», ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: zhaman78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9027-9540>

Zhamanbayev Baurzhan Ualikhanovich, PhD, Senior lecturer of the Department of Transport, Transport Equipment and Technologies, ENU named after L. N. Gumilyov, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaman78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9027-9540>

Жанкелді Әділет Жанкелдіұлы, PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8174-4209>

Жанкелді Әділет Жанкелдіұлы, PhD, асоц. профессор, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8174-4209>

Zhankeldi Adilet, PhD, Associate professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8174-4209>

Жаркевич Ольга Михайловна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Технологиялық жабдық, машина жасау және стандарттау» кафедрасы, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zharkevich82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4249-4710>

Жаркевич Ольга Михайловна, кандидат технических наук, профессор, кафедра «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», Факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: zharkevich82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4249-4710>

Zharkevich Olga Mikhailovna, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zharkevich82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4249-4710>

Жұмәділова Айжан Сқақбекқызы, техника ғылымдарының магистрі, оқытушы, «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» кафедрасы, Satbaev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.zhumadilova@satbaev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1443-7292>

Жумадилова Айжан Скакбековна, магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Технологические машины и оборудование», Satbaev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: a.zhumadilova@satbaev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1443-7292>

Zhumadilova Aizhan Skakbekovna, Master of technical sciences, Teacher, Technological machines and equipment department, Satbaev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.zhumadilova@satbaev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1443-7292>

Жүнісов Абылай Қайыртасұлы, техника ғылымдарының кандидаты, меңгеруші, профессор, Металлургия кафедрасы, Торайғыров университеті, г. Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9119-9737>

Жунусов Аблай Кауртасович, кандидат технических наук, Заведующий кафедрой металлургии, профессор, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9119-9737>

Zhunusov Ablay Kairtassovich, Candidate of Technical Science, Head of the Department of Metallurgy, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9119-9737>

Зарипов Рамис Юрисович, оқытушы, «Көліктік техника және логистика» кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: ramis.zaripov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1222-4322>

Зарипов Рамис Юрисович, преподаватель, кафедра «Транспортная техника и логистика», Факультет Инженерии, Торайғыров университет, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: ramis.zaripov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1222-4322>

Zaripov Ramis Yurisovich, Lecturer, Department of Transport Engineering and Logistics, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: ramis.zaripov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1222-4322>

Ибраев Иршек Кажикаримович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: ibraevik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6414-6901>

Ибраев Иршек Кажикаримович, доктор технических наук, профессор, Карагандинский индустриальный университет, Факультет металлургии и машиностроения, г. Темиртау, 1014000, Республика Казахстан, e-mail: ibraevik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6414-6901>

Ibraev Irsh ek Kazhikarimovich, Doctor of technical sciences, Professor, Karaganda Industrial University, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Temirtau, 1014000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ibraevik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6414-6901>

Ибраева Оразбике Токтархановна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: <https://orcid.org/0000-0002-8490-1994>

Ибраева Оразбике Токтархановна, кандидат технических наук, доцент, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 1014000, Республика Казахстан, e-mail: <https://orcid.org/0000-0002-8490-1994>

Ibraeva Orazbike Toktarkhanovna, Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 1014000, Republic of Kazakhstan, e-mail: <https://orcid.org/0000-0002-8490-1994>

Игнасио Менендес-Пидаль, PhD, құрылыс инженері, Жер инженериясы және морфологиясы кафедрасы, Каналдар және порттар инженериясы мектебі, Мадрид Политехникалық университеті, Мадрид, 28801, Испания, e-mail: Ignacio.menendezpidal@upm.es, <https://orcid.org/0000-0002-7053-1101>

Игнасио Менендес-Пидаль, PhD, инженер-строитель, Департамент инженерии и морфологии земли, Школа инженерии каналов и портов, Политехнический университет Мадрида, Мадрид, 28801, Испания, e-mail: Ignacio.menendezpidal@upm.es, <https://orcid.org/0000-0002-7053-1101>

ignacio menéndez-pidal, PhD, Civil engineer department of engineering and morphology of the ground, School of engineer of channels and ports, polytechnic university of madrid, Madrid, 28801, Spain, e-mail: ignacio.menendezpidal@upm.es, <https://orcid.org/0000-0002-7053-1101>

Исенов Ерасыл Елубаевич, магистрант, «Технологиялық жабдықтар, машина жасау және стандарттау» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 010027, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.issenov@kstu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-9956-7426>

Исенов Ерасыл Елубаевич, магистрант, кафедра «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, 010027, Республика Казахстан, e-mail: y.issenov@kstu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-9956-7426>

Issenov Yerassyl Yelubayevich, Master student of «Technological equipment, mechanical engineering and standardization», Karaganda Technical University named after A. Saginov, 010027, Republic of Kazakhstan, e-mail: y.issenov@kstu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-9956-7426>

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, Торайғыров 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>

Кабылканов Султан Кайырбекович, «Металлургия» мамандығы бойынша техника ғылымдарының магистрі, «Феррокорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: kabyl_96kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1272-2065>

Кабылканов Султан Кайырбекович, магистр технических наук по специальности «Металлургия», младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: kabyl_96kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1272-2065>

Kabylkanov Sultan Kaiyrbekovich, Master of Technical Sciences in «Metallurgy», Junior researcher at the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh.Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: kabyl_96kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1272-2065>

Кавалюк Анна, профессор, Честохова технологиялық университеті, Честохова қ., Польша, <https://orcid.org/0000-0003-1828-397X>

Кавалюк Анна, профессор, Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохова, Польша, <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>

Anna Kawalek, Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland, <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>

Кайыров Рустем Айбекович, PhD, А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінде қауымд. профессор, Қарағанды қ., 100028, Қазақстан Республикасы, e-mail: kairov.rustem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0899-4981>

Кайыров Рустем Айбекович, PhD, ассоц. профессор, Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова, г. Караганда, 100028, Республика Казахстан, e-mail: kairov.rustem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0899-4981>

Kaiyrov Rustem, PhD, Associate Professor, Karaganda Buketov University, Karaganda, 100028, Republic of Kazakhstan, e-mail: kairov.rustem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0899-4981>

Каражанова Дарига Дюсеновна, қауымд. профессор, педагогикалық ғылымдар кандидаты, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.karazhanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-2146-7828>

Каражанова Дарига Дюсеновна, ассоц. профессор, кандидат педагогических наук, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: d.karazhanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-2146-7828>

Dariga Karazhanova, Associate professor, Candidate of pedagogical sciences, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.karazhanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-2146-7828>

Карбаев Нурлан Кажкенович, техника ғылымдарының кандидаты, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: k_nurlan99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7111-5719>

Карбаев Нурлан Кажкенович, кандидат технических наук, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: k_nurlan99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7111-5719>

Karbaev Nurlan Kazhkenovich, Candidate of Technical Sciences, Technical Faculty, S. Seyfullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: k_nurlan99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7111-5719>

Карнов Александр Павлович, PhD, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

Карнов Александр Павлович, PhD, Международной транспортно-гуманитарный университет путей сообщения, г. Алматы, Республика Казахстан

Karpov Aleksandr, PhD, International university of transport and humanities, Almaty, Kazakhstan

Касенов Асылбек Жумабекович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, г. Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9552-1439>

Касенов Асылбек Жумабекович, кандидат технических наук, профессор, Торайғыров университет, Факультет инженерии Павлодар, 140008, 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, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9552-1439>

Каукаров Алтынбек Кубашевич, магистр, «Көлік техникасы, аға оқытушы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynbek-79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5681-5469>

Каукаров Алтынбек Кубашевич, магистр, ст. преподаватель кафедра «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ имени К. Жубанова, г. Ақтөбе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: altynbek-79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5681-5469>

Kaukarov Altynbek Kubashevich, Master, senior lecturer of the Department «Transport Equipment, Organization of Transportation and Construction», ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynbek-79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5681-5469>

Кожгельдиев Бекмырза Жанабергеневич, «Машина жасау» мамандығы бойынша докторант, ғылыми қызметкер, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: bekmyrza.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9094-3015>

Кожгельдиев Бекмырза Жанабергеневич, докторант по специальности «Цифровизация машиностроительного производства», научный сотрудник, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: bekmyrza.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9094-3015>

Kozhageldiyev Bekmyrza, doctoral student in «Mechanical engineering», Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekmyrza.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9094-3015>

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, Торайғыров 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>

Куанышев Мурат Кулынтаевич, доцент, техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: k-murat-57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8307-3675>

Куанышев Мурат Кулынтаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и строительства», АРУ имени К. Жубанова, г. Ақтөбе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: k-murat-57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8307-3675>

Kuanyshev Murat Kulyntaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: k-murat-57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8307-3675>

Кудря Александр Викторович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Металлтану және беріктік физикасы кафедрасы менгерушісінің орынбасары, МИСиС ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу қ., 119049, Ресей Федерациясы, e-mail: AVKudrya@misis.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, университет науки и технологий МИСиС, заместитель заведующего кафедрой металловедения и физики прочности, г. Москва, 119049, Российская Федерация, e-mail: AVKudrya@misis.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

Kudrya Alexander Viktorovich, Doctor of technical sciences, professor, University of Science and Technology MISIS, Deputy Head of the Department of Metallurgy and Strength Physics, Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: AVKudrya@misis.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

Кусайнов Арыстанбек Ерланович, «Беттік инженерия және трибология» ҒЗО кіші ғылыми қызметкері, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070002, Қазақстан Республикасы, e-mail: arys20055@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

Кусайнов Арыстанбек Ерланович, младший научный сотрудник НИЦ «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070002, Республика Казахстан, e-mail: arys20055@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

Kusainov Arystanbek Erlanovich, Junior researcher at RC «Surface engineering and Tribology», S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070002, Republic of Kazakhstan, e-mail: arys20055@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

Қамбаров Еділжан Ержанұлы, «Беттік инженерия және трибология» ҒЗО ғылыми қызметкері, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070002, Қазақстан Республикасы, e-mail: yedilzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0838-6724>

Қамбаров Еділжан Ержанұлы, Научный сотрудник НИЦ «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070002, Республика Казахстан, e-mail: yedilzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0838-6724>

Kambarov Yedilzhan Yerzhanuly, Researcher at RC «Surface engineering and Tribology», S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070002, Republic of Kazakhstan, e-mail: yedilzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0838-6724>

Қанаяев Аманкелді Тоқешұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Стандарттау және сертификаттау кафедрасы, Транспорт және энергетика факультеті, Евразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Kanayevat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2530-038x>

Қанаяев Амангельды Тоқешевич, доктор технических наук, профессор, кафедра Стандартизация и сертификация, Факультет транспорта и энергетики, Евразийский национальный университет, г. Астана, Республика Казахстан, e-mail: Kanayevat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2530-038x>

Kanayev Amangeldy Tokeshevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Standardization and Certification, Faculty of Transport and Energy, Eurasian National University Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kanayevat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2530-038x>

Малыбаев Нурлан Сакенович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: malybaevnurlansakenovich@mail

Малыбаев Нурлан Сакенович, кандидат технических наук, доцент, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: malybaevnurlansakenovich@mail

Malybaev Nurlan Sakenovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: malybaevnurlansakenovich@mail

Маратұлы Бауыржан, «Smart Engineering», құзыреттілік орталығының зерттеуші инженері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы

Маратұлы Бауыржан, инженер-исследователь Центра компетенций «Smart Engineering», г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан

Maratuly Bauyrzhan, Research Engineer of «Smart Engineering», Competence Center, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan

Меркулов Владимир Витальевич, химия ғылымдарының кандидаты, доцент, «Химиялық технология және экология» кафедрасы, Қарағанды индустриалды университеті Теміртау қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: v.merkulov@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0368-3890>

Меркулов Владимир Витальевич, кандидат химических наук, доцент, кафедра «Химическая технология и экология», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 100000, Республика Казахстан, e-mail: v.merkulov@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0368-3890>

Merkulov Vladimir Vitalevich, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology and Ecology, Karaganda Industrial University, Temirtau, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: v.merkulov@ttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0368-3890>

Молдахметова Әлия Ерланқызы, докторант, Ғылымды басқару департаментінің басшысы, Транспорт және энергетика факультеті, Евразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aliya-981@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9690-5095>

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: ruslangr82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9637-0513>

Мурзағалиев Ахмет Жакиевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: akhmet-zhakiyevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-681X>

Молдахметова Алия Ерлановна, Докторант, Начальник департамента управления науки, Факультет транспорта и энергетики, Евразийский национальный университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aliya-981@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9690-5095>

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, ассоц. профессор, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: ruslangr82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9637-0513>

Мурзағалиев Ахмет Жакиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ имени К. Жубанова, г. Ақтөбе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: akhmet-zhakiyevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-681X>

Moldakhmetova Aliya Erlanovna, PhD student, Head of the Department of Science Management, Faculty of Transport and Energy, Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aliya-981@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9690-5095>

Mukanov Ruslan, PhD, associate professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: ruslangr82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9637-0513>

Murzagaliev Akhmet Zhakievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: akhmet-zhakiyevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-681X>

Мусин Динислям Кариевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: musin-d58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

Мусин Динислям Кариевич, кандидат технических наук, доцент, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Теміртау, 1014000, Республика Казахстан, e-mail: musin-d58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

Musin Dinislam Karievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Karaganda Industrial University, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: musin-d58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0339-2391>

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, қауымд. профессор, Сәтбаев университетінің «Машина жасау» кафедрасы, Алматы қ., 050013, Ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, ассоц.профессор, кафедра «Машиностроение», Сатпаев Университет, г. Алматы, 050013, Научный сотрудник, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, 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, Researcher, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

Мұхаммед Сахиб, PhD, Фраунгофер қолданбалы зерттеулерді ілгерілету қоғамының аға ғылыми қызметкері, Мюнхен қ., Германия, e-mail: mehsaq@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0630-5978>

Мұхаммед Сахиб, PhD, ст. научный сотрудник Общества Фраунгофера по продвижению прикладных исследований, Германия, г. Мюнхен, e-mail: mehsaq@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0630-5978>

Sahib Muhammad, PhD, Senior scientist of Fraunhofer Society for the Advancement of Applied Research, Munich, Germany, e-mail: mehsaq@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0630-5978>

Нұгман Ерік Зейнелұлы, PhD, қауымд. профессор, Ғылыми қызметкер, Сәтбаев университетінің «Машина жасау» кафедрасының меңгерушісі, Алматы қ., 050013, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

Нұгман Ерік Зейнелұлы, PhD, ассоц. профессор, Научный сотрудник, Заведующий кафедрой «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

Nugman Yerik, PhD, Head of Department Mechanical Engineering and Associate Professor, Satbayev University, Almaty, 050013, Researcher, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

Нуржанова Оксана Амангелдиевна, PhD, аға оқытушы, «Технологиялық жабдық, машина жасау және стандарттау» кафедрасы, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurzhanova_o@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0984-9284>

Onuralp Yucel, PhD, «Металлургия» мамандығы, Стамбул техникалық университеті, Стамбул қ, Түркия, e-mail: yucel@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3879-0410>

Оразалиев Берікбай Тлеукабылович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: berik.orazali@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8525-236X>

Оразбеков Дархан Еркинович, тмж магистрі Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: darik.krg@gmail.com

Нуржанова Оксана Амангельдыевна, PhD, ст. преподаватель, кафедра «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», Факультет машиностроение, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: nurzhanova_o@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0984-9284>

Onuralp Yucel, PhD, специальность «Металлургия», Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция, e-mail: yucel@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3879-0410>

Оразалиев Берікбай Тілеуқабұлыұлы, кандидат технических наук, доцент, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: berik.orazali@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8525-236X>

Оразбеков Дархан Еркинович, магистр тмо, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: darik.krg@gmail.com

Nurzhanova Oksana Amangeldyevna, PhD, Senior Lecturer at the Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylka Saginov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurzhanova_o@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0984-9284>

Onuralp Yucel, PhD, «Metallurgy», Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, e-mail: yucel@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3879-0410>

Orazaliev Berikbay Tileukabylovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Technical Faculty, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: berik.orazali@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8525-236X>

Orazbekov Darkhan Yerkinovich, Master of TMO, Алматы, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: darik.krg@gmail.com

Орунбеков Максат Багыбаевич, сениор-лектор, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, М. Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: orunbekov_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0220-4053>

Орунбеков Максат Багыбаевич, сениор-лектор, кафедра «Автоматизация и управление», АЛТ университет имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: orunbekov_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0220-4053>

Orunbekov Maxat Bagybayevich, Senior Lecturer of the Department of Automation and Management, ALT University named M. Tynyshpaev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: orunbekov_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0220-4053>

Панин Евгений Александрович, PhD, доцент, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: cooper802@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6830-0630>

Панин Евгений Александрович, PhD, доцент, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: cooper802@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6830-0630>

Panin Evgeniy Alexandrovich, PhD, Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: cooper802@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6830-0630>

Ковалевски Петр, PhD, қауымд. профессор, Машина жасау факультеті, Вроцлав ғылым және технология университеті, Вроцлав қ., PL0148, Польша, e-mail: piotr.kowalewski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2216-5706>

Ковалевски Петр, PhD, асоц. профессор, факультет Машиностроения, Вроцлавский университет науки и техники, г. Вроцлав, PL0148, Польша, e-mail: piotr.kowalewski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2216-5706>

Kowalewski Piotr, PhD, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, PL0148, Poland, e-mail: piotr.kowalewski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2216-5706>

Ракишев Асет Каригулович, PhD, «Технологиялық жабдықтар, машинажасау және стандарттау» кафедрасы доценті м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 010027, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.rakishev@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9535-4108>

Ракишев Асет Каригулович, PhD, и.о. доцента кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 010027, Республика Казахстан, e-mail: a.rakishev@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9535-4108>

Rakishev Asset Karigulovich, PhD, Acting Associate Professor of «Technological equipment, mechanical engineering and standardization», Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, 010027, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.rakishev@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9535-4108>

Райсов Нурмаханбет Саятулы, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беткі инженерия және трибология» ғылыми зерттеу орталығының инженері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurmakhanbetraisov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-1698-957X>

Райсов Нурмаханбет Саятулы, инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан; e-mail: nurmakhanbetraisov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-1698-957X>

Raisov Nurmakhanbet, Engineer of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», at P. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurmakhanbetraisov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-1698-957X>

Рамазанов Нурлан Мейрамұлы, «Металлургия» мамандығы бойынша магистрант, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurlan.2001.n@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6626-0589>

Рамазанов Нурлан Мейрамович, Магистрант по специальности «Металлургия», кафедра «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылқаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: nurlan.2001.n@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6626-0589>

Ramazanov Nurlan Meiramovich, Master's student in the specialty «Metallurgy», Department of «Nanotechnology and Metallurgy», Abylqas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurlan.2001.n@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-6626-0589>

Саденова Маржан Ануарбековна, химия ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, жетекші ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы

Саденова Маржан Ануарбековна, кандидат химических наук, ассоц. профессор, ведущий научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан

Sadenova Marzhan Anuarbekova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070000, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

Сазамбаева Баян Токушевна, техника ғылымдарының докторы, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010008 Қазақстан Республикасы, Астана қ., e-mail: a.sazambaeva_t@mail.ru

Сазамбаева Баян Токушевна, доктор технических наук, профессор, ЕНУ имени Гумилева, 010008 Республика Казахстан, г. Астана, e-mail: a.sazambaeva_t@mail.ru

Sazambayeva Bayan, Doctor of Technical Sciences, Professor, L. N. Gumilev Eurasian National University, 010008 Republic of Kazakhstan, Astana, e-mail: a.sazambaeva_t@mail.ru

Сайдалин Ерлан Нурханулы, техника ғылымдарының магистрі, Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: [erlan_saidalin](mailto:erlan_saidalin@agru.kz), <https://orcid.org/0009-0002-2364-1372>

Сайдалин Ерлан Нурханулы, магистр технических наук, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: [erlan_saidalin](mailto:erlan_saidalin@agru.kz), <https://orcid.org/0009-0002-2364-1372>

Saidalin Yerlan Nurkhanily, Master of Technical Sciences, Technical Faculty, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: [erlan_saidalin](mailto:erlan_saidalin@agru.kz), <https://orcid.org/0009-0002-2364-1372>

Сарбаев Далельхан Ардакович, магистрант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dalelhan20002@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8014-6823>

Сарбаев Далельхан Ардакович, магистрант, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100000, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: dalelhan20002@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8014-6823>

Sarvaev Dalelhan, Undergraduate student, Faculty of Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: dalelhan20002@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8014-6823>

Саркенов Берик Бейсенович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: sarkenovb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0512-5625>

Саркенов Берик Бейсенович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: sarkenovb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0512-5625>

Sarkenov Berik Beisenovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of « Nanotechnology and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: sarkenovb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0512-5625>

Сауханов Нургазы Сергазиевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7292-4752>

Сауханов Нургазы Сергазиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и строительства», АРУ имени К. Жубанова, г. Актөбе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7292-4752>

Saukhanov Nurgazy Sergazievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7292-4752>

Сименс Эдуард, PhD, профессор, Анхальт қолданбалы ғылымдар университеті, г. Кетен, 06366, Германия, eduard.siemens@hs-anhalt.de, <https://orcid.org/0000-0002-2986-3614>

Сименс Эдуард, PhD, профессор, Университет прикладных наук Анхальта, г. Кетен, 06366, Федеративная, Германия, e-mail: eduard.siemens@hs-anhalt.de, <https://orcid.org/0000-0002-2986-3614>

Eduard Siemens, PhD, professor, Anhalt University of Applied Sciences, Federal Keten, 06366, Germany, e-mail: eduard.siemens@hs-anhalt.de, <https://orcid.org/0000-0002-2986-3614>

Смаилова Баглан Кабдуллаевна, PhD, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baglansmailova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4506-6815>

Смаилова Баглан Кабдуллаевна, PhD, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: baglansmailova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4506-6815>

Smailova Baglan, PhD, student, Karaganda Technical University named after Abulkas Saginov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baglansmailova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4506-6815>

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, қауымдастырылған профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9319-0285>

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, ассоц. профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9319-0285>

Suleimenov Ansagan Dyusembaevich, PhD, associate professor, Faculty of Engineering, Toraihyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9319-0285>

Сүлүйбаева Лайла Гылыммедденовна, PhD, қаумдастырылған профессор, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: lsulyubayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

Сүлүйбаева Лайла Гылыммедденовна, PhD, ассоц. профессор, ст. научный сотрудник, научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: lsulyubayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

Sulyubayeva Laila Gylymmeddenovna, PhD, Associate professor, Senior Researcher at the Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: lsulyubayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

Сүйіндіков Мерхат Мәдениұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: suyundikovm@mail.ru

Суюндиков Мерхат Мадениевич, кандидат технических наук, профессор, Факультет Инженерии, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: suyundikovm@mail.ru

Suyundikov Merkhath Madeniyevich, Candidate of technical sciences, professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: suyundikovm@mail.ru

Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, М. Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sma-1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7099-8441>

Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и управление», АЛТ университет имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: sma-1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7099-8441>

Gulfariza Abatbekkyzy, Suleimenova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control, ALT University named M. Tynyshpaev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sma-1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7099-8441>

Ткачук Андрей Александрович, техника ғылымдарының магистры, аға оқытушы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tkachukandrey1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2230-3697>

Ткачук Андрей Александрович, магистр технических наук, ст. преподаватель, Факультет инженерии, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: tkachukandrey1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2230-3697>

Tkachuk Andrey Aleksandrovich, Master of Technical Science, Senior lecturer, Faculty of engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tkachukandrey1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2230-3697>

Тлемисов Бахтияр Бахытулы, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасының оқытушысы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Tlemissov.b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0049-6224>

Тлемисов Бахтияр Бахытулы, преподаватель, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация», Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: Tlemissov.b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0049-6224>

Tlemissov Bakhtiyar Bakhytuly, Lecturer, Department of Automation and Telecommunications, Taraz University named M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Tlemissov.b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0049-6224>

Тургунов Жаркынбек Серикбайулы, Ғылыми қызметкер, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Республика Қазақстан, e-mail: jarqyn.kz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1828-397X>

Туысхан Курметбек, техника ғылымдарының магистрі, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4272-2637>

Тұрдалиев Әуезхан Тұрдалыұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет Ректоры, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: auezhan_tur@mail.ru

Уазырханова Гулжаз Кенесханқызы, PhD, қауымд. профессор, Ғылыми-зерттеу қызметі бөлімі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан Техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: guazyhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9817-9752>

Тургунов Жаркынбек Серикбайулы, Научный сотрудник, Сәтбаев университет, г. Алматы, 050013, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Қазақстан, e-mail: jarqyn.kz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1828-397X>,

Туысхан Курметбек, магистр технических наук, «Карагандинский индустриальный университет», Факультет металлургии и машиностроения, г. Темиртау, 101400, Республика Қазақстан, e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4272-2637>

Турдалиев Әуезхан Турдалиевич, доктор технических наук, профессор. Ректор МТГУ, г. Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: auezhan_tur@mail.ru

Уазырханова Гулжаз Кенесханқызы, PhD, асоц. профессор, Департамент научно-исследовательской деятельности, Восточно-Казахстанский Технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Қазақстан, e-mail: guazyhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9817-9752>

Turgunov Zharkinbek, Researcher, Satbayev University, Almaty, 050013, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kaakhstan, e-mail: jarqyn.kz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1828-397X>

Tuyskhan Kurmetbek, Master engineering sciences, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4272-2637>

Turdaliev Auezkhan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the International university of transport and humanities, Kazakhstan, Almaty, e-mail: auezhan_tur@mail.ru

Uazyrkhanova Gulzhan Keneskhanquzy, PhD, Associate Professor, Department of Research Activities, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: guazyhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9817-9752>

Ульева Гульнара Анатольевна, техника ғылымдарының кандидаты, талдамалық бақылау орталығының металлтану және Дефектоскопия зертханасының жетекші маманы, АҚ «Qarmet», Теміртау қ., 101407, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.ulyeva@tttu.edu.kz <https://orcid.org/0000-0002-3600-1318>

Ульева Гульнара Анатольевна, кандидат технических наук, ведущий специалист лаборатории металлостроения и дефектоскопии Центра аналитического контроля, АО «Qarmet», Теміртау, 101407, Республика Казахстан, e-mail: g.ulyeva@tttu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3600-1318>

Ulyeva Gulnara Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Leading specialist of the Laboratory of Metallology and Flaw Detection of the Analytical Control Center, JSC «Qarmet», Temirtau, 101407, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.ulyeva@tttu.edu.kz <https://orcid.org/0000-0002-3600-1318>

Устемірова Райгүл Серікқызы, PhD, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, Алматы қ., e-mail: raigul_1980@mail.ru

Устемірова Райгүл Серікқызы, PhD, Международный транспортно-гуманитарный университет путей сообщения, Республика Казахстан, г. Алматы, e-mail: raigul_1980@mail.ru

Ustemirova Raigul, PhD, International university of transport and humanities, Kazakhstan, Almaty, e-mail: raigul_1980@mail.ru

Шкамац Елена, техника ғылымдарының докторы, доцент, Гедиминас атындағы Вильнюс техникалық университеті, Saulėtekio al. 11, Вильнюс, LT-10223, Литва, e-mail: jelena.shamat@vgtu.lt, <https://orcid.org/0000-0002-4441-6839>

Шкамац Елена, доктор технических наук, доцент кафедры машиностроения и материаловедения Вильнюсского технического университета имени Гедиминаса, Saulėtekio al. 11, LT-10223, Вильнюс, Литва, e-mail: jelena.shamat@vgtu.lt, <https://orcid.org/0000-0002-4441-6839>

Škamata J., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering and Materials Science at Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, Vilnius, LT-10223, Lithuania, e-mail: jelena.shamat@vgtu.lt, <https://orcid.org/0000-0002-4441-6839>

Шукаманов Жанибек Ерикович, аға оқытушы, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: shukamanov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>

Шукаманов Жанибек Ерикович, ст. преподаватель кафедры «Автоматизация и телекоммуникация», Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: shukamanov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>

Zhanibek Yerikovich, Shukamanov, Senior Lecturer, Department of Automation and Telecommunications, Taraz University named M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shukamanov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3017-7133>

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>

Теруге 05.12.24 ж. жіберілді. Басуға 30.12.24 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 № 4322

«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