

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

The Ministry of Education and Science of Ukraine
The Ukrainian State University of Science and Technologies

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ
НАУКОВІ ВІСТІ

MODERN PROBLEMS OF METALLURGY
SCIENTIFIC BULLETIN

№ 29

Дніпро 2026

Dnipro 2026

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №29, (2026). – Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології», 2025. – 424с.

ISSN 1991-7848 (Print)

ISSN 2707-9457 (Online)

Головний редактор: д.т.н., проф. Селівьорстов В.Ю.

Редакційна колегія збірника:

Селівьорстов В.Ю., д.т.н., проф.,

Фролов Я.В., д.т.н., проф.,

Селівьорстова Т.В. к.т.н., доц.,

Єрьомін О.О., д.т.н., проф.,

Маліч М.Г., д.т.н., проф.,

Шалевська І.А., д.т.н., проф.,

Наумик В.В., д.т.н., проф.,

Лютий Р.В., д.т.н., проф.,

Ямшинський М.М., д.т.н., проф.,

Nürnberg F., с.н.с., д.т.н., проф., (Німеччина)

Borodianskiy K., к.т.н., доц. (Ізраїль)

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради

Українського державного університету науки і технологій

від 28.01.2026 р., № 6

Адреса редакції збірника:

49005, м. Дніпро, пр. Науки, 4,

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,

кафедра Інформаційних технологій і систем,

e-mail: st@nmetau.edu.ua

+3 8 (097) 685 45 25

© Український державний університет науки і технологій
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
ІВК «Системні технології», 2026.

РОЗРОБКА ТИПОВОЇ АРХІТЕКТУРИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПРИ КЕРУВАННІ ОЧИСНИМИ СПОРУДАМИ

Анотація. У статті запропоновано типову архітектуру побудови цифрового двійника в автоматизованому виробництві. Вона ґрунтується на використанні рівнів для мінімізації часу розроблення цифрового двійника та забезпечує гнучкість та здатність поступово розширюватися без радикальних змін. Розглянуто рівні системи та надано рекомендації, щодо складових рівнів та їхнього розроблення.

Ключові слова: архітектура цифрового двійника, цифрові двійники, автоматизоване виробництво, очисні споруди, багаторівнева архітектура, IoT, хмарні обчислення, граничні обчислення.

Постановка проблеми.

Сучасні очисні споруди є складними технологічними об'єктами, ефективне управління якими потребує впровадження цифрових двійників для моделювання, прогнозування та оптимізації процесів очищення в реальному часі. В концепції Індустрії 4.0 кожен актив повинен мати цифрову копію, тому в автоматизованому виробництві набуває поширення поетапне впровадження цифрових двійників, починаючи з пілотних проєктів і поступовим масштабуванням на всі підрозділи або процеси. Основними цілями впровадження цифрових двійників є зниження витрат на енергоспоживання, покращення якості продукції, підвищення ефективності технічного обслуговування та скорочення часу простою. І тут постає науково-практична проблема формулювання принципів побудови цифрових двійників та розробки типової архітектури, яка б сприяла швидкому впровадженню пілотних проєктів з поступовим масштабуванням цифрових двійників на всі активи та процеси автоматизованого виробництва.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз досліджень з інтеграції цифрових двійників у виробництво показав, що існують різноманітні підходи, які дозволяють підвищити точність і ефективність, а також знизити витрати і час на розробку [1]. Але для поступового впровадження цифрових двійників у промисловому середовищі необхідно провести додаткові дослідження та стандартизацію. Треба визначити узгоджену концепцію для цілісного використання цифрових двійників, що охоплює питання стандартизації інтерфейсів, їх взаємодії та ефективного обміну інформацією, щоб забезпечити широке впровадження цих підходів у промисловість [2]. У зв'язку з цим постає науково-практична задача зі створення типової архітектури системи з використанням цифрових двійників.

Мета досліджень. Метою дослідження, наведеного в даній статті, є визначення типової архітектури системи з використанням цифрових двійників в автоматизованому виробництві. Також будуть розглянуті різноманітні інструменти для симуляції фізичних процесів, збору, обробки та зберігання інформації, візуалізації метрик та станів цифрового двійника, питання безпеки та типові шляхи впровадження цифрових двійників.

Викладення основного матеріалу досліджень. Слід зазначити, що підходи до розробки цифрових двійників у виробництві дуже різноманітні, що відображає різноманітність виробничих процесів, цілей і технологічних екосистем. Ця мінливість виникає внаслідок таких факторів, як тип виробленого продукту, складність виробничої системи, розвиненість цифрової інфраструктури організації та конкретні цілі (наприклад, оптимізація, прогнозне обслуговування або контроль якості). Виходячи з цього перед створенням цифрового двійника варто враховувати наступні фактори:

1. *Обсяг і деталізація.*
 - а. Один актив: цифровий двійник одного верстата для моніторингу зносу чи оптимізації, з простими моделями та датчиками.
 - б. Система: моделювання цілих ліній чи заводів із складними IoT-платформами для врахування взаємозв'язків.
2. *Джерела даних та інтеграція.*
 - а. IoT пристрої: Реальні дані з IoT пристроїв.

- b. Традиційні системи: Дані з PLC чи SCADA через проміжне програмне забезпечення.
 - c. Гібрид: Поєднання реальних даних з IoT пристроїв та PLC, SCADA із даними ERP/MES систем для контексту.
3. *Техніки моделювання.*
- a. Фізичні: Точні моделі (MATLAB) для симуляції фізичних процесів.
 - b. Машинне навчання (Machine Learning): для прогнозів на основі трендів.
 - c. Гібрид: Комбінація моделювання фізичних явищ за допомогою точних моделей та машинного навчання.
4. *Технологічний стек.*
- a. На основі готових рішень, таких як AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Siemens MindSphere, GE Predix Platform та інші.
 - b. Власні рішення на хмарних технологіях AWS, Azure, GCP чи відкритих інструментах.
 - c. Комбінація готових інструментів і скриптів.
5. *Мета й використання.*
- a. Прогнозування: Виявлення збоїв із ML та датчиками.
 - b. Оптимізація: Налаштування процесів із симуляціями.

Контроль якості: Відстеження дефектів із статистичними інструментами.

Також необхідно враховувати бюджет для створення цифрових двійників, який помітно варіюється залежно від масштабу проекту, галузі, складності технологій та рівня зрілості інфраструктури. Компанії часто починають з малого і масштабуються, тому архітектура системи з використанням цифрових двійників повинна бути модульною, гнучкою, економічно вигідною та здатною поступово розширюватися без радикальних змін.

Тепер можна визначити основні принципи типової архітектури системи з використанням цифрових двійників:

- 1. Модульність: Кожен рівень додає нові компоненти без перебудови основи (наприклад, від локального SQLite до хмарного DynamoDB).
- 2. Відкритість: Початок із безкоштовних інструментів (Python, Raspberry Pi) дозволяє легко перейти до комерційних (AWS, Siemens).

3. Масштабованість: Хмара та IoT-шлюзи забезпечують поступове розширення від одного активу до заводу.
4. Простота старту: Локальні рішення знижують початкові витрати й залежність від зовнішніх сервісів.
5. Безпека: Додається поступово від базового шифрування (HTTPS) до повних рішень (TLS, OAuth).

Враховуючи вищезазначені принципи можна сформулювати рівні (Layers) типової архітектури системи з використанням цифрових двійників в автоматизованому виробництві які представлено на рис. 1: фізичний (Physical Layer), рівень прийому даних (Data Ingestion Layer), рівень збереження та обробки даних (Data Management Layer), рівень моделювання та імітації (Modeling and Simulation Layer), аналітичний та прикладний рівень (Analytics and Application Layer).

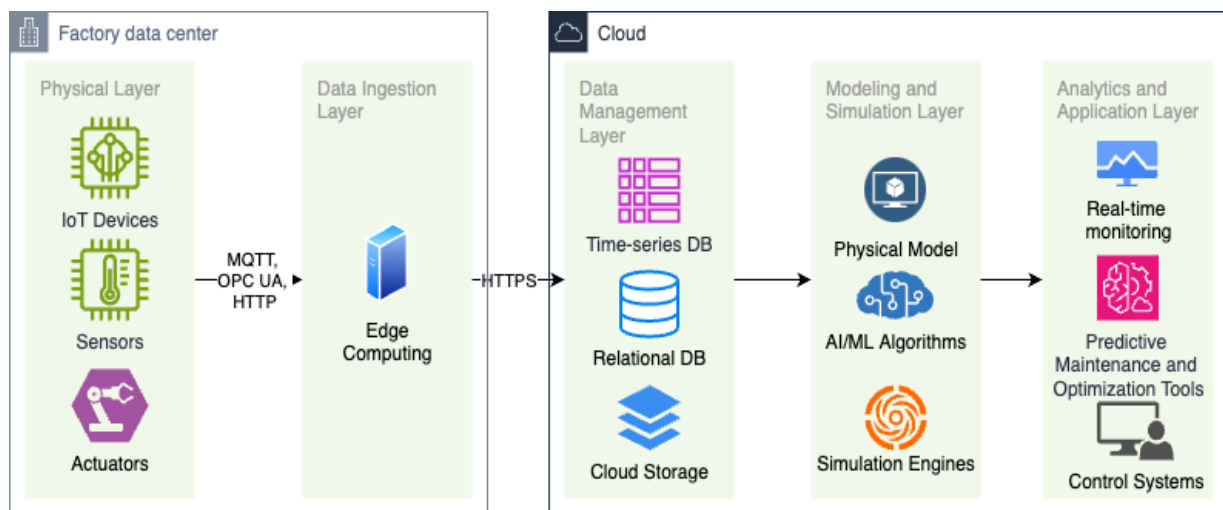


Рисунок - 1. Архітектура модулю графічного інтерфейсу

Фізичний рівень і рівень прийому даних знаходяться безпосередньо на виробництві, що дозволяє мінімізувати трафік шляхом фільтрації та трансформації даних з подальшим надсиланням в хмару. Інші три рівні знаходяться в хмарі, пропонуючи гнучкість та масштабованість, швидке розгортання, доступність, економію витрат (“pay-as-you-go”), тощо.

Розглянемо зазначені рівні детально.

Фізичний (Physical Layer) рівень - це сукупність реальних об'єктів або процесів, таких як машини, апарати, будівлі, виробничі лінії чи технологічні

вузли очисних споруд (аеротенки, відстійники, насосні станції), які моделюються цифровим способом. Він включає датчики для збору первинних даних (наприклад, температури, тиску, швидкості потоку, рівня розчиненого кисню, каламутності чи концентрації забруднюючих речовин), виконавчі механізми для коригування параметрів процесу на основі цифрових сигналів (регулятори частоти обертання насосів, засувки, дозатори реагентів), а також IoT-пристрої, що забезпечують стабільний двосторонній зв'язок фізичної системи з її цифровим двійником. Цей рівень є джерелом необробленого потоку телеметричних даних та одночасно виконавчою ланкою, яка реалізує керуючі команди, отримані від цифрового двійника у відповідь на результати аналітики.

Рівень прийому даних (Data Ingestion Layer) відповідає за збирання, безпечну передачу, буферизацію та первинну обробку даних із фізичного об'єкта. Він використовує інформацію з датчиків та IoT-пристроїв, а також промислові та IT-протоколи зв'язку, такі як MQTT, OPC UA, Modbus TCP чи HTTP, адаптуючи їх під специфіку кожного типу обладнання. Основним архітектурним елементом цього рівня є граничні обчислення (Edge computing), що попередньо обробляють дані локально - виконують фільтрацію шумів, нормалізацію, агрегацію та виявлення аномальних значень для зменшення мережевої затримки, ефективного використання пропускної здатності каналу зв'язку та підвищення стійкості системи при тимчасовій втраті з'єднання з хмарою. Цей рівень забезпечує безперебійний, безпечний та відмовостійкий обмін даними між фізичною системою та її цифровим двійником.

Рівень збереження та обробки даних (Data Management Layer) збирає, упорядковує, зберігає та вдосконалює вхідні дані, щоб вони були придатними для моделювання та подальшої аналітики в межах цифрового двійника. Він використовує різноманітні інструменти, такі як бази даних часових рядів (наприклад, InfluxDB чи TimescaleDB), реляційні бази даних (наприклад, PostgreSQL) для зберігання структурованої контекстної інформації або хмарні об'єктні сховища (наприклад, AWS S3) для архівації великих обсягів історичних даних. Даний рівень об'єднує дані реального часу з історичною інформацією, довідниками та зовнішніми джерелами (метеорологічними, лабораторними аналізами), а також покращує необроблені дані за допомогою очищення,

валідації, дедуплікації та агрегації [3]. Основна функція цього рівня має на меті забезпечити цілісну, узгоджену та добре організовану базу даних для моделювання й аналітики.

Рівень моделювання та імітації (Modeling and Simulation Layer) є центральним осередком системи цифрового двійника, де створюється, калібрується та постійно оновлюється складна віртуальна копія реального об'єкта. Він включає такі компоненти, як 3D-моделі або фізичні симуляції (наприклад, CAD-проекти та гідродинамічні моделі) для відображення геометричної структури та динаміки поведінки фізичного об'єкта, алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозової аналітики, виявлення аномалій [4] та оптимізації продуктивності технологічних процесів, а також потужні симуляційні платформи, які дозволяють цифровому двійнику відтворювати та досліджувати поведінку фізичного об'єкта у віртуальному середовищі. MATLAB і Simulink вирізняються в математичному моделюванні та симуляції динамічних систем, забезпечуючи детальний аналіз технічних сценаріїв і реакцій, залежних від часу, та дозволяють будувати моделі у формі диференціальних рівнянь або блок-схем, тоді як Unity пропонує візуалізацію в реальному часі у 3D та інтерактивні середовища для просторових або візуальних експериментів і підготовки персоналу [5].

Завдяки запуску гіпотетичних сценаріїв, наприклад, змін умов роботи, коливань навантаження, зміни якості вхідної сировини чи відмови окремих компонентів, ці інструменти допомагають прогнозувати майбутню продуктивність, знаходити шляхи до вдосконалення конструкції, оптимізувати режими експлуатації та зменшувати операційні й технологічні ризики без будь-якого впливу на реальний об'єкт. Ключова роль цього рівня полягає у точному відтворенні поточного стану фізичного об'єкта, симуляції його поведінки в реальному світі та достовірному передбаченні майбутніх результатів, аварійних ситуацій чи потенційних проблем.

Аналітичний та прикладний рівень (Analytics and Application Layer) є ключовим мостом між цифровим двійником та його впливом на реальний світ, об'єднуючи аналітичні можливості, моніторинг системи та засоби взаємодії з оператором. З боку аналітики він обробляє потоки даних від цифрового двійника, зокрема показники датчиків, результати симуляцій та обчислені

ключові показники ефективності, використовуючи моніторинг у реальному часі для виявлення поточних проблем та відхилень, алгоритми прогнозного обслуговування для передбачення майбутніх збоїв (наприклад, перегрівання двигуна за три тижні) [6] та інструменти оптимізації для формування обґрунтованих пропозицій щодо покращень (наприклад, зменшення енергоспоживання на 10% або скорочення витрати реагентів). Цей рівень також включає інформаційні панелі та системи керування, що надсилають точні вказівки фізичному об'єкту, наприклад, регулюють швидкість конвеєрної стрічки, продуктивність повітродувки чи дозування коагулянтів на основі аналітичних прогнозів. У свою чергу цей рівень гарантує, що цифровий двійник - це не просто пасивна модель, а динамічний інструмент для прийняття рішень, оптимізації та операційного контролю.

Висновки. У статті запропоновано типову багаторівневу архітектуру системи з використанням цифрових двійників в автоматизованому виробництві при керуванні очисними спорудами, що дозволяє розпочинати впровадження з базового функціоналу окремого активу та поступово масштабувати систему до рівня всієї очисної споруди і, за потреби, цілого підприємства. Це досягається за допомогою розмежування на рівні, кожен з яких є гнучким та здатним поступово розширюватися без радикальних змін.

На основі запропонованої архітектури визначено стратегію поетапного створення цифрового двійника очисних споруд. З урахуванням того, що очисні споруди, як правило, вже оснащені діючою системою автоматизації на базі програмованих логічних контролерів та систем SCADA, на першому етапі для мінімізації початкових капітальних витрат як основне джерело даних обрано існуючу інфраструктуру, а для рівня моделювання обрано підхід на основі детермінованих фізичних моделей, що забезпечує точне математичне відтворення біохімічних та гідравлічних процесів очищення без потреби у значних обсягах історичних даних. Основними цілями першого етапу визначено моніторинг та контроль якості технологічних процесів очищення, а також систематичне накопичення історичних даних, які на наступних етапах стануть основою для переходу до гібридних технік моделювання із застосуванням алгоритмів машинного навчання та впровадження функцій прогнозного обслуговування й оптимізації енергоспоживання.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Benjamin Schleich, Nabil Anwer, Luc Mathieu, Sandro Wartack, Shaping the digital twin for design and production engineering, CIRP Annals, Volume 66, Issue 1, 2017, Pages 141-144.
2. Raphael Wagner, Benjamin Schleich, Benjamin Haefner, Andreas Kuhnle, Sandro Wartack, Gisela Lanza, 2019, Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products, Procedia CIRP Volume 84, 2019, Pages 88-93.
3. Hu, L., Nguyen, N.T., Tao, W., Leu, M.C., Liu, X.F., Shahriar, M.R., Al Sunny, S.N., 2018. Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with mt connect. Procedia manufacturing 26, 1193–1203.
4. Celebi M.E., Aydin K., Unsupervised Learning Algorithms, Springer International Publishing (2016), pp. 1-558.
5. Liu Q., Zhang H., Leng J., Chen X. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. Int. J. Prod. Res., 57 (12) (2019), pp. 3903-3919.
6. K.A.B. Asare, R. Liu, C.J. Anumba, R.R.A. Issa, Real-world prototyping and evaluation of digital twins for predictive facility maintenance, J. Build. Eng., 97 (Nov) (2024)

Received 15.03.2026.

Accepted 20.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.94:628.32

Oleksandr Yanov, Oleh Klymenko

DEVELOPMENT OF A REFERENCE ARCHITECTURE FOR BUILDING DIGITAL TWINS IN AUTOMATED PRODUCTION FOR WASTEWATER TREATMENT PLANT CONTROL

Abstract. *Analysis of recent research and publications. Analysis of contemporary research on the integration of digital twins into production processes reveals the existence of numerous approaches aimed at improving modeling accuracy, enhancing equipment operational efficiency, and reducing development time and resource consumption. However, existing developments are predominantly oriented toward specific application tasks and do not provide a unified conceptual foundation for the phased implementation of digital twins in industrial environments. Issues related to interface standardization, interoperability between heterogeneous components, efficient data exchange, and a coherent architectural model that enables gradual scaling from pilot projects to the enterprise level require additional investigation. This justifies the relevance of developing a reference architecture for systems utilizing digital twins, particularly for such complex technological facilities as wastewater treatment plants.*

Research objective. The objective of the article is to develop a reference multi-layer architecture for building digital twins in automated production for wastewater treatment plant control, which ensures modularity, flexibility, and the capacity for gradual expansion without radical changes to the system structure.

Presentation of the main research material. The article analyzes the key factors that must be considered prior to creating a digital twin: the scope and granularity of modeling (from a single asset to an entire production line), data sources (IoT devices, PLCs, SCADA, ERP/MES systems), modeling techniques (physics-based models, machine learning, or hybrid approaches), technology stack (off-the-shelf solutions, custom cloud-based developments, or combined variants), and intended purpose (prediction, optimization, quality control). The fundamental principles of architecture design are formulated: modularity, openness, scalability, simplicity of initial deployment, and incremental security implementation. Based on these principles, an architecture consisting of five layers is proposed: the Physical Layer, Data Ingestion Layer, Data Management Layer, Modeling and Simulation Layer, and Analytics and Application Layer. The first two layers are located directly at the production site, which minimizes network traffic through local data filtering and transformation, while the remaining layers are deployed in the cloud environment, providing flexibility, scalability, and cost efficiency through the pay-as-you-go model. For each layer, recommendations are provided regarding the selection of protocols (MQTT, OPC UA, HTTP), storage technologies (InfluxDB, PostgreSQL, AWS S3), and modeling tools (MATLAB, Simulink, Unity).

Conclusions. The proposed reference multi-layer architecture allows the implementation of a digital twin to commence with the basic functionality of an individual asset and to be gradually scaled to cover the entire wastewater treatment facility or enterprise. A strategy for the phased development of a digital twin for wastewater treatment plants is defined: at the initial stage, the existing PLC- and SCADA-based infrastructure is used as the data source, and modeling is built upon deterministic physics-based models of biochemical and hydraulic processes. Subsequent stages involve transitioning to hybrid modeling techniques incorporating machine learning algorithms and introducing predictive maintenance and energy consumption optimization functions. This approach minimizes initial capital expenditures and ensures the systematic accumulation of historical data for the further development of the system.

Keywords: digital twin architecture, digital twins, automated production, wastewater treatment plants, multi-layer architecture, IoT, cloud computing, edge computing.

Янов Олександр Олександрович - аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Національного університету харчових технологій, Київ.

Клименко Олег Миколайович - доцент, кандидат технічних наук. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Національного університету харчових технологій, Київ, <https://orcid.org/0000-0002-3525-7805>.

Yanov Oleksandr Oleksandrovych - Post-Graduate Student of Automation, Computer-integrated Technologies and Robotics Department, National University of Food Technologies, Kyiv.

Klymenko Oleh Mykolaiovych - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Computer-integrated Technologies and Robotics Department, National University of Food Technologies, Kyiv, <https://orcid.org/0000-0002-3525-7805>.

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЗМІНИ ГЕОМЕТРІЇ ПІСЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА УДАРНО-АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ

Анотація. Сучасний етап розвитку матеріалознавства характеризується високим рівнем досліджень структури та механічних властивостей матеріалів. Подальший прогрес у цій галузі пов'язаний не лише з розробленням принципово нових методів випробувань, але й із вдосконаленням існуючих підходів шляхом інтеграції сучасних цифрових технологій реєстрації та аналізу даних. Це дозволяє не тільки підвищити точність вимірювань та збільшити кількість проміжних значень, але й визначати додаткові характеристики поведінки матеріалу, що раніше були недоступними для прямого вимірювання. Метою цієї роботи є розширення інформативності методу випробувань на ударно-абразивне зношування шляхом цифровізації його результатів для отримання комплексної оцінки опору матеріалу динамічному абразивному впливу. У роботі представлено огляд методів проведення випробувань на абразивне та ударно-абразивне зношування та розглянуто аспекти вдосконалення методики визначення показників для аналізу результатів ударно-абразивного зношування. На відміну від класичних підходів, які обмежуються лише визначенням втрати ваги зразка, запропонована методика включає додаткове 3D-сканування для кількісної оцінки зміни геометрії поверхні після випробувань. Наукова новизна полягає у можливості не лише фіксувати загальний показник зношування (втрату ваги), але й безпосередньо вимірювати розподіл та величину пластичної деформації, що накопичується в металі під дією ударного впливу абразивних частинок. Запропонований підхід дозволяє перейти від одомірної оцінки зносостійкості до двовимірної (втрата ваги + деформаційний рельєф). За результатами 3D-сканування та подальшої обробки отриманої інформації формується графічне зображення (карта глибин або профілограма), яке кількісно характеризує опір матеріалу пластичному деформуванню в умовах ударно-абразивної дії. Це відкриває нові можливості для порівняльного аналізу матеріалів, прогнозування їх

поведінки в умовах експлуатації та верифікації математичних моделей процесів зношування.

Ключові слова: ударно-абразивний знос, зважування, топографія поверхні, параметри зношування, оптична профілометрія, 3D-сканування, пластична деформація, експлуатаційні властивості.

Сучасний етап розвитку матеріалознавства характеризується поглибленими дослідженнями структури та механічних властивостей матеріалів. Подальший розвиток галузі пов'язаний не лише з впровадженням нових методів випробувань, а й із удосконаленням наявних підходів шляхом інтеграції сучасних цифрових технологій для збору та обробки даних. У машинобудуванні та для транспорту поширеною є проблема зношування деталей у процесі експлуатації, що зумовлює необхідність встановлення причин, пошуку способів підвищення опору зношуванню, надійного прогнозування відмови та часу ремонту деталей. Для цього недостатньо оперувати єдиним показником зношування – втратою ваги, тому зміни в процесі тертя можуть бути ідентифіковані за характерними ознаками мікроструктури та морфологічними змінами поверхні. Аналіз цих ознак дозволяє не лише визначити механізми руйнування, але й оцінити умови експлуатаційного навантаження. На основі отриманих даних стає можливим обґрунтований вибір матеріалів із підвищеною зносостійкістю та оптимізація конструкційних рішень. Крім того, контроль і вимірювання зношування відіграють важливу роль для успішного відновлення, ремонту та повторного використання деталей. Використання відновлених компонентів дозволяє знизити ресурсні та енергетичні витрати, а також зменшити негативний вплив на довкілля.

Метою цієї роботи є підвищення інформативності та точності методу випробувань на ударно-абразивне зношування.

Спочатку було проведено систематичний аналіз особливостей проведення таких випробувань, включаючи фактори, що впливають на процес зношування та достовірність отриманих результатів. На основі цього аналізу вдосконалено методику дослідження, що дозволяє більш точно визначати параметри зносу та оцінювати розподіл зміни геометрії на різних ділянках випробовуваних зразків.

Зношування має складну багатофакторну природу і визначається не лише властивостями матеріалу, а й умовами його роботи, тобто характеристиками трибологічної системи в цілому. Це включає тип контакту, умови навантаження, швидкість відносного руху, середовище, наявність абразивних частинок або змащування тощо. Інтенсивність зношування залежить від ряду експлуатаційних факторів. Втрата матеріалу може корелювати з характеристиками абразивного матеріалу та часом взаємодії, причому для пластичних матеріалів характерна наявність інкубаційного періоду, після якого починається інтенсивне руйнування. Для крихких матеріалів така стадійність, як правило, відсутня [1].

Існує декілька підходів до класифікації зношування. За механізмами руйнування виділяють чотири основні типи: поверхнева втома, абразивне зношування (стирання), адгезійне зношування та трибохімічні процеси [2]. Окремо розглядають такі види, як фретинг і корозійне зношування.

Абразивне зношування відбувається внаслідок механічного видалення матеріалу більш твердими частинками або поверхнями. При цьому розрізняють двочастинкове (двотільне) зношування, коли абразив жорстко закріплений і рух відбувається в одній площині, та тричастинкове (тритільне), що реалізується за умов довільного руху вільних абразивних частинок. Ударне зношування виникає при багаторазових зіткненнях частинок або тіл із поверхнею матеріалу і може реалізовуватися під різними кутами атаки. Залежно від умов взаємодії розрізняють ерозійне та власне ударне зношування. Ерозія проявляється як поступова втрата матеріалу внаслідок дії потоку твердих частинок, які хаотично взаємодіють із поверхнею.

У реальних умовах експлуатації, зокрема в гірничій промисловості (під час роботи конвеєрів, дробарок, навантаження та розвантаження матеріалів), ударна дія абразивних частинок поєднується з процесами абразивного зношування. Такий комбінований механізм отримав назву ударно-абразивного зношування і характеризується втратою матеріалу внаслідок багаторазових ударів абразивних частинок [3]. Враховуючи складність процесів при ударно-абразивному зношуванні, утворювані пошкодження мають свої особливості. Якщо за умови суто абразивного зношування втрата матеріалу реалізується переважно за рахунок мікромеханізмів дряпання, різання, та клиноутворення,

що визначаються навантаженням і властивостями абразивних частинок [4], то за умови ударно-абразивної дії абразивні частинки взаємодіють із поверхнею під різними кутами (від 0° до 90°) та з різними швидкостями. За малих кутів дії переважають механізми, характерні для абразивного зношування [5]. Із збільшенням кута та енергії удару реалізується локальне витіснення або видалення матеріалу з утворенням ударних кратерів. При майже нормальному ударі в зоні контакту формується валик шляхом витиснення матеріалу зразку. Це зумовлює суттєві відмінності у структурі і властивостях підповерхневого шару: для ударно-абразивної дії характерні інтенсивна пластична деформація, перемішування матеріалу та вбудовування абразивних частинок, тоді як при чисто абразивному зношуванні такі ефекти виражені значно слабше [6].

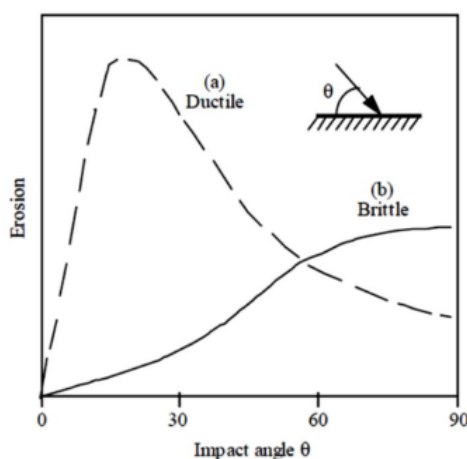


Рисунок 1 - Вплив кута удару на втрату матеріалу: а – пластичні матеріали з піком зносу при малих кутах дії, б – крихкі матеріали [1, 6]

Важливою особливістю є різний вплив механічних властивостей матеріалу на зносостійкість. Для абразивного зношування характерна чітка залежність: зі зростанням твердості інтенсивність зношування зменшується [7]. Натомість при ударно-абразивному зношуванні ця залежність має значний розкид, і в окремих випадках підвищення твердості може навіть призводити до збільшення зносу [8]. Це пояснюється тим, що в умовах ударного навантаження визначальними стають також в'язкість, пластичність і здатність матеріалу до деформаційного зміцнення. Загалом зносостійкість визначається сукупністю властивостей, мікроструктурою, фазовим складом, а також параметрами взаємодії в трибологічній системі [5, 9].

Швидкість ударно-абразивного зношування також визначається швидкістю зіткнення частинок, причому ця залежність має степеневий характер; показник ступеню є вищим для крихких матеріалів. Кут атаки істотно впливає на механізм руйнування: для пластичних матеріалів максимальна інтенсивність ерозії спостерігається за малих кутів, тоді як для крихких – за кутів, близьких до нормального [1, 5].

Суттєвий вплив мають також характеристики абразивних частинок, зокрема їх розмір, форма та твердість [10]. Встановлено критичний розмір частинок, після досягнення якого швидкість ерозії стабілізується. Для пластичних матеріалів швидкість зношування зменшується, якщо відношення твердості частинок до твердості матеріалу є меншим за одиницю. Додатковими факторами є щільність потоку частинок та температура середовища. Процес руйнування при багаторазових ударах відбувається у два етапи: зародження та розвиток тріщин у підповерхневому шарі, а також відокремлення частинок зносу у вигляді лусочок [11]. У зв'язку з цим матеріали, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування, повинні поєднувати високу твердість із достатньою пластичністю та в'язкістю, що забезпечує опір як пластичній деформації, так і крихкому руйнуванню [12, 13]. Тому при аналізі механізмів деградації поверхні необхідно враховувати не лише втрату ваги як показник зношування, а й параметри, які характеризують процеси пластичної деформації, руйнування та структурних змін у матеріалі.

Слід зазначити, що на сьогодні відсутня уніфікована методика визначення ударно-абразивного зношування, незважаючи на його широке використання у наукових і прикладних дослідженнях для опису складних умов руйнування, в яких одночасно реалізуються механізми ударної та абразивної дії.

Суттєвою проблемою є складність відтворення реальних умов експлуатації в лабораторних випробуваннях. На практиці умови характеризуються високою мінливістю, зокрема зміною температури, вологості, складу та концентрації абразивних частинок, а також нерівномірністю навантаження в часі. Крім того, геометрія та розташування елементів конструкції впливають на інтенсивність зношування; наприклад, периферійні елементи ковша екскаватора зношуються швидше, ніж центральні [14].

Моделювання процесів ударно-абразивного зношування засобами чисельного аналізу хоча й має своїх прихильників (ABAQUS та Ls-DYNA) є обмеженим через складність опису багатофакторної взаємодії частинок між собою, із поверхнею матеріалу та рухомими елементами системи (наприклад, обертання барабана, змінні швидкості та тривалість навантаження).

У зв'язку з цим, вдосконалення експериментальних методик базується на створенні випробувального обладнання, здатного максимально імітувати реальні умови роботи матеріалу. При цьому вибір методики має бути обґрунтованим специфікою роботи матеріалу. Це є критично важливим для отримання достовірних результатів і коректної оцінки матеріалів за зносостійкістю.

На сьогодні найбільш поширеними методами випробувань є дослідження зношування за схемою «штифт–диск» та випробування в умовах тертя сухим піском із використанням гумового колеса [15, 16]. Але вони, як правило, не дозволяють використовувати абразивні частинки, характерні для реальних умов експлуатації, і переважно є орієнтованими на оцінку зносостійкості за твердістю матеріалу. Зміна структурного стану чи зменшення крихких характеристик окремих фаз підвищують супротив ударному руйнуванню при одночасній стійкості до абразивного зношування. Наприклад, високолеговані білі чавуни з високим вмістом хрому демонструють високу зносостійкість у випробуваннях цього типу завдяки наявності твердих карбідних фаз, що перешкоджають проникненню абразиву. Однак в умовах ударного або виривного зношування їхня ефективність суттєво знижується внаслідок крихкого руйнування та фрагментації карбідів, що призводить до інтенсифікації зношування [17]. Мартенсит, який утворюється із залишкового аустеніту під дією динамічних навантажень чавуну здатен чинити опір крихкому руйнуванню тільки завдяки легуванню [18].

Одним із найрозповсюдженіших методів дослідження ударно-абразивного зношування є барабанні методи випробування, зокрема типу *impeller-tumbler*, що при випробуванні створює каскадний потік абразивних частинок. Незважаючи на відсутність стандартизації, ці методи широко застосовуються у наукових і прикладних дослідженнях завдяки здатності

відтворювати умови взаємодії матеріалу з потоком абразивних частинок, наближених до умов експлуатації [2, 19, 20].

В дослідницькій практиці використовувалися різні конструкції установок. Типова конструкція випробувальної установки включає сталевий барабан із можливістю герметичного закриття, всередині якого розміщено маточину робочого колеса з тримачами для зразків. Зразки, як правило, встановлюються під заданими кутами (наприклад, 45° або 90°) до напрямку руху абразиву. Барабан заповнюється абразивними частинками (щебінь, гранітна крихта, металевий дріб тощо) і обертається з відносно невеликою швидкістю, що забезпечує безперервний каскадний рух частинок і їхню взаємодію із зразками (рис. 2).

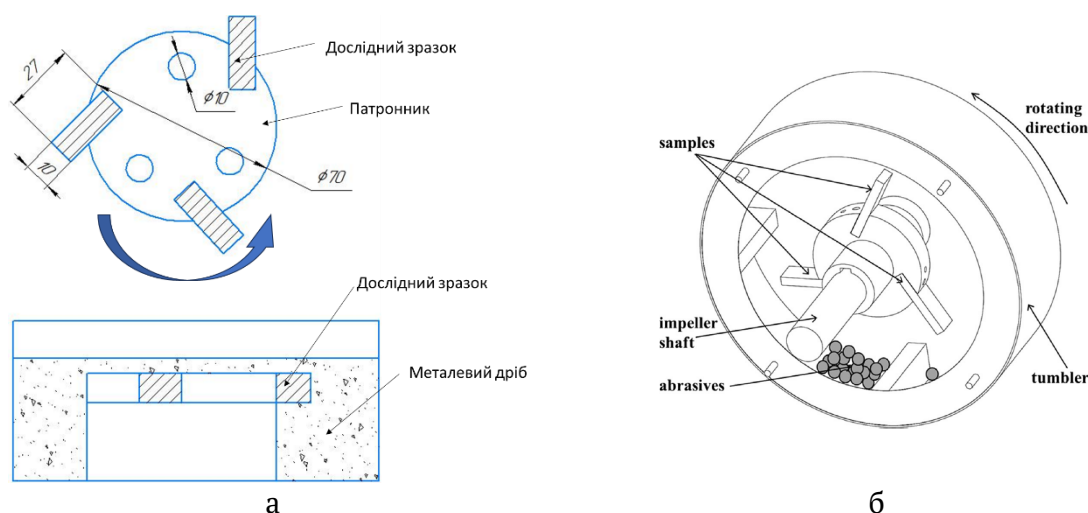


Рисунок 2 – Приклади схем робочої камери дослідних машин для визначення ударно-абразивного зношування: а – машина УА-3, б – машина MLD-10 [20]

Важливим є вплив. розташування зразків у барабані [21], тому воно має бути максимально уніфікованим, щоб забезпечити однакові умови навантаження. Для підвищення достовірності результатів доцільно здійснювати перестановку зразків між тримачами або використовувати еталонні зразки для контролю відтворюваності умов.

Параметри випробування суттєво впливають на інтенсивність зношування. Зокрема, швидкість обертання барабана повинна забезпечувати вільний рух частинок: при надто низьких швидкостях зменшується кількість зіткнень, тоді як при надто високих – абразивні частинки утримуються на периферії

барабана, що також знижує ефективність їх взаємодії зі зразками. Також важливими є гранулометричний склад, форма та твердість абразиву, які повинні залишатися стабільними принаймні в межах одного випробування. Умови зношування регулюються кількістю абразиву, розміром частинок, тривалістю та режимом випробування. Хоча стандартна тривалість становить близько 1 години, багатогодинні випробування вважаються більш репрезентативними, оскільки дозволяють врахувати еволюцію процесів зношування [22].

Характерною особливістю барабанних методів є локалізація зношування у крайових зонах зразків [5]. Встановлено, що швидкість зношування кромки може значно перевищувати зношування центральних ділянок, особливо на початкових стадіях випробування та при великих кутах встановлення зразків. Це дозволяє ефективно моделювати експлуатаційні умови для елементів, які працюють у режимах інтенсивного крайового зношування (кромки ковшів, лопатки, транспортні елементи) [23].

Водночас така нерівномірність розподілу зношування потребує обережного підходу до інтерпретації результатів і вибору зон для аналізу. Для отримання репрезентативних даних необхідно забезпечувати достатню тривалість випробувань та враховувати геометричні особливості зразків.

Результати випробувань на ударно-абразивне зношування визначаються за допомогою комплексу кількісних і якісних параметрів, що характеризують як інтенсивність втрати матеріалу, так і механізми його руйнування.

Найбільш поширеним підходом є зважування, яке—базується на вимірюванні втрати ваги зразка за певний проміжок часу або на одиницю площі [24, 25]. Простота реалізації та кількісний характер результатів зумовлюють його широке застосування. Втрати ваги можуть бути перераховані в об'ємне зношування, що дозволяє оцінити масштаб деградації матеріалу.

Водночас такий підхід має низку обмежень. Його точність істотно знижується при малих втратах ваги, а також у випадках нерівномірного зношування поверхні. Додаткові похибки можуть виникати внаслідок окиснення поверхні, поглинання вологи, перенесення матеріалу між контактуючими тілами або обмеженої точності вагового обладнання [26, 27]. Крім того, цей метод не дозволяє отримати інформацію про локальні зміни

поверхні та механізми зношування. Особливо це актуально для покриттів, де вимірювана втрата ваги включає як матеріал покриття, так і підкладки.

Загалом вимірювання втрати ваги або об'єму дає уявлення про загальний рівень зношування, однак не дозволяє ідентифікувати механізми руйнування. За однакових значень втрати матеріалу процеси зношування можуть суттєво відрізнятися за своєю природою, що вимагає застосування додаткових методів аналізу [17, 28]. Тому для повного розуміння механізмів зношування необхідними є металографічні дослідження поперечних перерізів зразків під час яких часто спостерігається формування деформованого шару, на межі якого з матрицею можуть зароджуватися втомні тріщини, що призводить до подальшого розшарування матеріалу. Додатково можуть проводитись вимірювання твердості поверхневих зон, де може спостерігатися як зміцнення, так і локальне розм'якшення матеріалу. Отримані результати співвідносяться з інтенсивністю зношування та характером пошкоджень, що дозволяє встановити взаємозв'язок між умовами навантаження і поведінкою матеріалу.

Такий комплекс методів аналізу створює передумови для підвищення інформативності ударно-абразивних випробувань і стає основою для впровадження сучасних цифрових підходів до дослідження зношування.

З цією метою широко застосовують методи дослідження морфології поверхні, зокрема оптичну та електронну мікроскопію, а також профілометричні вимірювання. Оптична стереомікроскопія дозволяє ідентифікувати характерні зони зношування, тоді як сканувальна електронна мікроскопія забезпечує детальний аналіз пошкодженої поверхні, включаючи виявлення вбудованих абразивних частинок, мікротріщин та локальних деформацій.

Початковий аналіз зношеної поверхні, окрім візуального огляду, який є суб'єктивним і не має кількісних показників, зазвичай здійснюється із застосуванням методів оцінки геометрії поверхні, зокрема оптичної профілометрії. При цьому часто досліджується окрема локальна ділянка зразка, що ускладнює подальшу ідентифікацію її положення відносно всієї деталі та обмежує репрезентативність результатів. Профілометричні методи, зокрема оптична профілометрія, дозволяють отримати кількісні характеристики мікрорельєфу поверхні, такі як шорсткість, глибина западин і висота напливів.

Водночас профілометричні методи мають низку обмежень. Вони забезпечують детальний аналіз лише локальних ділянок поверхні та не дозволяють оцінити зміну геометрії деталі в цілому. Побудова тривимірної топографії шляхом зшивання окремих сканів є трудомісткою, потребує значного часу та може супроводжуватися похибками позиціонування.

Використання тривимірних (3D) досліджень суттєво розширює можливості аналізу, оскільки дає змогу оцінювати морфологію зношеної поверхні та визначати параметри, недоступні при традиційних двовимірних підходах [29, 30]. Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє безпосередньо визначати об'єм втрати матеріалу на основі цифрової моделі поверхні, що підвищує точність оцінювання. Карта глибин дозволяє оцінювати геометричні та морфологічні характеристики пошкоджень (глибину, форму, орієнтацію подряпин, валиків, мікросколів, відлущувань і кратерів), а також параметри шорсткості поверхні. На основі цих даних визначаються характерні зони для подальших мікроструктурних досліджень, які, як правило, передбачають виготовлення поперечних шліфів. Це дає змогу виявити такі процеси, як утворення адіабатичних зсувних смуг, розшарування, розвиток тріщин, окиснення, локальна пластична деформація та зміни структурного стану підповерхневих шарів.

Важливим доповненням є застосування 3D-сканування, оскільки воно додатково дозволяє аналізувати морфологію зносу на макро- та мезорівні, забезпечуючи комплексну оцінку змін геометрії поверхні. Це особливо актуально для нерівномірного зношування, деформованих ділянок з напливами та оцінювання локальних пошкоджень, які потребують подальшого детального аналізу.

Існуючі методи вимірювання топографії поверхні умовно поділяються на контактні та безконтактні. Контактні методи (зокрема стилусні) характеризуються високою точністю та відтворюваністю, однак є трудомісткими, обмеженими за площею аналізу та можуть впливати на поверхню зразка [31-33]. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях перевага надається безконтактним оптичним методам, таким як інтерференційна та конфокальна мікроскопія, які дозволяють отримувати детальну інформацію про мікрорельєф поверхні. Застосування таких методів забезпечує можливість

порівняння реальної поверхні з еталонною (наприклад, CAD-моделлю) та візуалізації розподілу зносу у вигляді карт відхилень, що дає змогу ідентифікувати зони різної інтенсивності зношування [34].

Результати вимірювань можуть залежати від типу обладнання, умов сканування та застосованих алгоритмів фільтрації даних. Важливо зазначити, що вибір параметрів вимірювання та обробки даних істотно впливає на результати аналізу.

Тому використання лише 3D-сканування як єдиного методу оцінки зношування є недостатнім. Це пов'язано з обмеженою роздільною здатністю більшості сканерів (чутливість методу 0,1 – 0,01 мм), що не дозволяє виявляти дрібні особливості поверхні.

Отже, найбільш обґрунтованим підходом є комбіноване використання методів різного масштабного рівня.

Оптичні методи 3D-сканування набувають поширення і при оцінюванні зношування деталей складної геометричної форми, виготовлених із високоміцних матеріалів і підданих поверхневому зміцненню [35].

Сучасні дослідження демонструють тенденцію до інтеграції 3D-сканування з класичними трибологічними випробуваннями. Зокрема, поєднання даних, отриманих за допомогою трибометрів, із тривимірною топографією поверхні забезпечує проведення мультимасштабного та багатофізичного аналізу процесів зношування.

Оскільки різні процеси (пластична деформація, мікрорізання, втомне руйнування) проявляються на різних масштабних рівнях, їх роздільний аналіз забезпечує більш повне розуміння деградації матеріалу. На рисунку 3 наведено результати визначення зміни геометрії випробувального зразка відносно його початкового стану після проведення випробувань на ударно-абразивне зношування (рис.3, а) та еволюцію мікроструктури (рис.3, б) та мікротвердості після випробування (рис.3, в).

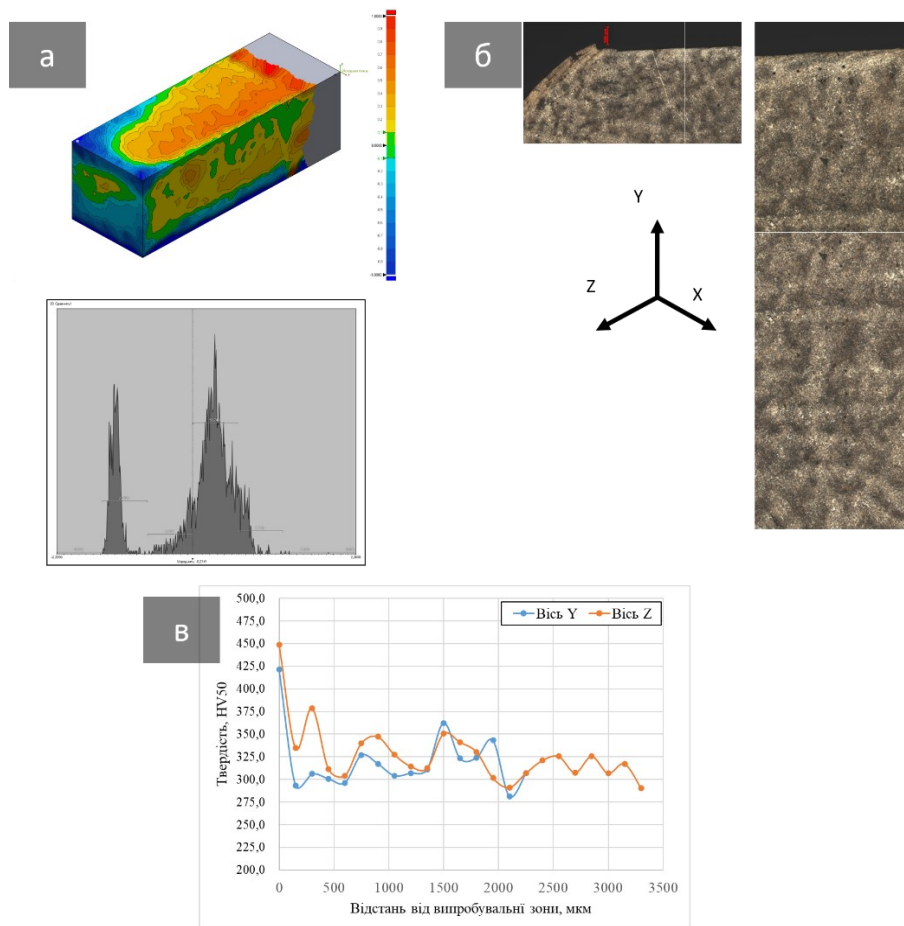


Рисунок 3 – Відхилення від початкових розмірів дослідних зразків по геометрії:
а – після випробування на ударно-абразивне зношування,
б – еволюція мікроструктури, в – зміна мікротвердості за перерізом

Таким чином, застосування 3D-сканування дозволяє виявити канавки, напливи та інші морфологічні особливості, що формуються внаслідок пластичної деформації; провести оцінювання нерівномірності навантаження та асиметрію зношування; визначити локальні зони інтенсивного зношування та проводити аналіз розподілу навантажень між різними ділянками зразка. Також проведення 3D-сканування дозволяє отримати детальні карти відхилень, що відображають зміну геометрії відносно поверхні перед випробуваннями, забезпечує цифрове документування об'єктів, створення точних моделей для мультимасштабного та багатофізичного аналізу, а також виконувати оцінку змін форми та розмірів деталей протягом терміну експлуатації.

Висновки

1. Використання оптичного 3D-сканування є ефективним та інформативним методом для дослідження ударно-абразивного зношування, оскільки дозволяє відтворювати реальний об'єм та топографію випробуваних деталей, виявляючи макро- і мезомасштабні зміни поверхні.

2. Побудова 3D-еталонної моделі незношеного зразка та її порівняння з оцифрованою моделлю зношеного матеріалу дозволяє кількісно оцінити швидкість зносу та розподіл навантажень по поверхні, а також побудувати карти відхилень для наочної візуалізації процесів деформації.

3. Процедури підготовки даних, включно з калібруванням сканера, оптимізацією хмари точок або сітки, та врахуванням факторів зовнішнього середовища (температура, освітлення, бруд) є критично важливими для підвищення точності вимірювань і мінімізації систематичних похибок.

4. Запропонована цифрова методика оцінки зносу є простою, швидкою та в багатьох випадках точнішою порівняно з традиційними методами профілометрії та оптичного сканування окремих ділянок, що дозволяє отримати комплексну оцінку ударно-абразивного руйнування деталей.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Saha G. Abrasive wear of alloys for ground engaging tools. 2017.
2. Zolotarevskiy V., Corujeira Gallo S., Pereira M., Barnett M. Modelling of impeller-tumbler wear test with discrete element method. *Wear*. 2022. Vol. 510–511. 204509. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204509.
3. Chintia A.R. Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. *Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. № 10. P. 1133–1148. DOI: 10.1080/02670836.2019.1615669.
4. Ratia-Hanby V., Rojacz H., Terva J., Valtonen K., Badisch E., Kuokkala V.-T. Effect of multiple impacts on the deformation of wear-resistant steels. *Tribology Letters*. 2015. Vol. 57. 15. DOI: 10.1007/s11249-014-0460-7.
5. Ratia V., Valtonen K., Kuokkala V.-T. Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2013. Vol. 227. № 8. P. 868–877. DOI: 10.1177/1350650113487831.
6. Wensink H., Elwenspoek M. A closer look at the ductile–brittle transition in solid particle erosion. *Wear*. 2002. Vol. 253. P. 1035–1043. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00223-5.
7. Sugimoto K.-i. Recent progress of low and medium-carbon advanced martensitic steels. *Metals*. 2021. Vol. 11. № 4. 652. DOI: 10.3390/met11040652.
8. Cai Y., Wei T., Jiang Y. et al. Tailoring martensite and ferrite via tempering to improve impact–abrasive wear resistance in lower alloy medium-carbon steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2026. DOI: 10.1007/s11665-026-13195-5.

9. Sundström A., Rendón J., Olsson M. Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. *Wear*. 2001. Vol. 250. P. 744–754. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00712-8.
10. Sahin Y., Ozdin K. The effect of abrasive particle size on the wear behaviour of metal matrix composites. 2004. P. 344–349. DOI: 10.1063/1.1766548.
11. Pondicherry K., Roy M. Comparative abrasive wear study of bearing steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2025. DOI: 10.1177/09544062251380051.
12. Veinthal R., Tarbe R., Kulu P., Käerdi H. Abrasive erosive wear of powder steels and cermets. *Wear*. 2009. Vol. 267. P. 1838–1844. DOI: 10.1016/j.wear.2009.02.021.
13. Narayanaswamy B., Ghaderi A., Hodgson P., Cizek P., Chao Q., Safi M., Beladi H. Abrasive wear resistance of ferrous microstructures with similar bulk hardness levels evaluated by a scratch-tester method. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019. Vol. 50. DOI: 10.1007/s11661-019-05354-2.
14. Cucinotta F., Scappaticci L., Sfravara F., Morelli F., Mariani F., Varani M., Mattetti M. On the morphology of the abrasive wear on ploughshares by means of 3D scanning. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 179. P. 117–125. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.006.
15. Di Puccio F., Di Pietro A., Mattei L. Pin-on-plate vs. pin-on-disk wear tests: theoretical and numerical observations on the initial transient phase. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 4. 134. DOI: 10.3390/lubricants12040134.
16. Elalem K., Li D. Variations in wear loss with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber-wheel abrasion condition: a modeling study. *Wear*. 2001. Vol. 250. P. 59–65. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00662-7.
17. Jun-tong X., Qing-de Z., Shi-hui L., Guang-Shun S. Influence of retained austenite on the wear resistance of high chromium cast iron under various impact loads. *Wear*. 1993. P. 83–88. DOI: 10.1016/0043-1648(93)90487-7.
18. Kovzel M., Babachenko O., Togobitska D. Iron-based chromium-manganese alloys with an increased range of tribological properties. In: Shalevska I. (ed.). *Modern trends in construction materials technologies*. Kharkiv : Technology Center PC, 2025. P. 4–41. DOI: 10.15587/978-617-8360-17-7.ch1.
19. Haiko O., Valtonen K., Kaijalainen A., Uusikallio S., Hannula J., Liimatainen T., Kömi J. Effect of tempering on the impact-abrasive and abrasive wear resistance of ultra-high strength steels. *Wear*. 2019. Vol. 440–441. 203098. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203098.
20. Haiko O., Miettunen I., Porter D., Ojala N., Ratia V., Heino V., Kemppainen A. Effect of finish rolling and quench stop temperatures on impact-abrasive wear resistance of 0.35 % carbon direct-quenched steel. *Tribologia – Finnish Journal of Tribology*. 2017. Vol. 35. № 1–2. P. 5–21.
21. Zhang Q., Zuo G., Lai Q., Tong J., Zhang Z. EDEM investigation and experimental evaluation of abrasive wear resistance performance of bionic micro-thorn and convex hull geometrically coupled structured surface. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 14. 6655. DOI: 10.3390/app11146655.
22. Ratia-Hanby V. Behavior of martensitic wear resistant steels in abrasion and impact wear testing conditions. 2015.
23. Ratia-Hanby V., Valtonen K., Kemppainen A., Kuokkala V.-T. The role of edge-concentrated wear in impact-abrasion testing. *Tribology Online*. 2016. Vol. 11. P. 410–416. DOI: 10.2474/trol.11.410.
24. Pawlus P., Reizer R. Profilometric measurements of wear scars: a review. *Wear*. 2023. Vol. 534–535. 205150. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205150.

25. Li Y., Schreiber P., Schneider J., Greiner C. Tribological mechanisms of slurry abrasive wear. Friction. 2022. Vol. 11. P. 1079–1093. DOI: 10.1007/s40544-022-0654-1.
26. Pillari L.K. Fabrication of graphene-based master alloys for the development of B319 aluminum alloy-graphene composites with enhanced tribological properties. 2024. DOI: 10.14288/1.0444064.
27. Yang M., Chen X., Wang Z., Pan P. Study on the effect of tempering on the impact abrasive wear performance of 45Si2MnCr2Mo ultra-high strength steel. Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2566. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2566/1/012010.
28. Lukšić H., Rodinger T., Rede V., Švagelj Z., Čorić D. Comparative analysis of microstructure and properties of wear-resistant structural steels. Materials. 2025. Vol. 18. № 17. 4002. DOI: 10.3390/ma18174002.
29. Grochała D., Bachtia-Radka E., Dudzińska S. Badania cech powierzchni z wykorzystaniem optycznych metod skaningowych – wymagania i pomiary zgodnie z wytycznymi serii PN-EN ISO 25178. Przegląd Spawalnictwa – Welding Technology Review. 2016. Vol. 88. DOI: 10.26628/ps.v88i10.693.
30. Rastegar V., Karimi A. Surface and subsurface deformation of wear-resistant steels exposed to impact wear. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23. DOI: 10.1007/s11665-013-0842-2.
31. Pawlus P., Reizer R., Żelasko W. Influence of the traverse speed of the stylus tip on changes in the areal texture parameters of machined surfaces. Materials. 2024. Vol. 17. № 20. 5052. DOI: 10.3390/ma17205052.
32. Podulka P., Kulisz M., Antosz K. Evaluation of high-frequency measurement errors from turned surface topography data using machine learning methods. Materials. 2024. Vol. 17. № 7. 1456. DOI: 10.3390/ma17071456.
33. Lee D.-H., Cho N.G. Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer. Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. DOI: 10.1088/0957-0233/23/10/105601.
34. Hawryluk M., Ziemba J., Zwierzchowski M., Janik M. Analysis of a forging die wear by 3D reverse scanning combined with SEM and hardness tests. Wear. 2021. Vol. 476. 203749. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203749.
35. Vorburger T.V., Rhee H.G., Renegar T.B. et al. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33. P. 110–118. DOI: 10.1007/s00170-007-0953-8.

Received 09.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.793.3:621.785.5:620.179

Tetiana Balakhanova, Ganna Kononenko, Rostyslav Podolskyi,
Maksim Kovzel, Zhanna Dementieva

METHODOLOGY FOR ANALYZING GEOMETRY CHANGES AFTER IMPACT-ABRASIVE WEAR TESTING

Abstract. *The current stage of development in materials science is characterised by a high level of research into the structure and mechanical properties of materials. Further*

progress in this field is linked not only to the development of fundamentally new testing methods, but also to the refinement of existing approaches through the integration of modern digital technologies for data recording and analysis. This allows not only for increased measurement accuracy and a greater number of intermediate values, but also for the determination of additional material behaviour characteristics that were previously inaccessible to direct measurement. The aim of this work is to enhance the informative value of the impact-abrasive wear testing method through its digitalisation, in order to obtain a comprehensive assessment of a material's resistance to dynamic impact. The paper presents an overview and examines aspects of improving the methodology for investigating impact-abrasive wear. Unlike classical approaches, which are limited to determining the mass loss of the specimen, the proposed methodology integrates 3D scanning to quantitatively assess changes in surface geometry following testing. The scientific novelty lies in the ability not only to record the integral wear index (mass loss), but also to directly measure the distribution and magnitude of plastic deformation accumulating in the metal under the dynamic impact of abrasive particles. The proposed approach allows a transition from a one-dimensional assessment of wear resistance to a two-dimensional one (mass loss + deformation relief). Based on the results of 3D scanning and subsequent processing of the obtained data, a graphical representation (depth map or profilogram) is generated, which quantitatively characterises the material's resistance to plastic deformation under impact-abrasive conditions. This opens up new possibilities for the comparative analysis of materials, the prediction of their behaviour under operational conditions, and the verification of mathematical models of wear processes.

Keywords: *impact-abrasive wear, gravimetry, surface topography, wear parameters, optical profilometry, 3D scanning*

Балаханова Тетяна Валеріївна – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, ORCID 0000-0003-2493-218X

Кононенко Ганна Андріївна – старший науковий співробітник, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, ORCID 0000-0001-7446-4105

Подольський Ростислав Вячеславович – Ph.D старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець ТОВ «Аддитивні лазерні технології України», Дніпро, старший

науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Київ, Україна, ORCID 0000-0002-0288-0641

Ковзель Максим Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, судовий експерт відділу фізико-хімічних, екологічних та гемологічних досліджень лабораторії досліджень матеріалів, речовин і виробів Дніпропетровського НДЕКЦ МВС України, ORCID 0000-0001-5720-1186

Дементьєва Жанна Андріївна – науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, ORCID 0009-0002-3194-9975

Balakhanova Tetiana Valeriivna – Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, Senior Scientist, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, ORCID 0000-0003-2493-218X

Kononenko Ganna Andriivna – Senior Researcher, Doctor of Engineering Sciences, Senior Scientist, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, ORCID 0000-0001-7446-4105

Podolskyi Rostyslav Viacheslavovych – Doctor of Philosophy (PhD), senior researcher, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Materials Engineer, LLC «Additive Laser Technologies of Ukraine», Dnipro; Senior Researcher, Institute of Applied Systems Analysis of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID 0000-0002-0288-0641

Kovzel Maksim – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Forensic Expert of the Department of Physico-Chemical, Environmental and Gemological Research of the Laboratory for Research on Materials, Substances and Products of the Dnipropetrovsk Research and Development Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, ORCID 0000-0001-5720-1186

Dementieva Zhanna Andriivna – researcher, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, ORCID 0009-0002-3194-9975

ІНТЕГРАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛУ КОМПЛАЄНС-УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМУ ДЕКАРБОНІЗОВАНОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У статті визначено основні напрями інтеграції складових комплаєнс-функціоналу в систему технологічного розвитку чорної металургії, узгоджену з сучасними концепціями декарбонізації, циркулярної економіки та ESG-орієнтованого управління. Розглянуто механізми та способи підвищення екологічної чистоти основних металургійних процесів шляхом використання вторинних ресурсів (шлами, шлаки, пил, дисперсні відходи вапняного виробництва), фізичної теплоти газів-продуктів виробництва та хімічної енергії CO–H₂-сумішей. Обґрунтовано концептуальні підходи до інтеграції інструментів комплаєнс-управління до системи управління енергоефективністю та ресурсоефективністю металургійного виробництва, що дає змогу підвищити прозорість матеріальних та енергетичних потоків та контролювати вуглеродомісткість основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі. Доведено що інтеграція інструментів комплаєнс-управління до процесів декарбонізації дозволяє контролювати вуглецевий слід, мінімізувати антропогенний вплив на навколишнє середовище та підвищувати економічну стабільність підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та екологічно безпечного виробництва.

Ключові слова: функціонал комплаєнс - управління, декарбонізація металургії, вуглецевий слід, CO₂-інтенсивність, циркулярна економіка, ресурсозбереження та енергоефективність, інтеграція комплаєнс-інструментів, ESG-орієнтоване управління.

Постановка проблеми, мета та завдання дослідження

Враховуючи високу енергоемність і значну частку металургійної галузі у глобальних викидах парникових газів, зниження вуглецевої інтенсивності виробництва стає одним із ключових чинників забезпечення конкурентоспроможності металургійної продукції на світовому ринку,

особливо в умовах запровадження механізмів регулювання вуглецевих викидів, зокрема CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism, Механізм вуглецевого коригування імпорту).

У цих умовах особливого значення набуває формування ефективних управлінських механізмів. Одним із таких механізмів, здатних забезпечити інтеграцію технологічних, екологічних та економічних аспектів розвитку металургійного виробництва, виступає комплаєнс-управління, яке доцільно розглядати як інтегровану систему управління декарбонізованим розвитком металургії, що забезпечує узгодження інноваційних технологічних рішень із сучасними екологічними стандартами, регуляторними вимогами та принципами сталого розвитку.

Метою роботи є обґрунтування концептуальних засад інтеграції функціоналу комплаєнс-управління у систему декарбонізованого розвитку металургійного виробництва та визначення його ролі у підвищенні енерго-ресурсної ефективності, екологічної безпеки і технологічної стійкості процесів виплавки чавуну та сталі.

Для досягнення поставленої мети використано наступні методи дослідження: системний аналіз сучасних тенденцій розвитку металургійних технологій; методи структурно-функціонального аналізу систем управління виробництвом; порівняльний аналіз показників енерго-ресурсної ефективності та вуглецевої інтенсивності металургійних процесів; узагальнення наукових і технологічних підходів до декарбонізації металургійного виробництва.

Завдання дослідження. У роботі вирішено наступні завдання:

- проаналізовано сучасні технологічні та екологічні виклики розвитку металургійних підприємств в умовах декарбонізації галузі;
- обґрунтовано концептуальну модель інтеграції комплаєнс-управління в системі сталого розвитку металургійного виробництва;
- визначено основні напрями використання комплаєнс-інструментів для підвищення енерго-ресурсної ефективності та зниження вуглецевої інтенсивності металургійних процесів;

- здійснена оцінка ролі комплаєнс-управління, як інтеграційного механізму узгодження технологічних, екологічних і економічних параметрів виробництва.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

Запропоновано розглядати механізм функціонально-інтегрованої системи комплаєнс-управління задля координації виробничих процесів, як системоутворюючий фактор забезпечення декарбонізованого розвитку виробництва, що поєднує технологічні, екологічні та управлінські інструменти забезпечення сталості металургійних процесів.

Обґрунтовано концептуальні підходи до інтеграції функцій комплаєнс-управління у систему менеджменту, що дозволить контролювати енерго-ресурсну ефективність металургійного виробництва, підвищити прозорість матеріально-енергетичних потоків та здійснювати моніторинг вуглецевої інтенсивності основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі.

Уточнено систему ключових показників оцінки ефективності декарбонізації металургійних процесів, які поєднують технологічні, енергетичні та кліматичні індикатори виробництва.

Розкрито роль комплаєнс-управління як інтеграційного механізму узгодження інноваційних технологічних рішень із сучасними екологічними та регуляторними вимогами, що забезпечує формування передумов сталого розвитку металургійних підприємств.

Показано, що інтеграція комплаєнс-управління у процеси декарбонізації дозволяє забезпечити контроль вуглецевого сліду, мінімізувати техногенне навантаження на довкілля та підвищити економічну стійкість підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та еколого-безпечного виробництва.

Викладення основного матеріалу та результатів дослідження

Сучасний етап розвитку чорної металургії характеризується посиленням глобальних екологічних, енергетичних та регуляторних викликів, пов'язаних із необхідністю скорочення викидів парникових газів, підвищення ресурсно-енергетичної ефективності виробництва та адаптації існуючих промислових технологій до сучасних принципів сталого розвитку. Враховуючи, що

металургійна галузь належить до найбільш енерго- та вуглецеємних секторів промисловості, її трансформація у напрямку декарбонізації розглядається як один із ключових факторів досягнення кліматичних цілей.

Основні тенденції розвитку металургійних технологій пов’язані з впровадженням комплексних рішень, спрямованих на зниження вуглецевої інтенсивності виробництва. До таких рішень належать використання альтернативних відновників, передусім водню, інтеграція технологій прямого відновлення заліза з подальшою електроплавкою сталі, розширення використання вторинних матеріальних ресурсів та енергетичних потоків поточного виробництва, а також оптимізація теплових і масообмінних процесів у традиційних металургійних агрегатах. Водночас реалізація зазначених технологічних напрямів потребує створення ефективних механізмів управління, здатних забезпечити узгодження інноваційних технологічних рішень із сучасними екологічними, економічними та регуляторними вимогами.

У цих умовах особливого значення набуває формування інтегрованих систем управління, що забезпечують контроль вуглецевої інтенсивності виробництва, прозорість матеріально-енергетичних потоків та відповідність діяльності підприємств міжнародним кліматичним і екологічним стандартам. Одним із таких інструментів виступає комплаєнс-управління, яке у сучасній промисловій практиці трансформується з інструменту нормативного контролю у комплексний механізм стратегічного управління сталим розвитком підприємства.

У контексті трансформації металургійного виробництва доцільно розглядати функціонал комплаєнс-управління не лише як систему забезпечення відповідності регуляторним вимогам, але, і як інституційно-технологічну платформу управління декарбонізованим розвитком металургії, що інтегрує технологічні, екологічні та управлінські інструменти забезпечення сталості виробничих систем. Такий підхід дозволяє поєднати процеси модернізації металургійних технологій, підвищення енерго-ресурсної ефективності виробництва, скорочення вуглецевого сліду продукції та формування прозорих механізмів контролю технологічних і екологічних параметрів виробництва.

Сучасний етап розвитку чорної металургії характеризується необхідністю скорочення питомих викидів CO₂, підвищення ресурсної ефективності та зменшення техногенного навантаження на довкілля. Відповідно до глобальних аналітичних оцінок, металургія залишається одним із найбільших промислових джерел парникових газів [1]. Сталеливарна галузь генерує значну частку глобальних промислових викидів CO₂, за сучасними оцінками [2], виробництво сталі формує понад 8% світових викидів парникових газів і близько 11 % CO₂.

Перехід до вуглецево-нейтральних технологій (H₂-DRI (Водневе пряме відновлення заліза), використання синтез-газу, гібридних BF (Доменна піч) – BOF (киснево-конвертерний процес) – EAF (Електродугова піч) схем вимагає формування системи управління виробництвом, здатної забезпечити контроль технологічних, екологічних та економічних параметрів. Такою системою виступає інтегрований функціонал комплаєнс-управління, який доцільно розглядати як інтеграційний механізм узгодження технологічних, екологічних та управлінських інструментів, спрямований на забезпечення сталого та економічно стійкого розвитку металургійного підприємства.

Концептуальна основа інтеграції комплаєнс-функціоналу в системі декарбонізованого розвитку чорної металургії повинна формуватися на основі поступової трансформації металургійного виробництва, яка передбачає системне поєднання технологічних, екологічних та управлінських інструментів забезпечення сталого розвитку галузі [3]. Автори стверджують, що декарбонізація металургії потребує фундаментальної трансформації всієї галузевої системи, що фактично підтверджує ідею системної інтеграції технологічних, екологічних та управлінських інструментів. У сучасних дослідженнях декарбонізації сталеливарної промисловості також наголошується, що досягнення кліматичних цілей потребує поєднання технологічних інновацій, енергоефективності, фінансових та управлінських механізмів [4]. У роботах з декарбонізації промисловості [5], також зазначається, що реалізація переходу до кліматично нейтрального виробництва потребує інтегрованих моделей, які поєднують технологічну модернізацію, фінансові інструменти та системи моніторингу викидів.

Сучасна модель розвитку металургійного виробництва, ґрунтується на поєднанні взаємопов’язаних напрямів розвитку, до яких належать:

- декарбонізація технологічних процесів, спрямована на зниження вуглецевої інтенсивності виробництва шляхом впровадження енергоефективних технологій, використання альтернативних видів палива та відновників, оптимізації теплових і масообмінних процесів;

- реалізація принципів циркулярної економіки, що передбачає максимальне залучення вторинних матеріальних ресурсів (шлаків, шламів, пилу, метало- кальцієвмісних відходів) у повторний виробничий цикл з формуванням замкнутих матеріальних потоків;

- підвищення ресурсної та енергетичної ефективності виробництва, яке досягається шляхом оптимізації питомих витрат енергоресурсів, розширення використання вторинних енергетичних ресурсів та підвищення коефіцієнта використання корисних складових теплової енергії: хімічної та фізичної;

- запровадження ESG-орієнтованих підходів до управління, де ESG (три ключові критерії для оцінки стійкості та етичності бізнесу: Екологія (Environmental), Соціальна відповідальність (Social) та Управління (Governance)), що забезпечують узгодження виробничої діяльності з екологічними, соціальними та управлінськими вимогами сталого розвитку [6,7];

- використання цифрових систем моніторингу та управління технологічними процесами, які забезпечують оперативний контроль ключових параметрів виробництва, підвищення прозорості матеріально-енергетичних потоків [8] та об’єктивізацію прийняття управлінських рішень [9].

У такій системі комплаєнс-функціонал виступає інтеграційним інструментом, механізм якого забезпечує узгодженість технологічних інновацій, екологічних нормативів і економічних інтересів підприємства. Впровадження комплаєнс-управління формує інституційну основу для реалізації стратегії вуглеце-нейтрального та ресурсо-енергоефективного розвитку металургійного виробництва. Інтеграційно-регуляторний механізм забезпечення сталості виробництва підкреслює, що в умовах металургійного виробництва комплаєнс поєднує технологічні, екологічні та управлінські інструменти; координує різноманітні за змістом та об’єднанні ціллю функції

підприємства, реалізація яких спрямована на досягнення єдиної стратегічної мети.

Для забезпечення раціональних умов інтегрування функцій комплаєнс-управління в структуру металургійного виробництва в дослідженні використано положення гармонізованої методології (ГМ), модифіковані та адаптовані до умов сучасного виробництва та вимог діючих законів.

Інтеграція функціоналу комплаєнс-управління на основних етапах виробництва сталі забезпечить рецикл потоків вторинної теплоти та сировини, і, згідно з основними положеннями ГМ, повинна спиратися на принципи організації виробництва, які наведені нижче.

1. Системна цілісність виробництва. Металургійне підприємство розглядається, як інтегрована системи «сировина – енергія – технологія – відходи – довкілля», що дозволяє:

- розрахувати та узгодити матеріальні та теплові баланси основних етапів сучасних технологічних схем виробництва металів;
- мінімізувати внутрішні втрати ресурсів сировини та енергії, яка витрачається для забезпечення стійкого розвитку виробництва;
- забезпечити трасованість (traceability, у перекладі з англ. «відстежуваність») потоків сировини і теплоти вторинного походження, тобто забезпечити можливості кількісно та якісно простежувати походження, рух, перетворення і кінцеве використання матеріального або теплового потоку в межах виробничої системи (життєвого циклу певних видів складових ресурсів), що є базою для ресурсного та екологічного комплаєнсу.

2. Замкненість матеріальних і теплових потоків, яка передбачає:

- рецикл шлаків, пилу, шламів, метало- кальціє- вуглецевовмісних відходів, які утворюються в результаті здійснення відповідних металургійних процесів, а за характерними ознаками є техногенними за походженням;
- утилізацію фізичної теплоти шлаку, агломерату та технологічних газів у процесах BF – BOF – EAF, що є продуктами реалізації основних етапів виробництва сталі в рамках наскрізної технологічної [10,11] схеми. При цьому, доцільно максимально реалізувати теплову та паливну складові джерел вторинної енергії;
- повторне використання вторинної енергії газів BF–BOF – EAF. Джерелом енергії при цьому стає хімічна енергія газів (CO, H₂ та

частково, CH_4). Енергія реалізується через перетворення в теплову (спалювання), далі – у пару або електроенергію [13]. Таким чином, реалізується екзотермічне хімічне перетворення енергії вторинного походження.

3. Технологічна трасованість. Формальне визначення, яке використовується у загальному контексті управління потоками (логістика, виробництво) і добре кореспондується з науковою і технічною термінологією, трактується, згідно з [12], як: «здатність ідентифікувати, відстежувати і прослідковувати шлях, походження, стан і трансформації об'єкта чи матеріалу протягом усіх етапів його життєвого циклу або руху в системі потоків».

4. Термодинамічна узгодженість процесів. Згідно з ним, як з одним з основних положень ГМ, інтеграція комплаєнс-функціоналу повинна базуватись на:

- реальних фізико-хімічних закономірностях та особливостях технологій виплавки, позапічної обробки, розливання, хіміко-термічної та обробки металу тиском;

- оптимізації окислювально-відновлювального режиму, параметрів дуття та шлакоутворення; способів позапічної обробки чавуну та сталевих напівпродукту;

- мінімізації втрат фізичної теплоти чавуном, сталлю і хімічної енергії при реалізації процесів з участю металевої, шлакової та газової фаз, яке відбувається під впливом факторів зовнішньої дії. В результаті це дозволить знизити перевитрати палива, електроенергії; зменшити утворення надлишкового FeO в шлаках, що підвищить вихід придатного та сприятиме зниженню техногенного навантаження на довкілля.

5. Мінімізація техногенного навантаження передбачає системне зниження інтенсивності утворення виробничих відходів і скорочення пилогазових викидів, що зумовлено невідповідністю фактичного рівня розвитку науково-технологічних рішень та технічного оснащення металургійного виробництва сучасним екологічним нормативам і регуляторним вимогам. Реалізація зазначеного принципу організації, також, орієнтована на зменшення питомого показника викидів CO_2 на одиницю продукції ($\text{кг CO}_2/\text{т сталі}$), що виступає базовим індикатором екологічної та кліматичної складових комплаєнс-функціоналу підприємства.

6. Інтеграція комплаєнсу в технологічні регламенти визначає комплаєнс не як зовнішній контроль, а як: елемент технологічного алгоритму; критерій прийняття операційних рішень; інструмент оптимізації режимів плавки, які дозволяють переводити комплаєнс з декларативної функції у виробничу.

7. Енерго-ресурсна ефективність як критерій сталості металургійного виробництва полягає у досягненні мінімально можливих питомих витрат енергетичних та матеріальних ресурсів за умови збереження стабільності технологічних режимів, нормативної якості продукції та екологічної безпеки процесів.

У сучасних умовах енерго-ресурсна ефективність розглядається не лише як економічна категорія, а, як інтегрований показник технологічної досконалості, екологічної відповідності та інституційної зрілості підприємства.

Згідно з [13], трасованість, як елемент управління матеріальними потоками (material flow management), визначається процесом відстеження та аналізу руху матеріалів і енергії в межах системи, що включає поняття джерел, потоків, накопичення та їх перетворень. Інше, близьке за суттю трактування наведено в [14], яке визначено як «система кількісного і якісного обліку, контролю та відстежуваності, утворення, переміщення, переробки та повторного їх використання». Це є фундаментальною концепцією, що лежить в основі системної трасованості потоків, основні положення якої доцільно використати для інтеграції комплаєнс-функціоналу в структуру управління металургійним підприємством.

Включення до системи трасованості потоків вторинної сировини та енергії, які мають техногенне походження, не визначається з аналізу результатів досліджень [13, 14], а є наслідком узагальнення трьох концепцій, заснованих на контролі та аналізі матеріальних потоків та промислової екології.

На основі ISO-підходу (ISO – Міжнародна організація зі стандартизації), «трасованість» узагальнена для промислового виробництва, що робить її коректною для інтерпретації, також і металургійного виробництва, як здатність ідентифікувати, кількісно обліковувати та простежувати походження, рух, перетворення і кінцеве використання матеріальних та енергетичних потоків у межах визначеної системи [15]. У металургійному контексті,

використовуючи ISO-підхід, об'єктом трасованості доцільно визначити матеріальні та енергетичні потоки; технологічні перетворення; переміщення потоків між етапами наскрізної технології виробництва сталі.

До основних напрямів інтеграції комплаєнс-функціоналу доцільно віднести наступні:

- декарбонізацію технологічних процесів;
- комплексне використання вторинних ресурсів – відходів техногенного походження;
- комплаєнс енергетичної інтеграції, технологічної чистоти щодо впливу сучасних способів виробництва металів на екологію та інноваційний розвиток в умовах сучасного виробництва та при його декарбонізації.

Системно проаналізуємо вищезазначені напрями інтеграції функціоналу комплаєнс-управління в загальну систему забезпечення металургійного виробництва.

Декарбонізація технологічних процесів є ключовою передумовою подальшої трансформації чорної металургії у напрямку формування енергоефективного, ресурсно-замкненого та екологічно безпечного виробництва, що забезпечить зниження вуглецевої інтенсивності металопродукції, підвищення конкурентоспроможності підприємств та їх відповідність сучасним кліматичним і регуляторним вимогам.

До важливих напрямів декарбонізації технологічних процесів, від реалізації яких залежить ефективність розвитку вуглецево-нейтрального виробництва, відносяться:

- часткова або максимально можлива заміна коксу, природного газу (ПГ) та ПВП (пиловугільного палива) на водень (H_2) з розробкою технологій на основі використання корисних властивостей його фізико-хімічного потенціалу – паливної та хімічної енергії;
- використання в металургійному виробництві процесів підготовки залізорудних матеріалів; застосування у виробництві сталі продуктів підготовки та сумішей $CO-H_2$ (синтез-газ), що суттєво зменшує «вуглецевий слід»;

- оптимізація зон теплового резерву, яка визначається зниженням температури TRZ (thermal reserve zone), покращенням ефективності реакції відновлення, що дозволяє працювати з низькою швидкістю відновника [16];
- інтенсифікація прямого відновлення оксидів заліза, збалансована з вкладом реакцій відновлення газами (CO , H_2) ;
- поступовий перехід до гібридних схем виробництва сталі BF–DRI–EAF (Доменна піч – Пряме відновлення заліза – Електродугова піч);
- зниження в енергетичних балансах металургійних процесів частки теплоти, що витрачається для здійснення ендотермічних реакцій, наприклад газифікації вуглецю ($\Delta H \approx +172$ кДж/моль при 1000°C) в умовах доменної печі, де вона отримує розвиток в TRZ – зоні і вище неї («solution loss» реакції) [17];
- контроль вуглецевого сліду по основним етапам металургійного переділу;
- аудит відповідності СВМ визначає механізм коригування вуглецю на кордоні ЄС для товарів із високою вуглецевою інтенсивністю (зокрема сталі) для узгодження імпорту з правилами EU ETS (European Union Emission Trading Scheme - схема торгівлі викидами Європейського Союзу) [18].
- технологічна верифікація ефективності водневих технологій $\text{DRI} \rightarrow \text{EAF}$ та CPI (Вдування вуглецевмісних матеріалів)) $\rightarrow \text{BF}$; при дослідженні технологічної схеми $\text{H}_2 \rightarrow \text{DRI} \rightarrow \text{EAF}$ [19] показано, що використання водню, як відновника, може знизити викиди CO_2 приблизно на 90 % порівняно з традиційним доменним процесом;
- управління ризиками нестабільності технологічних параметрів металургійних процесів полягає у системному моніторингу та регулюванні ключових параметрів плавки: хімічного складу чавуну, параметрів дуття, газової атмосфери та складу шлакової фази, від яких залежить тепловий та окислювально-відновлювальний баланс плавки.

Основною функцією комплаєнс-управління є встановлення та контроль допустимих вуглецевих індикаторів, в якості яких доцільно використати показник питомої емісії CO_2 по технологічних переділах (кг CO_2 /т агломерату/кг CO_2 /т чавуну (BF)/ кг CO_2 /т сталі (BOF або EAF) [20].

За даними [21] показники питомої емісії CO_2 становлять при виробництві: агломерату ≈ 319 кг CO_2 /т; чавуну (BF) ≈ 1500 кг CO_2 /т. Це визначає необхідність окремого розрахунку викидів для агломерації, доменного процесу,

конвертерного та електросталеплавильного. Результати дослідження доцільності використання показників інтенсивності викидів на тону сталі, приведені в [20], підтверджують зв'язок між споживанням коксу / енергії та інтенсивністю викидів CO₂.

Відповідно до методології IPCC (Міжурядової групи експертів зі зміни клімату) [22], яка базується на принципі повного обліку потоків вуглецю, здійснюється з урахуванням процесів утворення, використання та втрат технологічних газів, зокрема при їх спалюванні та факельному згорянню, визначаються основні складові її функціонального призначення та способи раціональної утилізації доменних та конвертерних газів, як джерел вторинної теплової енергії – палива.

На основі комплексної енергетичної та технологічної оцінки водневої металургії [23] автори дослідження [24] провели моделювання технологічних параметрів H₂-DRI-процесу, а його результати використали для верифікації ефективності водневого відновлення та масштабування H₂-DRI-процесу.

Таким чином, комплексне оцінювання стану металургійного виробництва по основним технологічним переділам дозволяє ідентифікувати найбільш вуглецемісткі стадії виробництва, з визначенням показників інтенсивності вуглецю та ефективності використання вторинних енергоресурсів, зокрема коефіцієнт утилізації технологічних газів. При цьому, керування параметрами основних етапів наскрізної технології виробництва сталі дозволяє своєчасно виявляти та сприяти виправленню відхилень технологічного режиму від регламенту, запобігати порушенню стійкості процесу та стабільності його кінцевих результатів. Управління ризиками технологічної нестабільності доцільно спрямовувати на підтримання оптимального співвідношення між хімічним складом металу, параметрами дуття та шлаковим режимом. Це, в свою чергу, сприятиме забезпеченню стабільності плавки, мінімізації енерговитрат, дозволить прогнозувати якість металу, запроваджувати ефективний комплаєнс-функціонал управління ризиками нестабільності вихідних характеристик чавуну, дуття, шлакової фази та інших параметрів основних етапів відповідних технологій. Оцінку результатів здійснення заходів інтегрування комплаєнс-функціоналу до умов металургійного виробництва

раціонально визначати за показником зниження питомих викидів CO₂ без втрати стабільності процесу та металургійної цінності металопродукції.

Контроль вуглецевого сліду на основних етапах металургійного переділу доцільно здійснювати шляхом процесно-орієнтованого обліку викидів CO₂ [18], при якому емісії визначаються окремо для кожної технологічної стадії виробництва. Такий методологічний підхід дозволяє ідентифікувати основні джерела CO₂ і оптимізувати технологічні режими відповідних процесів.

Розглянемо другий напрям інтеграції комплаєнс-функціоналу – комплаєнс використання вторинних ресурсів – відходів техногенного походження. Ресурсна база, як джерело вторинних ресурсів сировини визначається рівнем розвитку виробництва, що поєднує науку, технологію, обладнання та культуру виробництва. Створюється вона зі шлаків та шламів поточного виробництва на основних етапах металургійного переділу; пилу газоочисток; дисперсних відходів виробництва вапна; металовмісних відходів прокатного виробництва. техногенного походження.

Комплаєнс-завданнями є наступні: контроль токсикологічного складу; запобігання накопиченню Zn, Pb, Cu; управління замкнутими матеріальними потоками; верифікація коефіцієнта циркулярності та ін. Результатами реалізації цих завдань є зменшення техногенного навантаження та скорочення потреби виробництва у первинній сировині.

Третій напрям інтеграції комплаєнс-функціоналу – енергетична інтеграція включає управління (прогнозуванням, поточним контролем, корегуванням та аналізом результатів) використанням фізичної теплоти об'єктів металургійного походження на всіх етапах наскрізної технології виробництва чавуну, сталі та спеціальних сплавів, утилізація/рекуперація фізичної теплової енергії процесів і агрегатів. Окремо, хімічна енергія спрямовується на використання: CO, як відновника; H₂, як відновника і теплоносія; повторне спалювання доменного газу; перетворення CO у синтез-газ. Функціонально комплаєнс-управління зводиться до: аудиту енергоефективності; контролю коефіцієнта використання вторинних газів; мінімізації фугитивних викидів; верифікації ККД (коефіцієнту корисної дії) утилізаційних систем та управління ризиками вибухонебезпечності H₂, з

метою зниження питомої енергоємності та зменшення забруднення навколишнього середовища.

Комплаєнс екологічної інтеграції, який визначається досягнутим рівнем технологічної чистоти виробництва, контролює його вплив на екологію, а його функціональні можливості доцільно спрямовати на: зниження в металі S, P, N, H; контроль вмісту активного кисню в ньому; стабілізацію шлакового режиму; зменшення кількості шлаку без зниження рівню його реакційної та мінімізацію неметалевих включень. Ефективними інструментами контролю, за впливом на стан процесу, являються: цифровий контроль потенціалу окислення фаз; контроль газо-гідродинамічної стабільності металеві ванни, шляхом оптимізації параметру, який визначається як: L_{pz}/h_v), змінюючись за ходом продувки металеві ванни в інтервалі (0,3÷0,75) [25]; оптимізація хімічного складу та властивостей шлаку, який визначає спектр його призначення. Окрім того, важливими складовими комплаєнс-функціоналу є способи моніторингу та контролю дотримання технологічних регламентів; управління відхиленнями; мінімізації техногенних аварій, застосування яких сприяє стабілізації якості металу та зниженню аварійних викидів шкідливих з'єднань техногенного походження.

Інноваційна спрямованість комплаєнс-управління дозволяє досягти цілей декарбонізації металургійного виробництва таких, як: ризик-орієнтоване впровадження нових технологій; правовий захист (патентування) інновацій [26]; екологічна експертиза; економічна оцінка основних етапів життєвого циклу процесів, що забезпечить зниження інноваційних ризиків; прискорення сертифікації; відповідність міжнародним стандартам; інтеграцію на ринки ЄС; інвестиційну привабливість.

Удосконалення існуючих технологій визначається не лише «радикальними» переходами типу (H_2 -DRI), але й модернізацією доменного процесу; стабілізацією хімічного та фракційного складу шихтових матеріалів (агломерату, інших залізрудних компонентів) [27]; удосконаленням режиму продувки металеві ванни кисневого конвертера та дугової сталеплавильної пічі; управлінням тепловим балансом сталеплавильних агрегатів, що є критично важливим для реалізації поступової декарбонізації; зниженням капітальних

витрат; мінімізацією виробничих ризиків при збереженні економічної стійкості підприємств.

Концептуально, формулу інтегрованої моделі залучення основних складових комплаєнс-управління в процес декарбонізації металургійного виробництва, можна визначити як систему взаємопов'язаних нормативно-регуляторних, технологічно-екологічних, цифрово-аналітичних, корпоративно-управлінських, фінансово-інвестиційних та ланцюгово-ринкових механізмів. Системно інтегрована модель забезпечує узгодження виробничих рішень із вимогами кліматичної політики, вуглецевого обліку, ресурсної ефективності та ринкової прийнятності низьковуглецевої сталі. Така постановка відповідає тому, як міжнародні інституції описують декарбонізацію сталеплавильного виробництва: як поєднання технологій, політик, інфраструктури, даних та інструментів управління.

Узагальнена таблиця інтегрованої моделі комплаєнс-управління процесом декарбонізації металургійного виробництва у форматі «блок моделі → функція → інструменти → результат» приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Інтегрована блочна модель комплаєнс-управління декарбонізацією металургійного виробництва

Блок моделі	Функція	Основні інструменти	Очікуваний результат
Нормативно-регуляторний комплаєнс	Забезпечення відповідності діяльності екологічним, кліматичним та промисловим вимогам	Моніторинг існуючого законодавства; системи MRV *[28]; виконання вимог СВАН, ESG-звітності; внутрішні регламенти комплаєнсу.	Мінімізація регуляторних ризиків; відповідність міжнародним вимогам кліматичної політики
Технологічно-екологічний комплаєнс	Узгодження технологічних процесів із цілями декарбонізації та оновлення клімату	Аудит вуглецевого профілю; оптимізація шихти за хімічним та фракційним складом її компонентів; рецикл вторинних ресурсів; впровадження енерго - ефективних технологій	Зниження вуглецевої інтенсивності виробництва; підвищення його ресурсної ефективності

Продовження таблиці 1

Цифровий та MRV-комплаєнс	Забезпечення вимірювання, обліку, контролю викидів CO ₂	Системи збору даних; цифрові паспорти плавок; автоматизований контроль параметрів процесу	Достовірність даних щодо викидів; прозорість кліматичної звітності
Корпоративно-управлінський комплаєнс	Інтеграція декарбонізації у систему стратегічного управління підприємством	ESG-політика ; кліматична стратегія; комплаєнс-комітети; системи внутрішнього контролю	Підвищення рівню керованості трансформації підприємства; узгодження стратегічних і рішень
Фінансово-інвестиційний комплаєнс	Забезпечення фінансової підтримки процесів декарбонізації	Оцінка вуглецевої-інтенсивності інвестицій; внутрішня ціна вуглецю; зелені інвестиції; ESG-фінансування	Економічна ефективність переходу до низько вуглецевих технологій
Комплаєнс ланцюгів постачання (логістики)	Забезпечення прозорості джерел походження ресурсів сировини та енергії	Due diligence** [29]: класифікація брухту; контроль вуглецевого сліду продукції; стандарти сталих закупівель ресурсів	Підвищення екологічної та ринкової прийнятності продукції
Енергетичний комплаєнс	Оптимізація використання енергоресурсів	Енергетичні аудити; системи управління енерго -менеджментом ISO 50002-1:2025***; використання відновлюваної енергії; рекуперація теплоти	Зниження енергоємності основних етапів та металургійного виробництва загалом
Екологічний моніторинг та контроль	Оцінка впливу виробництва на довкілля	Системи моніторингу викидів CO ₂ ; екологічний аудит; оцінка життєвого циклу металопродукції	Зменшення навантаження виробництва на екологію
Інноваційно-технологічний розвиток	Підтримка впровадження нових технологій декарбонізації	Водневі технології; електрометалургія; цифровізація виробництва	Підвищення технологічної конкурентної спроможності металургійного підприємства

Продовження таблиці 1

Комплаєнс-компетенцій профільної освіти	Формування комплаєнс-компетентностей фахівців у сфері декарбонізації металургійного виробництва	Освітньо-професійні програми, міждисциплінарні курси (ESG, СВAM, екологічне право, вуглецевий менеджмент), цифрові моделі оцінки викидів	Підготовка фахівців, здатних забезпечувати нормативну відповідність, управління вуглецевими ризиками та впровадження низьковуглецевих технологій у металургійному виробництві
Комплаєнс інвестиційного забезпечення	Забезпечення відповідності інвестиційних рішень вимогам декарбонізації та сталого розвитку металургійного виробництва	ESG-критерії відбору інвестицій, СВAM-орієнтований інвестиційний аналіз, комплаєнс-аудит інвестиційних проектів, оцінка вуглецевих ризиків, механізми фінансування «зелених» програм	Спрямування інвестицій у низьковуглецеві технології, зниження регуляторних та вуглецевих ризиків, підвищення інвестиційної привабливості і конкурентоспроможності металургійного виробництва

**MRV Облік викидів парникових газів у сучасних металургійних системах здійснюється відповідно до принципів MRV (Monitoring, Reporting, Verification), що передбачають системний моніторинг, звітність і незалежну верифікацію даних про викиди, зокрема у рамках механізмів UNFCCC та регуляторних вимог ЄС.*

***Supplier due diligence - перевірка постачальників на відповідність правовим, етичним та ESG-вимогам для мінімізації ризиків у ланцюгах постачання].*

****ISO 50002-1:2025. нова редакція стандарту енергетичних аудитів визначає: принципи проведення енергоаудиту; процесні вимоги; структуру та результати аудиту.*

Очікувані результати від впровадження інтегрованої моделі функціоналу комплаєнс-управління в процес декарбонізації металургійного виробництва корелюють з аналізом умов успішної трансформації галузі. Узагальнений ефект моделі комплаєнс-управління декарбонізацією металургійного виробництва визначається інтеграцією наведених в табл. 1 блоків комплаєнс-управління, поєднання ефектів взаємодії яких, забезпечує:

- системно - поступове зниження вуглецевої інтенсивності виробництва;

- підвищення енерго- та ресурсоефективності металургійних процесів;
- відповідність міжнародним ESG-стандартам і кліматичним регуляціям;
- підвищення інвестиційної, експортної стійкості та інноваційної привабливості підприємств.

Висновки

В результаті проведеного дослідження проаналізовано сучасні технологічні та екологічні виклики розвитку металургійних підприємств в умовах декарбонізації галузі, а саме: зниження вуглецевої інтенсивності виробництва, залучення вторинних матеріальних ресурсів, підвищення ресурсної та енергетичної ефективності виробництва, запровадження ESG-орієнтованих підходів до управління, використання цифрових систем моніторингу та комплаєнс-управління технологічними процесами;

Обґрунтовано концептуальну модель інтеграції комплаєнс-управління в системі сталого розвитку металургійного виробництва. Доведено, що інтеграція комплаєнс-функціоналу в систему декарбонізованого розвитку чорної металургії повинна розглядатися не як регуляторний інструмент контролю, а як інженерно-управлінська платформа забезпечення технологічної чистоти, ресурсної замкненості, енергетичної ефективності суттєвого зниження шкідливого впливу сучасних металургійних процесів на довкілля.

Задля підвищення енерго-ресурсної ефективності та зниження вуглецевої інтенсивності металургійних процесів уточнено систему ключових показників оцінки ефективності декарбонізації металургійних процесів, які поєднують технологічні, енергетичні та кліматичні індикатори виробництва.

Визначено основні напрями використання комплаєнс-інструментів, які дозволять контролювати енерго-ресурсну ефективність металургійного виробництва, підвищити прозорість матеріально-енергетичних потоків та здійснювати моніторинг вуглецевої інтенсивності основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі.

Розкрито роль комплаєнс-управління, як інтеграційного механізму, розробки та реалізації інноваційних технологічних рішень із дотриманням сучасних екологічних та регуляторних вимог, що забезпечує формування передумов сталого розвитку металургійних підприємств.

Показано, що інтеграція комплаєнс-управління у процеси декарбонізації дозволяє забезпечити контроль вуглецевого сліду, мінімізувати техногенне навантаження на довкілля та підвищити економічну стійкість підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та еколого-безпечного виробництва.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов’язані з поглибленням теоретичних і методичних засад інтеграції функціоналу комплаєнс-управління у систему декарбонізованого розвитку металургійного виробництва: розроблення кількісних методів оцінювання ефективності комплаєнс-функціоналу на основі інтегрованих показників енерго-ресурсної ефективності, вуглецевої інтенсивності та рівня використання вторинних матеріальних і енергетичних ресурсів. При цьому, ключовою ідеєю стає перехід металургійного комплаєнсу від функції контролю до ролі інституційно-технологічної платформи управління декарбонізацією виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Energy Agency (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap – Towards more sustainable steelmaking. Paris: IEA, 2020. 187 p. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
2. Hasanbeigi A. Steel Climate Impact Benchmarking. Global Efficiency Intelligence, 2025., 39 p. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/s/Steel-benchmarking-10102025-E1.pdf>.
3. Hermwille L., S. Lechtenböhm, M. Åhman et al. A Climate Club to Decarbonize the Global Steel Industry. Wuppertal Institute. 2022. Nature Climate Change, 12, 494 - 496. p. DOI: 10.1038/s41558-022-01383-9. URL: https://dnb.info/1274820367/34?utm_source=chatgpt.com.
4. Goldar A., Md Sarwar Ali, M Kotal et al. Policy Landscape for Transition Towards Carbon Neutral Steel Sector, 2024, 33 p. URL: https://icrier.org/pdf/pb-33-Green-Steel.pdf?utm_source=chatgpt.com.
5. Кірейцева Г., Виговська О., Хоменко С. Інтегрована модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізничної промисловості України. Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування», Вип. 2 (8), 2025. С. 10-19. DOI: [https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4\(2\).pdf](https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4(2).pdf).
6. OECD, Global Corporate Sustainability Report. 2025. 94 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/10/global-corporate-sustainability-report-2025_57b105f2/bc25ce1e-en.pdf.
7. Методичні рекомендації з оцінки викидів парникових газів та здійснення моніторингу, звітності і верифікації. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023. 67с. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671_Metodychni.pdf.

8. Воротніков В.В., Матвеев К.І., Россінський Ю.М. Система керування технологічними процесами з використанням концепції IoT і технологій штучного інтелекту. Технічна інженерія. № 2 (94), 2024. С. 90-103. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-90-103](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-90-103).
9. Цифрова трансформація промислового менеджменту: теорія і практика: монографія / за ред. д. філософ. н., проф. В. Г. Воронкової, д. е. н., проф. Н. Г. Метеленко. Львів: Торунь Liha-Pres, 2023. 816с. URL: <file:///C:/Users/anato/Downloads/0062154.pdf>.
10. Мішалкін А.П., Сокур Ю.І., Камкіна Л.В, Мішалкін В.А. Використання вторинних енергоресурсів при відновлювально-тепловій обробці ряду техногенних відходів. Системні технології. №3 (68), 2014. С. 156-162.
11. Мішалкін А.П., Камкіна Л.В., Іващенко В.П. та ін. Аналіз можливостей створення автономної системи енергозабезпечення металургійного виробництва з використанням водневих технологій та фізичного тепла металургійного обладнання. Теорія і практика металургії. №4 (149), 2025. С. 50-57. URL: https://nmetau.edu.ua/file/zh_04_2025.pdf.
12. Traceability: Definition and how to implement it successfully. 2025. URL: https://www.mecalux.com/blog/traceability?utm_source=chatgpt.com.
13. Material Flow Management. Marian R. Chertow. Encyclopedia of Energy Reference Work 2004. URL: https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/material-flow-management?utm_source=chatgpt.com.
14. Guilherme Fortuna, P. Dinis Gaspar. Implementation of Industrial Traceability Systems: A Case Study of a Luxury Metal Pieces Manufacturing Company. Processes. 2022, 10(11), <https://doi.org/10.3390/pr10112444> URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2444>.
15. ISO 9000:2015 (en). Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. section 3. - Terms and definitions пункт paragraph 3.6.13. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>.
16. K. Higuchi, K. Kunitomo, S. Nomura. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace. SIJ International, Vol. 60 (2020), No. 11, pp. 2366–2375. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115>. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/11/60_ISIJINT-2020-115/_pdf?utm_source=chatgpt.com.
17. Naito M., Okamoto A., Yamaguchi K. et. el. Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Temperature Control of Thermal Reserve Zone. Nippon Steel Technical Report. No. 94 July 2006, p. 103-108. URL: https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf?utm_source=chatgpt.com.
18. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism. Official Journal of the European Union. OJ L 130, 16.05.2023, p. 52–104. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956&utm_source=chatgpt.com.
19. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Ironmaking: How It Works. Metals. 2020, 10(7), 922; <https://doi.org/10.3390/met10070922>. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922?utm_source=chatgpt.com.
20. Wenqing Xu, Wanjie Cao, Tingyu Zhu et el. Material Flow Analysis of CO2 Emissions from Blast Furnace and Basic Oxygen Furnace Steelmaking Systems in China. Steel Research International. September 201586(9). DOI:10.1002/srin.201400228.
21. Strizhenok I A., Bykova M., Korotaeva A. Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of Central and Northern Eurasia. Journal of Ecological Engineering. 2024, 25(5), 43-69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>.
22. IPCC – 2026. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: https://www.ipcc.ch/about/engage_with_the_ipcc/.

23. Andrew J. Pimm, Tim T. Cockerill, William F. Gale. Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 312, 20 August 2021, 127665. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621018837>.
24. Shahabuddin M., Alireza Rahbari, Akbar Rhamdhani M. Process modelling for the production of hydrogen-based direct reduced iron in shaft furnaces using different ore grades. *Ironmaking & Steelmaking*. 2025. Vol. 52(1) 3-16 p. <https://doi.org/10.1177/03019233241254666>.
25. Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., Камкін В.Ю., Мянoвська Я.В., Дворковий О. І., Ісаєва Л.Є. Моделювання впливу режиму продування ванни на масообмінні процеси та шлакоутворення у кисневому конвертері. *Теорія і практика металургії*. №1, 2022. С. 27-37.
26. Мішалкін А.П., Камкіна Л.В., Іващенко В.П., Петренко В.А., Мянoвська Я.В., Івченко О.В. Місце винахідництва як складової інтелектуально-фахового потенціалу науковців у вдосконаленні промислових технологій. *Теорія і практика металургії*. №3, 2025. С. 75-87. ISSN 1028-2335 (print). URL: https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2025_v.pdf.
27. Мішалкін А.П., Маловік Д.В., Чистяков В.Г., Петренко В.О. Аналіз впливу стабілізації вихідних властивостей агломерату на фізико-хімічні процеси в характерних зонах доменної печі. *Met. lit'e Ukr.*, vol. 33 № 3-4 (342-343), 2025. С. 28-42.
28. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>.
29. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct. Paris: OECD Publishing, 2018., 95 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct_c669bd57/15f5f4b3-en.pdf.
30. ISO 50002-1:2025. Energy audits. Part 1: General requirements with guidance for use. Edition 1, 2025. URL: https://www.iso.org/standard/83645.html?utm_source=chatgpt.com.

REFERENCES

1. International Energy Agency (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap – Towards more sustainable steelmaking. Paris: IEA, 2020. 187 p. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
2. Hasanbeigi A. Steel Climate Impact Benchmarking. *Global Efficiency Intelligence*, 2025., 39 p. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/s/Steel-benchmarking-10102025-E1.pdf>.
3. Hermwille L., S. Lechtenböhm, M. Åhman et al. A Climate Club to Decarbonize the Global Steel Industry. Wuppertal Institute. 2022. *Nature Climate Change*, 12, 494 - 496. p. DOI: 10.1038/s41558-022-01383-9. URL: https://d-nb.info/1274820367/34?utm_source=chatgpt.com.
4. Goldar A., Md Sarwar Ali, M Kotal et al. Policy Landscape for Transition Towards Carbon-Neutral Steel Sector, 2024, 33 p. URL: https://icrier.org/pdf/pb-33-Green-Steel.pdf?utm_source=chatgpt.com.
5. Kireitseva H., Vyhovska O., Khomenko S. Intehrovana model zaluchennia zelenykh investytstii dlia dekarbonizatsii zalizorudnoi promyslovosti Ukrainy. *Naukovyi visnyk Vinnytskoi akademii bezperervnoi osvity. Seriya «Ekolohiia. Publichne upravlinnia ta administruvannia»*, Vyp. 2 (8), 2025. С. 10-19. DOI: [https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4\(2\).pdf](https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4(2).pdf).
6. OECD, Global Corporate Sustainability Report. 2025. 94 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/10/global-corporate-sustainability-report-2025_57b105f2/bc25ce1e-en.pdf.

7. Metodichni rekomendatsii z otsinky vykydiv parnykovykh haziv ta zdiisnennia monitorynhu, zvitnosti i veryfikatsii. Kyiv: Ministerstvo zakhystu dovykillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 2023. 67p. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671_Metodichni.pdf.
8. Vorotnikov V.V., Matvieiev K.I., Rossynskiy Yu.M. Systema keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy z vykorystanniam kontseptsii IoT i tekhnolohii shtuchnoho intelektu. Tekhnichna inzheneriia. № 2 (94), 2024. P. 90-103. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-90-103](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-90-103)
9. Tsyfrova transformatsiia promyslovoho menedzhmentu: teoriia i praktyka: monohrafiia / za red. d. filosof. n., prof. V. H. Voronkovi, d. e. n., prof. N. H. Metelenko. Lviv: Torun Liha-Pres, 2023. 816s. URL: <file:///C:/Users/anato/Downloads/0062154.pdf>
10. Mishalkin A.P., Sokur Yu.I., Kamkina L.V, Mishalkin V.A. Vykorystannia vtorynnykh enerhozabezpechennia pry vidnovliuvanno-teplovii obrobtsi riadu tekhnohennykh vidkhodiv. Systemni tekhnolohii. №3 (68), 2014. P. 156-162.
11. Mishalkin A.P., Kamkina L.V., Ivashchenko V.P. ta in. Analiz mozhlyvostei stvorennia avtonomnoi systemy enerhozabezpechennia metalurhiinoho vyrobnytstva z vykorystanniam vodnykh tekhnolohii ta fizychnoho tepla metalurhiinoho obladdannia. Teoriia i praktyka metalurhii. №4 (149), 2025. S. 50-57. URL: https://nmetau.edu.ua/file/zh_04_2025.pdf.
12. Traceability: Definition and how to implement it successfully. 2025. URL: https://www.mecalux.com/blog/traceability?utm_source=chatgpt.com.
13. Material Flow Management. Marian R. Chertow. Encyclopedia of Energy Reference Work 2004. URL: https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/material-flow-management?utm_source=chatgpt.com.
14. Guilherme Fortuna, P. Dinis Gaspar. Implementation of Industrial Traceability Systems: A Case Study of a Luxury Metal Pieces Manufacturing Company. Processes. 2022, 10(11), <https://doi.org/10.3390/pr10112444> URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2444>.
15. ISO 9000:2015 (en). Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. section 3. - Terms and definitions пункт paragraph 3.6.13. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>.
16. K. Higuchi, K. Kunitomo, S. Nomura. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace. SIJ International, Vol. 60 (2020), No. 11, pp. 2366–2375. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115>. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/11/60_ISIJINT-2020-115/_pdf?utm_source=chatgpt.com.
17. Naito M., Okamoto A., Yamaguchi K. et. el. Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Temperature Control of Thermal Reserve Zone. Nippon Steel Technical Report. No. 94 July 2006, p. 103-108. URL: https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf?utm_source=chatgpt.com.
18. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism. Official Journal of the European Union. OJ L 130, 16.05.2023, p. 52–104. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956&utm_source=chatgpt.com.
19. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Ironmaking: How It Works. Metals. 2020, 10(7), 922; <https://doi.org/10.3390/met10070922>. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922?utm_source=chatgpt.com.
20. Wenqing Xu, Wanjie Cao, Tingyu Zhu et el. Material Flow Analysis of CO2 Emissions from Blast Furnace and Basic Oxygen Furnace Steelmaking Systems in China. Steel Research International. September 201586(9). DOI:10.1002/srin.201400228.
21. Strizhenok A., Bykova M., Korotaeva A. Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of

- Central and Northern Eurasia. Journal of Ecological Engineering. 2024, 25(5), 43-69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>.
22. IPCC – 2026. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: https://www.ipcc.ch/about/engage_with_the_ipcc/.
23. Andrew J. Pimm, Tim T. Cockerill, William F. Gale. Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction. Journal of Cleaner Production. Vol. 312, 20 August 2021, 127665. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621018837>.
24. Shahabuddin M., Alireza Rahbari, Akbar Rhamdhani M. Process modelling for the production of hydrogen-based direct reduced iron in shaft furnaces using different ore grades. Ironmaking & Steelmaking. 2025. Vol. 52(1) 3-16 p. <https://doi.org/10.1177/03019233241254666>.
25. Kamkina L.V., Mishalkin A.P., Kamkin V.Iu., Mianovska Ya.V., Dvorkovyi O. I., Isaieva L.Ie. Modeliuvannia vplyvu rezhymu produvannia vanny na masoobminni protsesy ta shlakoutvorennia u kysnevomu konverteri. Teoriia i praktyka metalurhii. №1, 2022. P. 27-37.
26. Mishalkin A.P., Kamkina L.V., Ivashchenko V.P., Petrenko V.A., Mianovska Ya.V., Ivchenko O.V. Mistse vynakhidnytstva yak skladovoi intelektualno-fakhovoho potentsialu naukovtsiv u vdoskonalenni promyslovykh tekhnolohii. Teoriia i praktyka metalurhii. №3, 2025. S. 75-87. ISSN 1028-2335 (print). URL: https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2025_v.pdf.
27. Mishalkin A.P., Malovik D.V., Chystiakov V.H., Petrenko V.O. Analiz vplyvu stabilizatsii vykhidnykh vlastyvostei ahlomeratu na fizyko-khimichni protsesy v kharakternykh zonakh domennoi pechi. Met. lite Ukr., vol. 33 № 3-4 (342-343), 2025. P. 28-42.
28. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>.
29. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct. Paris: OECD Publishing, 2018., 95 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct_c669bd57/15f5f4b3-en.pdf.
30. ISO 50002-1:2025. Energy audits. Part 1: General requirements with guidance for use. Edition 1, 2025. URL: https://www.iso.org/standard/83645.html?utm_source=chatgpt.com.

Received 10.03.2026.

Accepted 10.04.2026.

Published 30.04.2026

UDK 669.1:504.06:658.562

A. Mishalkin, V. Petrenko, L. Kamkina, T. Fonarova, A. Selegei

INTEGRATION OF COMPLIANCE MANAGEMENT FUNCTIONALITY INTO THE SYSTEM OF DECARBONIZED DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PRODUCTION

Abstract. *The article identifies the main directions for integrating compliance functionality components into the technological development system of ferrous metallurgy, in line with modern concepts of decarbonization, circular economy, and ESG-oriented management. It examines mechanisms and methods for improving the environmental friendliness of key metallurgical processes through the use of secondary resources (slag, dust, dispersed waste from lime production), the physical heat of production gases, and the chemical energy of CO–H₂ mixtures.*

Relevance of the study. Given the high energy intensity and significant share of the metallurgical industry in global greenhouse gas emissions, reducing the carbon intensity of production is becoming one of the key factors in ensuring the competitiveness of metallurgical products on the world market, especially in the context of the introduction of carbon emission regulation mechanisms, in particular CBAM.

In these conditions, the formation of effective management mechanisms becomes particularly important. One such mechanism capable of ensuring the integration of technological, environmental, and economic aspects of metallurgical production development is compliance management. Its functionality should be viewed as an integrated system for managing the decarbonized development of metallurgy, ensuring the alignment of innovative technological solutions with modern environmental standards, regulatory requirements, and sustainable development principles.

The purpose of the work is to substantiate the conceptual foundations for integrating compliance management functionality into the system of decarbonized development of metallurgical production and to determine its role in improving energy and resource efficiency, environmental safety, and technological sustainability of iron and steel smelting processes.

To achieve this goal, the following research methods were used: systematic analysis of current trends in the development of metallurgical technologies; methods of structural and functional analysis of production management systems; comparative analysis of energy and resource efficiency indicators and carbon intensity of metallurgical processes;

generalization of scientific and technological approaches to the decarbonization of metallurgical production.

Research objectives. The following tasks were solved in the work:

Analysis of current technological and environmental challenges for the development of metallurgical enterprises in the context of industry decarbonization.

Justification of a conceptual model for integrating compliance management into the sustainable development system of metallurgical production.

Identification of the main directions for the use of compliance tools to improve energy and resource efficiency and reduce the carbon intensity of metallurgical processes.

Assessment of the role of compliance functionality as an integration mechanism for coordinating technological, environmental, and economic parameters of production.

The scientific novelty of the results obtained lies in the following.

It is proposed to consider the mechanism of a functionally integrated system of compliance control and coordination of production processes, the main component of compliance – assurance as: a system-forming factor based on an institutional and technological platform for management/regulation of the mechanism for ensuring decarbonized development of production, combining technological, environmental, and management tools for ensuring the sustainability of metallurgical processes.

Conceptual approaches to the integration of compliance tools into the energy and resource efficiency management system of metallurgical production have been substantiated, which allows for increased transparency of material and energy flows and control of the carbon intensity of the main stages of the end-to-end technological scheme of steel production.

The system of key indicators for assessing the effectiveness of decarbonization of metallurgical processes, which combine technological, energy, and climate indicators of production, has been refined.

The role of compliance management as an integration mechanism for harmonizing innovative technological solutions with modern environmental and regulatory requirements is revealed, which ensures the formation of prerequisites for the sustainable development of metallurgical enterprises.

It is shown that the integration of compliance tools into decarbonization processes allows for carbon footprint control, minimization of man-made environmental impact, and increased economic stability of enterprises. The role of improving existing technologies in the implementation of the concept of sustainable and environmentally safe production is substantiated.

Keywords: *compliance functionality, management, decarbonization of metallurgy, carbon footprint, CO₂ intensity, circular economy, resource conservation and energy efficiency, integration of compliance tools, ESG-oriented management.*

Мішалкін Анатолій Павлович, доцент кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0002-7206-1809>

Петренко Віталій Олександрович, професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри інтелектуальної власності та управління проектами, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Камкіна Людмила Володимирівна, професор, завідувачка кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

Фонарьова Тетяна Анатоліївна, доцент кафедри інтелектуальної власності та управління проектами, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>

Селегей Андрій Миколайович, доцент кафедри інженерії та фундаментальних дисциплін, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>

Mishalkin Anatolii, associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0009-0002-7206-1809>

Petrenko Vitalii, professor, Head of the Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Kamkina Lydmila, professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

Fonarova Tetiana, associate Professor of the Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>

Selegei Andrii, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering and Fundamental Disciplines, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>

ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОЛИКІВ ТА ЇХ РЕСУРСУ ВАЖКОГО СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

Анотація. У статті розглянуто проблему визначення діагностичних ознак технічного стану роликів важкого стрічкового конвеєра та оцінювання їх ресурсу в умовах гірничого виробництва. Актуальність дослідження зумовлена тим, що відмови роликів є однією з найпоширеніших причин зростання опору руху стрічки, пошкодження стрічкового полотна, перевантаження суміжних роликів та збільшення простоїв транспортної системи. Метою роботи є обґрунтування інформативних діагностичних параметрів, які дозволяють своєчасно виявляти дефектні та нерухомі ролики, а також оцінювати ступінь вичерпання їх ресурсу з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень. У роботі проаналізовано основні фактори, що впливають на технічний стан роликів: величину лінійного навантаження, масу і гранулометричний склад вантажу, швидкість транспортування, натяг стрічки, поперечні коливання полотна, ударну дію великих кусків матеріалу та радіальне биття корпуса ролика. На основі розрахункових залежностей показано, що найменш надійним елементом ролика є підшипниковий вузол, ресурс якого визначається сумарною дією статичних, динамічних, ударних і вібраційних навантажень. Запропоновано підхід до оцінювання міри пошкодження підшипника за інтервал часу, що дорівнює повному оберту стрічки конвеєра, а також спосіб виявлення нерухомих роликів на основі порівняння амплітуд інформативних частот вібросигналу еталонної та контрольованих роликів із урахуванням затухання коливань і зміни швидкості руху стрічки. Встановлено, що найбільш інформативними діагностичними ознаками є параметри вібраційного сигналу, амплітудно-частотні характеристики, приріст амплітуди на інформативних частотах, ознаки підвищеного опору обертанню та температурні індикатори перегріву. Практичне значення результатів полягає в можливості використання визначених ознак для побудови систем автоматизованого моніторингу роликів важких стрічкових конвеєрів і прогнозування міжремонтного ресурсу обладнання.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, ролик, роликів, технічний стан, діагностичні ознаки, ресурс, підшипниковий вузол, вібраційна діагностика.

Постановка проблеми.

Надійність важких стрічкових конвеєрів, що працюють у гірничо-металургійному виробництві, значною мірою визначається технічним станом роликів та роlikоопор, оскільки саме ці елементи сприймають основні статичні й динамічні навантаження від стрічки та вантажопотоку. В умовах підвищеного запилення, змінної продуктивності, значних швидкостей транспортування і наявності у вантажопотоці крупнокускового матеріалу інтенсивно зношуються підшипникові вузли, ущільнення, вісь і обичайка ролика, що призводить до зростання опору обертанню, підвищення енергоспоживання та погіршення загальної надійності конвеєрної лінії.

Передчасна відмова роликів спричиняє не лише локальне пошкодження вузлів роlikоопори, а й створює передумови для прискореного зношування стрічки, появи небезпечних різальних кромок на нерухомих роликах, збільшення аварійних простоїв і витрат на ремонт. Тому визначення діагностичних ознак технічного стану роликів та встановлення закономірностей зміни їх ресурсу під дією експлуатаційних факторів є актуальним науково-практичним завданням, розв'язання якого дає змогу перейти від аварійного обслуговування до технічного обслуговування за фактичним станом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні стрічкові конвеєри великої продуктивності є складними технічними системами безперервної дії, надійність яких значною мірою визначається технічним станом роlikоопор.

У роботах [1–3] розглянуто експериментальні підходи до діагностики роликів за параметрами вібраційних і акустичних сигналів. Показано, що зміна спектрального складу сигналу та збільшення рівня середньоквадратичного значення вібрації можуть використовуватися як індикатори розвитку дефектів підшипників. Автори [1] відзначають, що найбільш інформативними є високочастотні складові сигналу, які відображають початкові стадії руйнування елементів підшипника.

Значний розвиток отримали акустичні методи діагностики, які базуються на використанні алгоритмів машинного навчання. У роботах [2, 8] доведено ефективність застосування спектральних ознак та MFCC-параметрів для класифікації технічного стану роликів у складних шумових умовах. Подальше

вдосконалення цих підходів представлено у [9], де використано глибинні нейронні мережі з механізмом самоуваги для автоматичного виділення інформативних характеристик сигналу.

Окремий напрям досліджень присвячений використанню температурних параметрів як діагностичних ознак. У роботах [5, 12] показано, що локальне підвищення температури ролика або підшипникового вузла є надійним індикатором зростання опору обертанню. Застосування тепловізійних систем дозволяє здійснювати безконтактний моніторинг великої кількості роликів у реальному часі. У дослідженні [4] запропоновано комбінований підхід, що поєднує акустичні та теплові ознаки, що дозволяє підвищити достовірність визначення несправностей.

У роботі [6] розглянуто непрямий метод діагностики, який базується на аналізі поперечних коливань стрічки. Такий підхід дозволяє зменшити кількість необхідних сенсорів і може бути ефективним для протяжних конвеєрних трас. Автори [7] відзначають перспективність прогнозування технічного стану роликів за допомогою моделей машинного навчання, які враховують багатовимірні параметри сигналів.

Дослідження [10–13] спрямовані на створення мультисенсорних систем моніторингу, що поєднують вібраційні, акустичні та температурні параметри. Зокрема, у [11] запропоновано систему визначення заклинювання роликів на основі комплексного аналізу сигналів різної фізичної природи. У роботах [13, 15] розглянуто концепцію автономних вузлів моніторингу, здатних здійснювати локальну обробку даних та передавати результати у систему керування.

Сучасні тенденції розвитку діагностики роликів пов’язані із застосуванням технологій комп’ютерного зору та роботизованих інспекційних систем. У роботах [14–17] показано можливість використання глибинних нейронних мереж для автоматичного виявлення дефектів роликів за відеоданими, а також використання мобільних роботизованих платформ для регулярного моніторингу стану конвеєрних систем.

Разом з тим аналіз літературних джерел показує, що більшість досліджень виконано для лабораторних умов або окремих типів сигналів. Недостатньо уваги приділено визначенню узагальненого набору діагностичних ознак,

адаптованого до умов експлуатації важких стрічкових конвеєрів гірничих підприємств, що характеризуються високим рівнем шуму та динамічних навантажень. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на обґрунтування інформативних параметрів діагностики роликів і створення ефективних систем автоматизованого моніторингу.

Мета дослідження. Метою роботи є визначення інформативних діагностичних ознак технічного стану роликів важкого стрічкового конвеєра та обґрунтування підходу до оцінювання їх ресурсу з урахуванням реальних умов експлуатації. Для досягнення поставленої мети необхідно: проаналізувати вплив лінійного навантаження, швидкості транспортування, натягу стрічки, гранулометричного складу вантажу, ударної дії крупних кусків і радіального биття корпусу на навантаження підшипникових вузлів; встановити найбільш інформативні параметри, за якими можна ідентифікувати справний, передаварійний і несправний стани роликів; обґрунтувати використання міри пошкодження для оцінювання напрацювання та залишкового ресурсу; а також сформулювати підхід до своєчасного виявлення нерухомих роликів у складі конвеєрного става.

Викладення основного матеріалу дослідження. Під відмовою ролика в загальному випадку слід розуміти вихід з ладу осі, підшипників, ущільнень і корпусу, за якого номінальний момент ролика збільшується у два рази і більше.

Несправний ролик характеризується підвищеним шумом у вигляді стукоту та різких періодичних звуків високої частоти. Якщо сили тертя у підшипникових вузлах стають значними, обичайки роликів перестають обертатися і швидко зношуються під дією рухомої стрічки. За відсутності своєчасної заміни такого ролика на його корпусі утворюються гострі різальні кромки, які можуть глибоко, а інколи й наскрізь, пошкоджувати стрічку. Технічний стан роликів залежить не лише від точності виготовлення та монтажу, а й від умов експлуатації. Найбільший вплив мають величина завантаження конвеєрного полотна і гранулометричний склад вантажу. Зі збільшенням заповнення конвеєрної стрічки матеріалом розкид навантаження на підшипникові вузли роликів зменшується, тоді як поява у вантажопотоці великих кусків призводить до зростання навантаження на ролики.

На кожну роликову секцію конвеєра діє навантаження, створюване транспортованим матеріалом, яке дорівнює:

$$P_g = q_l \cdot a_p .$$

де q_l — лінійне навантаження на стрічці конвеєра, Н/м; a_p — відстань між роликоопорами, м. Навантаження на бічні ролики є меншим, ніж на середній ролик.

Навантаження на опорний ролик визначають за залежністю:

$$P = 0,6 \cdot (P_g + a_p P_l) + P_T .$$

де P_l — лінійна вага стрічки, Н/м; P_T — вага обертових частин несучого ролика, Н.

Аналіз наведених залежностей між навантаженням і технічним станом роликів показав, що найменш надійним елементом є підшипникові вузли, передусім верхні, які навіть за невеликої завантаженості виходять з ладу швидше. На їх працездатність суттєво впливають циклічні навантаження, спричинені вигином осі ролика під навантаженням, особливо за наявності у вантажопотоці великих кусків при малій кількості підсипки. Під час взаємодії такого куска з роликом виникає імпульсна та ударна дія. Імпульсна взаємодія полягає у зміні характеру дії куска в момент входу на ролик: розподілене навантаження переходить у зосереджене на площі виступу куска. Саме різниця деформацій визначає динаміку взаємодії куска з роликом. Ударна взаємодія виникає через неспівпадіння векторів швидкості куска і стрічки під час підходу до роликів. Вираз для розрахунку величини імпульсного удару окремим куском по ролику має вигляд [18]:

$$P_k = m_k \cdot V^2 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_1) \cdot (1 + k_1) a^{-1} .$$

де m_k — маса куска, кг; V — швидкість руху стрічки, м/с; θ_1 — кут нахилу дотичної до кривої прогину в точці набігання стрічки на ролик відносно осі Х, град; θ_2 — кут між напрямком швидкості куска після удару об ролик і віссю Х, град; k_1 — коефіцієнт відновлення при ударі об жорстку роликоопору ($k=0,5$); a — довжина поверхні дотику куска з роликом під час удару, м.

Крім того, на ролики додатково діє навантаження від поперечних коливань стрічки з вантажем, яке визначають із виразу:

тут q_n — сумарне навантаження провисаючих ділянок стрічки між сусідніми роликоопорами, Н/м; ℓ_n — довжина полотна у прольоті, м;

$$k_{k1} = 1 + h(3h_0)^{-1}; \quad k_{k2} = 32E_0 \left(9\ell_{\pi}\ell_p^2 \right)^{-1} \cdot (h + h_0)^2 \cdot (h^2 - h_0^2),$$

де h_0 — стріла провисання полотна стрічки в середині прольоту, м; E_0 — поздовжня жорсткість тягового органу, МПа.

Істотний вплив на навантаження підшипникових вузлів роликів справляє також радіальне биття, зумовлене різностінністю корпусу (обичайки). Додаткові навантаження, спричинені такою різностінністю, можуть досягати значних величин і бути співмірними з вагою самого ролика та транспортованого вантажу.

Отже, повне радіальне навантаження на підшипники роликів у процесі експлуатації визначається як сума таких складових:

$$P_{\Pi} = Q_{ct} + Q_o + q\omega \cos \omega_y t_p,$$

тут $Q_{ct} = q_p + q_l + q_z + q_y$ — радіальне навантаження від ваги ролика, стрічки, вантажу та неправильної установки за висотою; $Q_d = P_k + P_{kol}$; P_k — динамічне навантаження від вантажопотоку і стрічки.

Залежність навантаження на середній ролик роликоопори від величини лінійного навантаження конвеєра за зміни швидкості транспортування та натягу стрічки наведено на рис. 1 [19].

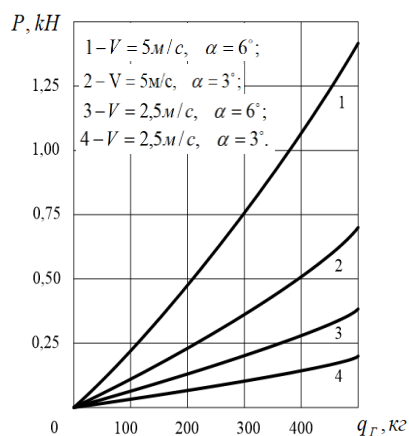


Рисунок 1 - Залежність навантаження на середній ролик роликоопори від величини лінійного навантаження за зміни швидкості транспортування і натягу стрічки

Залежність додаткового навантаження, зумовленого великими кусками матеріалу та биттям корпусу, на підшипники від швидкості транспортування за різної різностінності корпусу ролика наведено на рис. 2 [19].

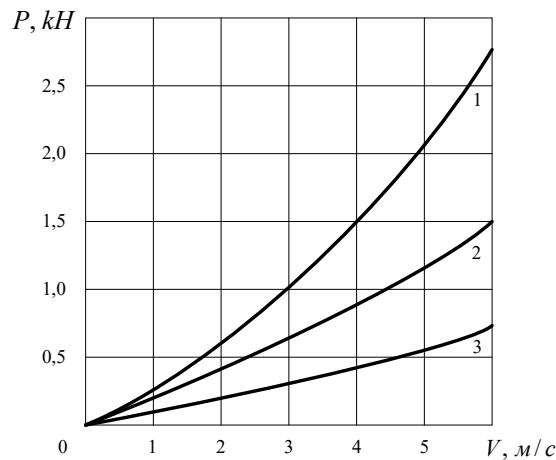


Рисунок 2 - Залежність додаткового навантаження від великих кусків і биття корпусу на підшипники від швидкості транспортування при різній різностінності корпусу ролика: 1 – 0,25 мм; 2 – 0,15 мм; 3 – 0,05 мм.

Оцінювання ступеня пошкодження підшипника ролика доцільно виконувати за допомогою міри пошкодження. При цьому міру пошкодження підшипника визначають за інтервал часу, що дорівнює повному оберту стрічки конвеєра, за припущень, прийнятих раніше під час розрахунку зношування конвеєрної стрічки. Отже, міра пошкодження підшипника ролика за один повний оберт стрічки дорівнює:

$$\Delta\varphi_i = n_i (k_1 \cdot k_2 \cdot P_{\Pi} \cdot z^{-1})^3 \cdot C^{-2},$$

де n_i — частота обертання ролика на i -му циклі, хв^{-1} ; C — стала працездатності підшипника, що залежить від конструкції, внутрішніх розмірів і якості матеріалу підшипника; P_{Π} — навантаження на опорний ролик, Н; z — кількість підшипників у ролику; k_1 — коефіцієнт, що враховує, чи обертається внутрішнє ($k_1 = 1,1$) або зовнішнє ($k_1 = 1,45$) кільце підшипника; k_2 — коефіцієнт, який характеризує температурний режим роботи підшипника. Частоту обертання ролика визначають за залежністю:

$$n_i = V_i \cdot 60 \cdot (\pi d)^{-1},$$

де V_i — швидкість руху стрічки, м/с; d — діаметр роликів, м.

Окрім визначення працездатності роликів стрічкового конвеєра та оцінювання його технічного стану, важливе значення має своєчасне виявлення

нерухомих, тобто вже несправних, роликів. Розроблено спосіб виявлення нерухомих роликів.

Суть способу полягає в реєстрації змін сигналу, який випромінюється еталонною ділянкою става конвеєра, порівняно з контрольною ділянкою. При цьому вимірюють вібрацію конвеєрного става на холостому ході та під час транспортування контрольної порції вантажу, а реєстрацію сигналів починають у момент проходження вантажем еталонної роликоопори. Далі виконують стробування вібросигналу, виділяючи часові ділянки, що відповідають проходженню вантажу через кожну наступну роликоопору, і здійснюють спектральний аналіз сигналу. Із частотного спектра виокремлюють інформативні частоти. У разі перевищення допустимого значення приросту амплітуди інформативної частоти за модулем роблять висновок про несправність, причому номер несправної роликоопори відповідає номеру аналізованої стробованої ділянки.

Урахування зміни швидкості транспортування здійснюють шляхом стробування віброграми через мірні проміжки часу, що дорівнюють часу проходження вантажу від однієї роликоопори до іншої. Це дає змогу підвищити надійність діагностування несправних роликів.

Застосування запропонованого способу дає змогу підвищити надійність і довговічність механічного обладнання конвеєра, опорних конструкцій і стрічки, оскільки за своєчасної заміни та ремонту несправних роликів не перевантажуються сусідні роликоопори, не виникають додаткові вібрації, тобто загальні умови експлуатації поліпшуються. Завдяки оперативному виявленню несправних роликів скорочується тривалість простоїв, пов'язаних із ремонтом.

Ресурс роликів і роликоопор найбільшою мірою залежить від гранулометричного складу матеріалу, кількості матеріалу на стрічці, швидкості транспортування та величини натягу. Особливо істотним є вплив наявності у вантажопотоці великих кусків матеріалу, які створюють ударну дію на підшипники роликів. Величина пошкодження визначається розміром куска і характеризується мірою пошкодження $\Delta\varphi_{ki}$. За наявності інформації про гранулометричний склад вантажопотоку величину впливу можна поділити на кілька рівнів і сумувати міри пошкодження відповідно до кожного рівня, тобто

залежно від маси куска. Алгоритм визначення середнього використаного ресурсу роликів наведено на рис. 3.

Наведений алгоритм можна використовувати для визначення міжремонтних ресурсів обладнання.

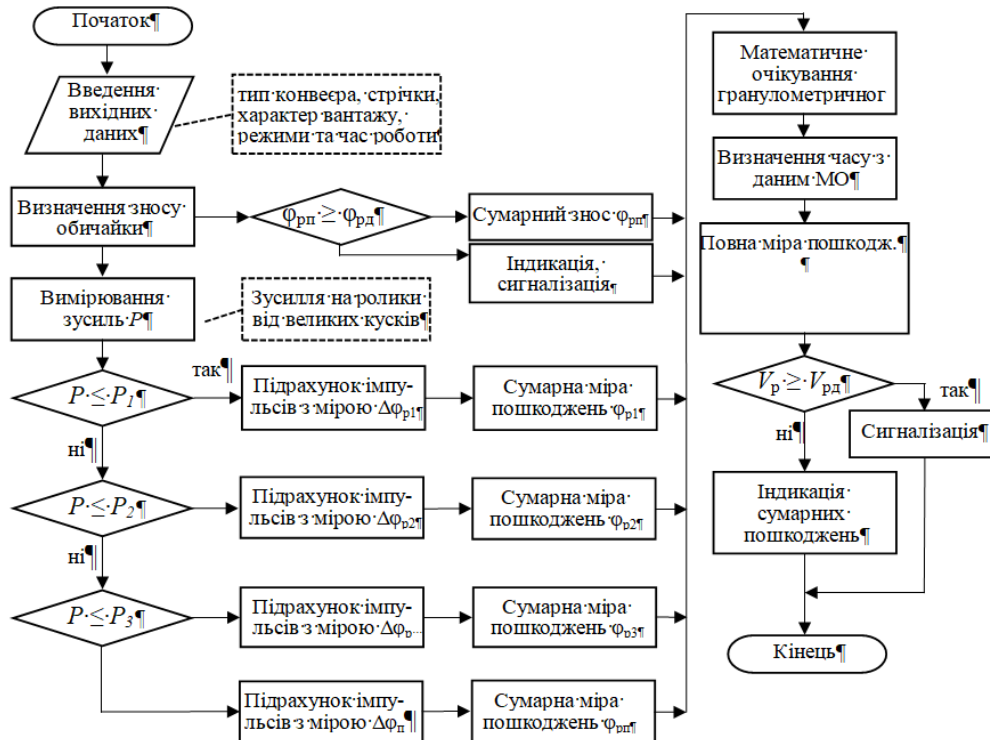


Рисунок 3 - Алгоритм визначення середнього використаного ресурсу роликів

Висновки. У роботі встановлено, що технічний стан роликів важкого стрічкового конвеєра визначається сукупною дією експлуатаційних навантажень, серед яких найбільш суттєвими є лінійне навантаження на стрічку, швидкість транспортування, натяг стрічки, гранулометричний склад матеріалу, ударна дія великих кусків та радіальне биття корпусу ролика. Найбільш уразливими елементами конструкції є підшипникові вузли, ресурс яких істотно зменшується за зростання динамічних і ударних навантажень.

Показано, що інформативними діагностичними ознаками технічного стану роликів можуть бути параметри вібраційних сигналів, амплітудно-частотні характеристики, підвищення шуму, поява ударних складових, збільшення моменту опору обертанню, локальне зростання температури та розрахункові значення навантаження на підшипники. Використання міри пошкодження підшипника дозволяє кількісно оцінювати ступінь використання

ресурсу ролика й формувати основу для прогнозування міжремонтного періоду.

Практичне застосування отриманих результатів сприятиме зменшенню аварійних зупинок конвеєра, зниженню витрат на ремонт, підвищенню довговічності стрічки та механічного обладнання, а також переходу до системи технічного обслуговування за станом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Liu X., Pang Y., Lodewijks G. Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers. *Measurement*. 2018. Vol. 125. P. 277-282. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.04.066.
2. Liu X., Chen H., Zhang Y. Acoustic signal based fault detection on belt conveyor idlers using machine learning. *Applied Acoustics*. 2020. Vol. 162. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107218.
3. Skoczylas A., Bortnowski P., Król R. Belt conveyors rollers diagnostics based on acoustic signal collected using autonomous legged inspection robot. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, №. 5. DOI: 10.3390/app11052299.
4. Liu Y., Miao C., Li X., Ji J. Research on the fault analysis method of belt conveyor idlers based on sound and thermal infrared image features. *Measurement*. 2021. Vol. 179. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110177.
5. Siami M., Barszcz T., Wodecki J., Zimroz R. Automated Identification of Overheated Belt Conveyor Idlers in Thermal Images with Complex Backgrounds Using Binary Classification with CNN. *Sensors*. 2022. Vol. 22, №. 24. DOI: 10.3390/s22241000.
6. Bortnowski P., Król R., Ozdoba M. Roller damage detection method based on transverse vibrations of the conveyor belt. *Eksplotacja i Niezawodność*. 2022. Vol. 24, №. 3. DOI: 10.17531/ein.2022.3.12.
7. Kaur A., Altaf S., Iqbal S. Predictive Framework of Conveyor Idler Bearings Fault Monitoring using Efficient Signal Processing Technique. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2022. Vol. 15, №. 4, P 154-165. DOI: 10.25103/jestr.154.22
8. A Brief Review of Acoustic and Vibration Signal-Based Fault Detection for Belt Conveyor Idlers Using Machine Learning Models / F. Alharbi et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/s23041902>
9. Liu Y., Miao C., Li X., Ji J. A Dynamic Self-Attention-Based Fault Diagnosis Method for Belt Conveyor Idlers. *Machines*. 2023. Vol. 11, №. 2. DOI: 10.3390/machines11020216.
10. Alharbi F., Luo S. A Review of Fault Detecting Devices for Belt Conveyor Idlers. *Journal of Mechatronic Systems*. 2024. Vol. 8 (1) : 39. DOI: 10.17977/um016v8i12024p039
11. Shin K.S., Nam Y., Suh Young-Joo Designing a Multivariate Belt Conveyor Idler Stall Detection and Identification System with Scalability Analysis. *Sensors*. 2024. Vol. 24 (24). DOI: <https://doi.org/10.3390/s24247989>.
12. Xiuyu Y., Liyong T., Feng C. Thermal infrared imaging for conveyor roller fault detection in coal mines. *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19, №. 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0307591.
13. A New Embedded Condition Monitoring Node for the Idler Roller of Belt conveyor / P.Zhou et al. *IEEE Sensors Journal*. 2024. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3363905.
14. Li X.LiXin., Liu Z., Wang X. Deep learning based belt conveyor idler fault detection research. *Conference: TTAE 2024*. 2024. DOI: 10.1117/12.3055375.

15. Designing and optimizing an intelligent self-powered condition monitoring system for mining belt conveyor idlers and its application / X. Jiao et al. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2025. Vol. 46, p. 1679–1698. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10483-025-3291-6>.
16. A fault diagnosis method for conveyor belt idlers based on ISVD-TFRE and Doppler-distorted sound signal / F. Jiang et al. *Measurement*. 2026. Vol. 257, Part D. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118910>.
17. An Integrated Inspection System for Belt Conveyor Rollers. Advancing in an Enterprise Architecture / R. Nascimento et al. *Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems*. Portugal. 2017. Vol. 2. DOI: 10.5220/0006369101900200.
18. Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Тиханська А.М. Визначення навантаження на став автоматизованого конвеєра від швидкості транспортування. *Гірничий вісник*, Вип. 104, 2018. с. 173-178. DOI: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-173-178.
19. Лобов В.Й., Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Рубан С.А. Автоматизовані системи керування конвеєрними установками : монографія. Кривий Ріг : Вид. центр ДВНЗ «КНУ», 2015. 450с.

Received 18.03.2026.

Accepted 13.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 622.647.2:681.518.54

Mykhailo Tykhanskyi, Antonina Tykhanska, Ihor Kurhanov

DETERMINATION OF DIAGNOSTIC INDICATORS OF THE TECHNICAL CONDITION OF IDLERS AND THEIR SERVICE LIFE IN A HEAVY BELT CONVEYOR

Abstract. *The article addresses the problem of determining diagnostic indicators of the technical condition of idlers of a heavy belt conveyor and estimating their service life under mining conditions. The relevance of the study is due to the fact that idler failures are among the most common causes of increased belt motion resistance, damage to the conveyor belt, overload of adjacent idler supports, and downtime of the transport system. The aim of the paper is to substantiate informative diagnostic parameters that make it possible to detect defective and jammed idlers in a timely manner and to assess the degree of their service life depletion with regard to actual operating loads. The study analyses the main factors influencing idler condition, namely linear load, mass and particle-size composition of the bulk material, conveying speed, belt tension, transverse belt oscillations, impact action of large lumps of material, and radial runout of the idler shell. Based on the derived relationships, it is shown that the least reliable element of the idler is the bearing assembly, whose service life is determined by the combined effect of static, dynamic, shock, and vibration loads. An approach to estimating the bearing damage measure over a time interval equal to one full revolution of the conveyor belt is*

proposed, as well as a method for detecting jammed idlers by comparing the amplitudes of informative frequencies in the vibration signal of a reference support and the monitored supports while taking into account oscillation attenuation and changes in belt speed. It is established that the most informative diagnostic indicators are vibration signal parameters, amplitude-frequency characteristics, amplitude growth at informative frequencies, increased rotation resistance, and thermal overheating indicators. The practical value of the results lies in the possibility of using the determined indicators to build automated condition monitoring systems for idlers of heavy belt conveyors and to predict the maintenance interval and service life of the equipment.

Keywords: belt conveyor, idler, idler support, technical condition, diagnostic indicators, service life, bearing assembly, vibration diagnostics.

REFERENCES

1. Liu, X., Pang, Y., & Lodewijks, G. (2018). Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers. *Measurement*, 125, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.066>
2. Liu, X., Chen, H., & Zhang, Y. (2020). Acoustic signal based fault detection on belt conveyor idlers using machine learning. *Applied Acoustics*, 162, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107218>
3. Skoczylas, A., Bortnowski, P., & Król, R. (2021). Belt conveyors rollers diagnostics based on acoustic signal collected using autonomous legged inspection robot. *Applied Sciences*, 11(5), 2299. <https://doi.org/10.3390/app11052299>
4. Liu, Y., Miao, C., Li, X., & Ji, J. (2021). Research on the fault analysis method of belt conveyor idlers based on sound and thermal infrared image features. *Measurement*, 179, 110177. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110177>
5. Siami, M., Barszcz, T., Wodecki, J., & Zimroz, R. (2022). Automated identification of overheated belt conveyor idlers in thermal images with complex backgrounds using binary classification with CNN. *Sensors*, 22(24), 1000. <https://doi.org/10.3390/s22241000>
6. Bortnowski, P., Król, R., & Ozdoba, M. (2022). Roller damage detection method based on transverse vibrations of the conveyor belt. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 24(3), 503–510. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.3.12>
7. Kaur, A., Altaf, S., & Iqbal, S. (2022). Predictive framework of conveyor idler bearings fault monitoring using efficient signal processing technique. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 15(4), 154–165. <https://doi.org/10.25103/jestr.154.22>
8. Alharbi, F., et al. (2023). A brief review of acoustic and vibration signal-based fault detection for belt conveyor idlers using machine learning models. *Sensors*, 23(4), 1902. <https://doi.org/10.3390/s23041902>
9. Liu, Y., Miao, C., Li, X., & Ji, J. (2023). A dynamic self-attention-based fault diagnosis method for belt conveyor idlers. *Machines*, 11(2), 216. <https://doi.org/10.3390/machines11020216>
10. Alharbi, F., & Luo, S. (2024). A review of fault detecting devices for belt conveyor idlers. *Journal of Mechatronic Systems*, 8(1), 39. <https://doi.org/10.17977/um016v8i12024p039>
11. Shin, K. S., Nam, Y., & Suh, Y.-J. (2024). Designing a multivariate belt conveyor idler stall detection and identification system with scalability analysis. *Sensors*, 24(24), 7989. <https://doi.org/10.3390/s24247989>
12. Xiuyu, Y., Liyong, T., & Feng, C. (2024). Thermal infrared imaging for conveyor roller fault detection in coal mines. *PLoS ONE*, 19(7), e0307591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307591>
13. Zhou, P., et al. (2024). A new embedded condition monitoring node for the idler roller of belt conveyor. *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3363905>

14. Li, X., Liu, Z., & Wang, X. (2024). Deep learning based belt conveyor idler fault detection research. Proceedings of TTAE 2024. <https://doi.org/10.1117/12.3055375>
15. Jiao, X., et al. (2025). Designing and optimizing an intelligent self-powered condition monitoring system for mining belt conveyor idlers and its application. Applied Mathematics and Mechanics, 46, 1679–1698. <https://doi.org/10.1007/s10483-025-3291-6>
16. Jiang, F., et al. (2026). A fault diagnosis method for conveyor belt idlers based on ISVD-TFRE and Doppler-distorted sound signal. Measurement, 257(Part D). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118910>
17. Nascimento, R., et al. (2017). An integrated inspection system for belt conveyor rollers: Advancing in an enterprise architecture. Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems, 2, 190–200. <https://doi.org/10.5220/0006369101900200>
18. Efimenko, L. I., Tykhanskyi, M. P., & Tykhanska, A. M. (2018). Vyznachennia navantazhennia na stav avtomatyzovanoho konveiera vid shvydkosti transportuvannia [Determination of the load on the automated conveyor stand from the transportation speed]. Hirnychi Visnyk, (104), 173–178. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2018-1-104-173-178>
19. Lobov, V. Y., Efimenko, L. I., Tykhanskyi, M. P., & Ruban, S. A. (2015). Avtomatyzovani systemy keruvannia konveiernymy ustanovkamy [Automated control systems for conveyor installations]. KNU Publishing Center.

Тиханський Михайло Петрович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-1168-4677>

Тиханська Антоніна Миколаївна - старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна. <https://orcid.org/0009-0006-0714-1916>

Курганов Ігор Дмитрович - кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна. <https://orcid.org/0009-0000-9916-183X>

Tykhanskyi Mykhailo Petrovych – PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Computer Science and Technologies, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-1168-4677>

Tykhanska Antonina Mykolaivna – Senior Lecturer of the Department of Automation, Computer Science and Technologies, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0006-0714-1916>

Kurhanov Ihor Dmytrovych – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Automation, Computer Science and Technologies, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0000-9916-183X>

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМПЕДАНСНОГО PI-РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ НА МОВІ GO

Анотація. Керування електродами дугової сталеплавильної печі (ДСП) залишається складною інженерною задачею через нелінійну та стохастичну природу електричної дуги. Нестабільність дуги безпосередньо впливає на питоме енергоспоживання та рівномірність проплавлення шихти, що критично для металургійних підприємств з безперервним циклом виробництва. У цій роботі розглянуто підхід до програмної реалізації імпедансного PI-регулятора системи керування електродами ДСП із застосуванням мови програмування Go.

В основу алгоритму покладено дискретну форму PI-регулятора з обмеженням інтегратора (*anti-windup*), що дозволяє уникнути насичення при різких змінах завдання. Математична модель дуги побудована на базі рівнянь Кассі-Майра, адаптованих для дискретного часового кроку. Програмна реалізація оформлена у вигляді модульної структури мовою Go з окремими компонентами для розрахунку регулятора, циклу моделювання та збереження результатів у форматі CSV.

За результатами моделювання встановлено, що система виходить на заданий імпеданс протягом 0,15-0,2 с при перерегулюванні, що не перевищує допустимих меж. Зафіксована залишкова статична похибка в межах 2-3% пояснюється спрощеннями прийнятої моделі дуги та може бути усунена шляхом введення адаптивного коригування коефіцієнтів. Отримані результати підтверджують придатність Go як інструменту для реалізації алгоритмів керування у складі промислових програмних систем.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, імпедансне регулювання, PI-регулятор, математичне моделювання, електрична дуга, мова Go, система керування, автоматизація.

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей залишається актуальною задачею для металургійного виробництва, що зумовлено насамперед нестабільною поведінкою електричної

дуги. Дуга чутлива до зміни складу шихти, геометрії міжелектродного проміжку та температурних умов – її параметри можуть суттєво змінюватися протягом короткого часу. Наслідком цього є коливання струму і напруги, зростання питомих витрат електроенергії, підвищений знос електродів та погіршення технологічних показників плавки.

Регулювання положення електродів є основним інструментом стабілізації режиму горіння дуги. Однак між електричною підсистемою дуги та механічною підсистемою електрогідравлічного приводу існує принципова різниця в динаміці: електрична дуга реагує на збурення за мілісекунди, тоді як привід переміщення електрода має значно більшу інерційність. Ця асиметрія часових характеристик ускладнює синтез регулятора і вимагає обґрунтованого вибору його структури та параметрів.

У промисловій практиці поширеним підходом є імпедансне регулювання, при якому керуючий сигнал формується на основі повного опору дуги. На відміну від регулювання за струмом або напругою окремо, такий підхід враховує обидва електричних параметри одночасно, що забезпечує вищу точність і стійкість керування [8]. Додатковим чинником, що ускладнює задачу, є виражена нелінійність об'єкта керування: динаміка дуги нестаціонарна, містить швидкоплинні перехідні процеси, а її параметри суттєво залежать від поточного режиму роботи печі – зокрема від стадії плавки та ступеня проплавлення шихти. Саме ця нелінійність унеможливорює пряме застосування класичних методів синтезу і вимагає використання математичних моделей, що адекватно відтворюють реальну поведінку дуги.

У більшості наявних досліджень задача синтезу та верифікації регуляторів для ДСП вирішується із застосуванням спеціалізованих пакетів – зокрема MATLAB/Simulink. Такі засоби є ефективними на етапі аналізу, однак мають суттєве практичне обмеження: отримані моделі складно перенести у реальне промислове середовище без повного переписування коду. Це стримує впровадження розроблених алгоритмів керування у виробничі системи автоматизації.

Зазначена проблема визначає доцільність використання універсальних мов програмування для реалізації алгоритмів керування. Мова Go у цьому контексті має низку практичних переваг: компіляція у нативний виконуваний

код, відсутність залежності від зовнішніх середовищ виконання, підтримка модульної архітектури та висока продуктивність [18, 19]. Незважаючи на це, питання реалізації імпедансних PI-регуляторів для систем керування ДСП засобами Go залишається практично не дослідженим у відкритих джерелах, що й визначає мету даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтерес до математичного моделювання та автоматичного керування дуговими сталеплавильними печами не вщухає вже кілька десятиліть, що зумовлено рядом причин: зростання цін на електроенергію, посилення вимог до якості сталі та нестабільна поведінка електричної дуги, яка досі не піддається повністю детермінованому опису.

Відправною точкою для більшості досліджень у цій галузі слугує фундаментальна праця Fruehan [1], де систематизовано фізико-хімічні основи сталеплавильних процесів і показано, що якість металу безпосередньо залежить від того, наскільки точно підтримуються електричні режими: напруга, струм і потужність дуги. По суті, саме ця робота сформулювала вимоги до систем керування, які інші автори намагалися реалізувати практично.

Огляд Hay, Visuri, Aula та Echterhof [2] дає уявлення про те, наскільки різноманітними стали підходи до моделювання ДСП на сьогодні: термодинамічні, електричні, теплообмінні та гібридні моделі вирішують різні підзадачі, однак жодна з них окремо не охоплює повну картину процесу. Автори прямо вказують: адекватна модель має враховувати взаємодію електричної, теплової та механічної підсистем одночасно. Цю думку розвивають Abadi, Tang та Rashidi [3], які зосередились на чисельних методах – зокрема CFD та методі скінченних елементів – для відтворення електромагнітних і теплових полів усередині печі.

Окремо варто зупинитися на моделях динаміки самої дуги. Класична робота Cassie [4] запропонувала рівняння для опису зміни провідності дуги – підхід, який, попри свою давність, досі використовується як основа. Golestani та Samet [5] пішли далі й поєднали модель Кассі з моделлю Майра в єдину гібридну конструкцію, яка точніше відтворює поведінку дуги як у сталих, так і в перехідних режимах. Практичне застосування цих ідей знайшло відображення у роботі Blažič, Škrjanc та Logar [6]: автори побудували трифазну

модель ДСП і запропонували індекс якості дуги – числовий показник її стабільності, що обчислюється в реальному часі за електричними вимірюваннями.

Щодо безпосередньо керування електродами, тут картина неоднорідна. Balan, Hancu та Luru [7] розробили методи адаптивного керування, які враховують нелінійність об'єкта – зміну характеристик шихти в ході плавки. Wang, Mao, Tian, Li та Yuan [8] переконливо показали переваги імпедансного регулювання: підтримання заданого співвідношення напруги до струму дуги дає стабільніший результат, ніж регулювання за окремими електричними величинами. Logar та Škrjanc [9] підійшли до питання з боку енергетики – їх цікавило, як налаштування регулятора впливає не лише на процес плавки, але й на електромагнітну сумісність із живильною мережею. Математичну базу для формалізації всіх цих задач заклали ще Billings, Boland та Nicholson [10] – їх підхід до побудови моделі об'єкта і вибору структури регулятора залишається актуальним і в сучасних системах автоматизації.

Нарешті, Boulet, Lalli та Ajersch [11] зосередились на тому, що нерідко лишається поза увагою теоретиків – на практичній реалізації алгоритмів керування. І тут виявляється характерна прогалина: переважна більшість публікацій або обмежується теоретичним аналізом, або прив'язана до спеціалізованих середовищ на кшталт MATLAB/Simulink, що суттєво ускладнює перенесення розроблених рішень у реальні промислові системи.

Саме цим і пояснюється постановка завдання в даній роботі: розробити програмну реалізацію імпедансного PI-регулятора засобами універсальної мови програмування Go – такої, що одразу придатна для інтеграції у виробниче середовище без прив'язки до дорогих чи вузькоспеціалізованих платформ.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є розробка та програмна реалізація імпедансного PI-регулятора системи керування переміщенням електродів дугової сталеплавильної печі з використанням мови програмування Go. У межах роботи передбачається використання математичної моделі як основи для формування алгоритму керування, спрямованого на стабілізацію імпедансу дуги з урахуванням динаміки електричної дуги та особливостей електромеханічної системи.

Особлива увага приділяється дослідженню впливу параметрів ПІ-регулятора на динамічні характеристики системи, зокрема точність регулювання, швидкодію та наявність статичної похибки. У процесі дослідження передбачається проведення чисельних експериментів, отримання часових залежностей основних параметрів системи та їх подальший аналіз.

Досягнення поставленої мети має забезпечити обґрунтування ефективності використання мови Go для реалізації алгоритмів керування та створення програмних засобів, придатних для інтеграції в системи автоматизації та побудови цифрових двійників дугових сталеплавильних печей.

Виклад основного матеріалу. У даному дослідженні розглядається задача побудови алгоритму керування переміщенням електродів дугової сталеплавильної печі (ДСП) на основі імпедансного принципу. Основною метою керування є забезпечення стабільного режиму горіння електричної дуги шляхом підтримання заданого значення її повного опору, що є одним із ключових факторів ефективності процесу плавлення сталі [1], [2].

Імпеданс дуги є узагальненим параметром, що враховує як напругу, так і струм, і визначається співвідношенням:

$$Z(t) = \frac{U(t)}{I(t)} \quad (1)$$

де $U(t)$ – напруга дуги, $I(t)$ – струм дуги.

Застосування імпедансного підходу до керування дозволяє більш точно враховувати фізичний стан електричної дуги порівняно з методами, що базуються лише на окремих електричних параметрах. Як показано в роботах [8], [12], підтримання стабільного імпедансу забезпечує підвищення енергоефективності процесу та зниження коливань електричних параметрів.

У системі керування задається еталонне значення імпедансу Z_{set} , яке відповідає оптимальному технологічному режиму роботи печі. Задача керування полягає у формуванні такого сигналу впливу на електрогідравлічний привід переміщення електродів, який забезпечує мінімізацію відхилення поточного значення імпедансу від заданого.

Таким чином, система керування реалізує замкнений контур регулювання, в якому параметри електричної дуги безпосередньо впливають на положення електродів і, відповідно, на довжину дуги. Взаємозв'язок між електричними та механічними параметрами системи визначає складність задачі керування та потребує застосування ефективних алгоритмів регулювання [3], [7].

Ключовим елементом системи автоматичного керування є формування сигналу похибки, який визначає різницю між заданим і поточним значенням регульованої величини. У випадку імпедансного регулювання похибка визначається як:

$$e(t) = Z_{set} - Z(t) \quad (2)$$

де Z_{set} – задане значення імпедансу, $Z(t)$ – поточне значення імпедансу дуги.

Сигнал похибки відображає ступінь відхилення режиму роботи печі від оптимального та є основою для формування керуючого впливу. Як показано у дослідженнях динаміки електричної дуги [4], [5], навіть незначні відхилення імпедансу можуть призводити до суттєвих змін електричних параметрів процесу, що підкреслює важливість точного формування сигналу похибки.

При позитивному значенні похибки фактичний імпеданс менший за заданий, що відповідає зменшенню довжини дуги та потребує підйому електрода. При від'ємному значенні похибки, навпаки, імпеданс перевищує задане значення, що вимагає опускання електрода для відновлення робочого режиму. Така інтерпретація сигналу похибки узгоджується з принципами імпедансного керування електродами, наведеними у роботах [8], [9].

Таким чином, сигнал похибки безпосередньо визначає напрямок і інтенсивність керуючого впливу на електромеханічну систему. Його коректне формування є критично важливим для забезпечення стійкості та швидкодії системи керування, особливо з урахуванням нелінійного та нестационарного характеру електричної дуги [2], [6].

Для забезпечення стабілізації імпедансу електричної дуги у роботі використано пропорційно-інтегральний (PI) закон керування, який є одним із найбільш поширених у системах автоматичного регулювання технологічних

процесів та широко застосовується у задачах керування дуговими сталеплавильними печами [10].

Керуючий сигнал формується на основі поточного значення похибки та її інтегральної складової за наступним співвідношенням:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційної складової, K_i – коефіцієнт інтегральної складової, $e(\tau)$ – сигнал похибки регулювання.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну режиму роботи дуги, формуючи керуючий вплив, пропорційний величині відхилення. Інтегральна складова, у свою чергу, виконує накопичення похибки у часі та дозволяє усунути статичну похибку регулювання, що є особливо важливим для забезпечення точного підтримання заданого імпедансу [8].

Використання саме PI-регулятора обумовлено компромісом між складністю реалізації та ефективністю керування. Додавання диференціальної складової у даному випадку є недоцільним через високу чутливість до шумів вимірювання струму та напруги, а також до швидкоплинних флуктуацій електричної дуги, що підтверджується дослідженнями динаміки дуги [4], [5].

З урахуванням фізичних обмежень системи керування, інтегральна складова регулятора обмежується в допустимих межах:

$$I_{min} \leq I(t) \leq I_{max} \quad (4)$$

що дозволяє уникнути ефекту накопичення інтегратора (integral windup) та забезпечити стабільну роботу регулятора при значних відхиленнях від заданого режиму.

Таким чином, сформований PI-регулятор забезпечує необхідну швидкодію, стійкість та точність системи керування електродами дугової сталеплавильної печі, що узгоджується з сучасними підходами до автоматизації електротехнологічних процесів [7], [9].

Оскільки програмна реалізація системи керування виконується у цифровому середовищі, безперервний закон PI-регулювання потребує переходу до дискретної форми. Такий підхід широко застосовується при

реалізації систем керування у програмному середовищі та відповідає сучасним методам чисельного моделювання [11].

Інтегральна складова регулятора у дискретному вигляді обчислюється за рекурентною формулою:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \cdot dt \quad (5)$$

де I_k – поточне значення інтегральної складової, e_k – значення похибки на кроці k , dt – крок дискретизації.

Відповідно, керуючий сигнал визначається як:

$$u_k = K_p e_k + K_i I_k \quad (6)$$

Така форма запису дозволяє ефективно реалізувати алгоритм регулювання у програмному коді з використанням простих обчислювальних операцій.

Вибір кроку дискретизації dt є важливим фактором, що впливає на точність і стійкість моделювання. Занадто великий крок може призвести до втрати точності та виникнення чисельної нестійкості, тоді як надто малий крок збільшує обчислювальні витрати. У задачах моделювання електродугових печей це питання розглядається у сучасних роботах, присвячених чисельним методам моделювання [2], [3].

Дискретна форма РІ-регулятора добре узгоджується з модульною архітектурою програмної реалізації та дозволяє інтегрувати алгоритм у загальний цикл моделювання, де на кожному кроці виконується обчислення похибки, оновлення інтегральної складової та формування керуючого впливу.

Таким чином, перехід до дискретної форми забезпечує можливість ефективної програмної реалізації алгоритму регулювання та створює основу для подальшої інтеграції системи керування у цифрові платформи, що відповідає сучасним тенденціям розвитку систем автоматизації [6].

Програмна реалізація алгоритму імпедансного РІ-регулювання виконана з використанням мови програмування Go, що дозволяє створювати ефективні та масштабовані обчислювальні системи. На відміну від спеціалізованих середовищ моделювання, таких як MATLAB/Simulink, використання універсальної мови програмування забезпечує більшу гнучкість, можливість інтеграції у промислові системи та підвищену продуктивність обчислень.

Архітектура програмної системи побудована за модульним принципом і включає окремі компоненти, що відповідають за:

- обчислення електричних параметрів дуги;
- реалізацію алгоритму регулювання;
- чисельне інтегрування;
- збереження та візуалізацію результатів моделювання.

Центральним елементом системи є модуль PI-регулятора, який реалізовано у вигляді окремої структури даних:

```
type PIController struct {
```

```
    Kp float64
```

```
    Ki float64
```

```
    I float64
```

```
    Imin float64
```

```
    Imax float64
```

```
}
```

У процесі моделювання на кожному кроці часу виконується обчислення сигналу похибки, оновлення інтегральної складової та формування керуючого сигналу. Алгоритм реалізації PI-регулятора має наступний вигляд:

```
func (c *PIController) Update(e float64, dt float64) float64 {
```

```
    c.I += e * dt
```

```
    if c.I > c.Imax {
```

```
        c.I = c.Imax
```

```
    }
```

```
    if c.I < c.Imin {
```

```
        c.I = c.Imin
```

```
    }
```

```
    u := c.Kp*e + c.Ki*c.I
```

```
    return u
```

```
}
```

Застосування обмеження інтегральної складової дозволяє уникнути ефекту перенасичення (integral windup), що особливо важливо при значних відхиленнях імпедансу на початкових етапах роботи системи.

Використання мови Go забезпечує ряд переваг:

- високу швидкість виконання обчислень;
- ефективне управління пам'яттю;
- простоту реалізації модульної архітектури;
- можливість подальшої інтеграції у системи реального часу.

Таким чином, запропонована програмна реалізація дозволяє створити універсальний інструмент для моделювання та дослідження систем керування дуговими сталеплавильними печами.

Чисельне моделювання роботи системи керування виконується у вигляді ітераційного процесу з фіксованим кроком дискретизації dt . На кожному кроці моделювання здійснюється послідовне обчислення параметрів системи, що дозволяє відтворити її динамічну поведінку у часі.

Загальна структура обчислювального циклу включає такі етапи:

1. обчислення миттєвих значень напруги та струму дуги;
2. визначення поточного значення імпедансу;
3. обчислення сигналу похибки;
4. формування керуючого сигналу за допомогою PI-регулятора;
5. оновлення положення електрода.

У спрощеному вигляді цикл моделювання може бути представлений наступним чином:

```
for  $t := 0.0; t < T; t += dt$  {  
   $Z := U / I$   
   $e := Z_{set} - Z$   
   $u := controller.Update(e, dt)$   
   $electrodePosition += u * dt$   
}
```

Наведений фрагмент коду ілюструє базовий принцип чисельної реалізації замкненої системи керування, у якій на кожному кроці часу здійснюється обчислення поточного значення імпедансу, формування похибки регулювання та визначення керуючого впливу. Такий підхід відповідає класичній схемі дискретного керування зі зворотним зв'язком і дозволяє адаптувати модель до програмної реалізації у середовищах реального часу.

Крок дискретизації dt обирається з урахуванням характерних часових параметрів процесу. Він повинен бути достатньо малим для коректного відтворення динаміки системи, але при цьому не призводити до надмірного збільшення обчислювальних витрат. Занадто великий крок може спричинити втрату точності або навіть нестійкість чисельного розв'язку, тоді як надто малий – суттєво збільшує час обчислень. У проведених дослідженнях значення

dt обирається експериментально та забезпечує компроміс між точністю та швидкодією моделювання.

Додатково слід зазначити, що вибір кроку дискретизації безпосередньо впливає на якість відтворення перехідних процесів, зокрема швидкість реакції системи та амплітуду коливань. У системах керування електродуговими печами, де характерні швидкі зміни струму та напруги, це має особливе значення.

Особливістю реалізації є синхронізація роботи всіх модулів у межах єдиного обчислювального циклу, що дозволяє забезпечити узгодженість між електричною та механічною підсистемами. Такий підхід забезпечує коректне відображення взаємодії між процесами різної фізичної природи та відповідає сучасним принципам побудови імітаційних моделей складних технічних систем [2], [3].

Для подальшого аналізу результатів моделювання у програмі передбачено збереження основних параметрів системи у файл формату CSV. Такий підхід забезпечує можливість подальшої обробки даних, побудови графіків та повторного аналізу отриманих результатів без повторного запуску моделі.

```
import (  
    "encoding/csv"  
    "fmt"  
)  
type SimulationResult struct {  
    Time float64  
    Z float64  
    Zset float64  
    Err float64  
    Control float64  
    Prop float64  
    Integ float64  
}  
func saveResult(w *csv.Writer, r SimulationResult) {  
    w.Write([]string{  
        fmt.Sprintf("%.6f", r.Time),  
        fmt.Sprintf("%.6f", r.Z),  
        fmt.Sprintf("%.6f", r.Zset),  
        fmt.Sprintf("%.6f", r.Err),  
        fmt.Sprintf("%.6f", r.Control),  
    })  
}
```

```
    fmt.Sprintf("%.6f", r.Prop),  
    fmt.Sprintf("%.6f", r.Integ),  
  })  
}
```

Наведений фрагмент демонструє принцип формування структурованого набору даних, який містить час моделювання, фактичне та задане значення імпедансу, похибку регулювання, керуючий сигнал, а також пропорційну та інтегральну складові регулятора. Збереження результатів у табличному форматі, що забезпечує розділення етапів обчислення та візуалізації результатів і підвищує відтворюваність дослідження та спрощує перевірку отриманих результатів.

У результаті виконання моделювання сформовано набір часових залежностей основних параметрів системи, зокрема імпедансу дуги $Z(t)$, сигналу керування $u(t)$, та похибки регулювання $e(t)$. Це дозволяє здійснити комплексний аналіз динамічних властивостей системи керування та оцінити ефективність запропонованого алгоритму.

Для оцінки ефективності імпедансного PI-регулятора проведено чисельне моделювання системи керування переміщенням електродів дугової сталеплавильної печі. У ході моделювання отримано часові залежності імпедансу дуги, сигналу похибки, керуючого впливу, а також пропорційної та інтегральної складових регулятора.

На рис. 1 представлено зміну імпедансу дуги у часі. Аналіз отриманої залежності показує, що система забезпечує вихід регульованої величини на заданий рівень протягом короткого перехідного процесу тривалістю приблизно 0.15-0.2 с. На початковому етапі спостерігається відхилення імпедансу, зумовлене початковими умовами та накопиченням інтегральної складової регулятора.

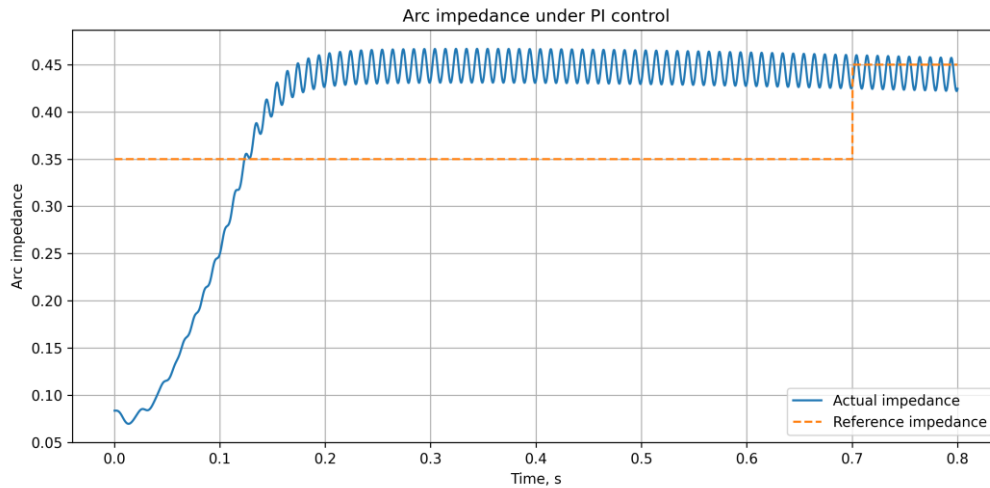


Рисунок 1 – Часова залежність фактичного та заданого імпедансу дуги при роботі PI-регулятора

Після завершення перехідного процесу імпеданс стабілізується поблизу заданого значення $Z(t)$. Відносна амплітуда коливань у стаціонарному режимі не перевищує 3-5% від номінального значення, що свідчить про достатній рівень демпфування та стійкість системи.

На рисунку 2 наведено часову залежність похибки регулювання. Максимальне значення похибки спостерігається на початковому етапі, після чого вона швидко зменшується та наближається до нуля. У стаціонарному режимі залишкова похибка не перевищує 2-3%, що підтверджує ефективність інтегральної складової регулятора у компенсації статичних відхилень.

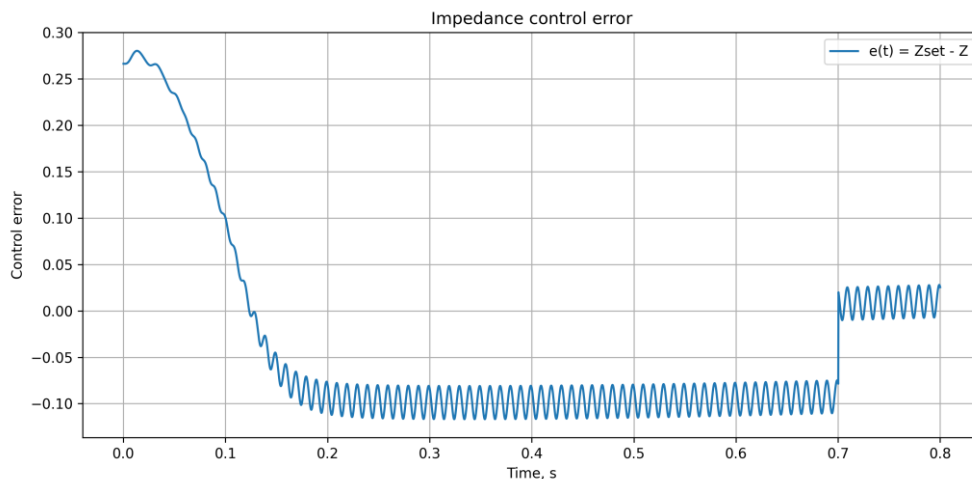


Рисунок 2 – Часова залежність похибки регулювання

На рисунку 3 представлено зміну керуючого сигналу. На початковому етапі спостерігається значний рівень керуючого впливу, що відповідає великій величині похибки. Надалі сигнал плавно змінюється та стабілізується без різких стрибків, що є важливим для запобігання перевантаженню виконавчих механізмів системи переміщення електродів.

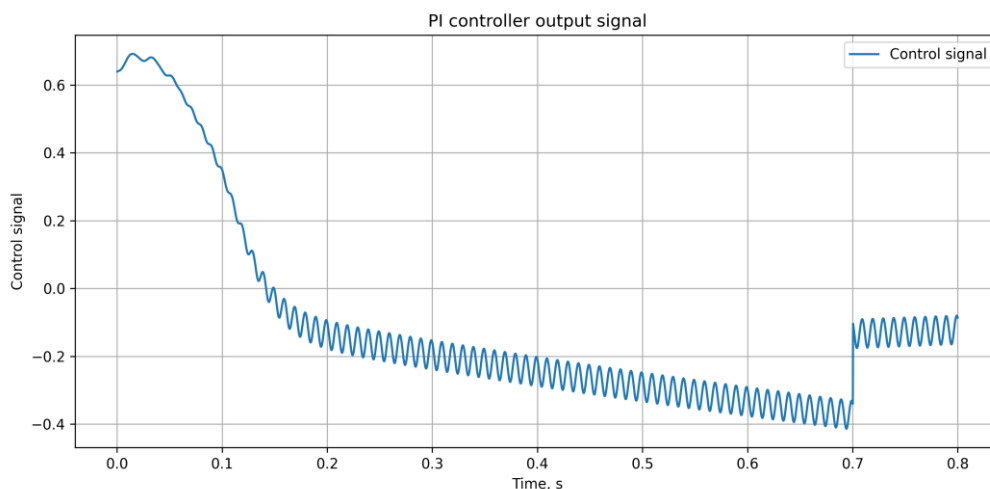


Рисунок 3 – Часова залежність керуючого сигналу PI-регулятора

На рисунку 4 наведено пропорційну та інтегральну складові сигналу керування. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну похибки, тоді як інтегральна складова поступово накопичується та відіграє ключову роль у забезпеченні нульової статичної похибки. Використання обмеження інтегратора дозволяє уникнути його надмірного зростання та запобігає виникненню нестійких режимів.

Обмеження інтегральної складової дозволяє уникнути її надмірного зростання та запобігає виникненню нестійкості.

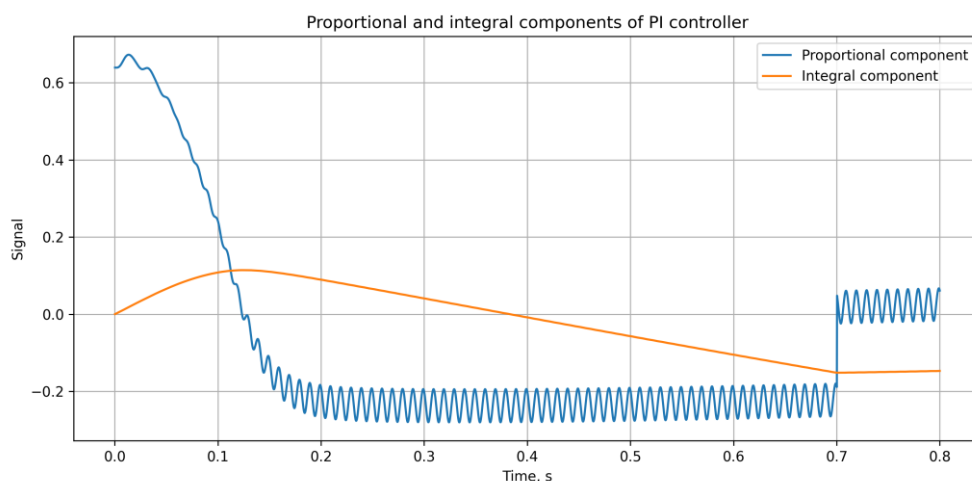


Рисунок 4 – Пропорційна та інтегральна складові сигналу керування

Сучасні підходи до обробки та візуалізації даних у наукових дослідженнях широко базуються на використанні відкритих програмних бібліотек, що інтегруються з мовами загального призначення [13]. Це забезпечує гнучкість у побудові графіків, можливість автоматизації обчислень і адаптації програмних рішень до задач інженерного моделювання.

Для візуалізації результатів моделювання використано засоби побудови графіків на основі мови програмування Python із застосуванням бібліотеки Matplotlib, яка широко використовується у задачах наукових обчислень та аналізу даних. Використання такого підходу дозволяє автоматизувати обробку результатів моделювання та формувати часові залежності параметрів системи. Це підвищує інформативність отриманих результатів, спрощує їх інтерпретацію та забезпечує відтворюваність проведених досліджень [12], [13].

Узагальнюючи результати моделювання, можна зробити висновок, що запропонований PI-регулятор забезпечує:

- стійку роботу системи керування;
- швидкий вихід на заданий режим (до 0.2 с);
- низький рівень статичної похибки (до 3%);
- плавний характер керуючого впливу без перевантаження виконавчих механізмів.

Отримані результати узгоджуються з відомими підходами до керування дуговими сталеплавильними печами [8], [9] та підтверджують ефективність використання імпедансного принципу регулювання.

Разом з тим слід зазначити, що розроблена модель містить певні спрощення, зокрема не враховує випадкові збурення, шум вимірювання та змінність параметрів дуги у часі. Це може впливати на точність відтворення реальних умов експлуатації. Подальші дослідження доцільно спрямувати на ускладнення моделі та врахування стохастичних факторів, що дозволить підвищити її адекватність реальним технологічним процесам.

Висновки. Виконана робота вирішує конкретну інженерну задачу: створити працездатну програмну реалізацію імпедансного PI-регулятора для системи керування електродами ДСП таку, що не потребує спеціалізованих середовищ і може бути безпосередньо інтегрована у промислове програмне забезпечення.

Вибір імпедансного принципу регулювання не випадковий. Аналіз існуючих підходів [8, 9] показав, що підтримання заданого співвідношення напруги і струму дуги забезпечує стійкішу роботу печі, ніж регулювання за окремими електричними величинами, – особливо в умовах різких змін властивостей шихти на початку плавки.

Розроблена математична модель враховує взаємозв'язок електричних і механічних параметрів системи. Алгоритм PI-регулювання реалізовано мовою Go у вигляді модульної структури з окремими компонентами для розрахунку керуючого сигналу, виконання циклу симуляції та збереження результатів. Така архітектура дозволяє змінювати параметри регулятора без переписування решти коду, що важливо як для налагодження, так і для подальшої адаптації до реальних умов експлуатації.

Результати чисельного моделювання підтвердили працездатність підходу: система виходить на заданий імпеданс за 0,15-0,2 с, перерегулювання залишається в допустимих межах, а статична похибка не перевищує 2-3%. Не менш важливою виявилася плавність керуючого сигналу – різкі зміни напруги на приводі електрода неприпустимі з точки зору механічного ресурсу конструкції, і запропонований алгоритм цю умову виконує.

Залишкова статична похибка є очікуваним наслідком спрощень у моделі дуги, а не вадой регулятора. Її усунення – завдання наступного етапу, де доцільно розглянути адаптивне коригування коефіцієнтів залежно від

поточного режиму роботи печі та ввести компенсацію випадкових збурень і шумів вимірювання.

Отримані результати мають практичну цінність для розробників цифрових систем керування ДСП, а запропонований підхід до програмної реалізації може бути використаний і ширше – зокрема при створенні цифрових двійників електротехнологічних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Fruehan, R. J. (1998). *The making, shaping and treating of steel* (11th ed.). AISE Steel Foundation.
2. Hay, T., Visuri, V.-V., Aula, M., & Echterhof, T. (2021). A review of mathematical process models for the electric arc furnace process. *Steel Research International*, 92(1), 2000395. <https://doi.org/10.1002/srin.202000395>
3. Abadi, M., Tang, L., & Rashidi, M. (2024). A review of simulation and numerical modeling of electric arc furnaces. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102473>
4. Cassie, A. M. (1939). Arc rupture and circuit severity: A new theory. *CIGRE Report*, (102), 1–14.
5. Golestani, S., & Samet, H. (2016). Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace models. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(13), 3364–3373. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0141>
6. Blažič, B., Škrjanc, I., & Logar, V. (2024). Arc quality index based on three-phase Cassie–Mayr electric arc furnace model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3352119>
7. Balan, R., Hancu, O., & Lupu, C. (2008). Adaptive control of electric arc furnace. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)* (pp. 19–24).
8. Wang, Z., Mao, J., Tian, X., Li, J., & Yuan, P. (2020). Impedance regulation based electrode control system for electric arc furnace. *ISIJ International*, 60(5), 982–990. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-459>
9. Logar, V., & Škrjanc, I. (2012). Modeling and control of electric arc furnace using a neural network approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(3), 1630–1637. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161655>
10. Billings, S. A., Boland, F. M., & Nicholson, H. (1979). Electric arc furnace modeling, simulation and control. *IEE Proceedings – Control Theory and Applications*, 126(6), 567–574. <https://doi.org/10.1049/piee.1979.0126>
11. Boulet, B., Lalli, G., & Ajersch, M. (2003). Modeling and control of an electric arc furnace. In *Proceedings of the American Control Conference (ACC)* (Vol. 5, pp. 3862–3867).
12. Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
13. Oliphant, T. E. (2007). Python for scientific computing. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 10–20. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.58>
14. Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID controllers: Theory, design, and tuning* (2nd ed.). ISA.
15. Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
16. Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2016). *Modern control systems* (13th ed.). Pearson.
17. Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2015). *Feedback control of dynamic systems* (7th ed.). Pearson.

18. Donovan, A. A., & Kernighan, B. W. (2015). *The Go programming language*. Addison-Wesley.
19. Pike, R. (2012). Go at Google: Language design in the service of software engineering. In *Proceedings of the ACM Conference*. <https://doi.org/10.1145/2384716.2384720>
20. Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 reference manual*. CreateSpace.

Received 15.03.2025.

Accepted 10.04.2025.

Published 30.04.2026

UDC 621.365:681.5

Dmytro Kartamyshev

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF AN IMPEDANCE PI CONTROLLER FOR AN ELECTRIC ARC FURNACE CONTROL SYSTEM USING THE GO PROGRAMMING LANGUAGE

Abstract. *Electrode control in electric arc furnace (EAF) operation represents one of the most technically demanding problems in steelmaking. The inherently unstable behaviour of the electric arc – its sensitivity to scrap composition, inter-electrode gap geometry, and thermal conditions – results in current and voltage fluctuations, increased specific energy consumption, and accelerated electrode wear. Despite a considerable body of research on mathematical modelling and controller design for EAFs, most published work relies on specialised software environments such as MATLAB/Simulink and does not address the direct deployment of control algorithms in industrial automation systems. The question of implementing control logic using general-purpose programming languages suitable for production environments remains insufficiently explored.*

The objective of this work is to develop an impedance-based PI control algorithm for the EAF electrode positioning system and to implement it in the Go programming language, followed by analysis of the closed-loop system's dynamic behaviour.

The mathematical model is based on the Cassie-Mayr arc equations, which describe arc conductance dynamics under both transient and steady-state conditions. The controller is implemented in discrete time with a fixed integration step to ensure numerical stability. An anti-windup mechanism – clamping the accumulated error sum within defined bounds – is applied to prevent integrator saturation under control signal constraints. The software is structured as a modular Go application comprising dedicated components for control signal computation, simulation loop execution, and CSV-based result logging. The choice of Go is justified by its practical advantages for industrial automation: compilation to native executable code, absence of runtime dependencies, support for modular architecture, and high computational performance. Simulation

results are visualised using Python/Matplotlib, ensuring reproducibility and clarity of the obtained data.

Numerical simulation results show that the developed system achieves a stable transient response with a settling time of 0.15-0.2 s and overshoot within acceptable limits. A residual steady-state error of 2-3% is attributed to simplifications in the adopted arc model and can be reduced by introducing adaptive gain correction. The smooth control signal profile, free from abrupt changes, confirms the algorithm's suitability for real-world application with respect to mechanical loading on the electrode drive. The findings demonstrate the viability of Go as an implementation language for control algorithms within digital EAF automation systems, as well as for the development of digital twins of electrotechnological processes.

Keywords: *electric arc furnace, impedance control, PI controller, mathematical modeling, electric arc, Go programming language, control system, automation*

Картамишев Дмитро Олександрович – к.т.н., асистент кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3240-8919>

Dmytro Kartamyshev – candidate of engineering sciences, assistant lecturer of the department of automation of production processes, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk – Ternopil – Khust, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3240-8919>

КІНЕТИКА ДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ БОРОМ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ У8

Анотація. У роботі досліджено вплив режимів порошкового борування – температури (850, 900, 950°C) та витримки (4, 6, 8 год) – на товщину, будову та мікротвердість дифузійного шару на інструментальній сталі У8. Встановлено, що кінетика формування шару задовільно описується параболічним законом, характерним для дифузійно-керованих процесів. Розраховано коефіцієнти дифузії бору при кожній температурі; визначено кінетичні параметри дифузії бору: енергію активації $Q = 199,6$ кДж/моль та передекспоненційний множник $D_0 = 9,24 \times 10^{-4}$ м²/с. Мікроскопічний аналіз виявив зубчастий рельєф міжфазної границі, який покращує зчеплення дифузійного шару з основою. Дисперсійний аналіз (ANOVA) підтвердив, що температурний режим є пріоритетним чинником, котрий визначає товщину шару ($\eta^2 = 0,9897$ проти 0,8964 для часу витримки). На базі методу поверхні відгуку побудовано поліноміальну регресійну модель другого ступеня ($R^2_{adj} = 0,9886$), придатну для розрахунку режимів борування без додаткових досліджень. Результати розширюють уявлення про механізм дифузії бору та закладають кількісну основу для проектування режимів зміцнення деталей зі сталі У8.

Ключові слова: борування, боридний шар, кінетика росту мікроструктура, мікротвердість, регресійна модель, дисперсійний аналіз.

Постановка проблеми. Сталь У8 широко застосовується у виробництві різальних та вимірювальних інструментів, деревообробного оснащення й дрібних штамтів. Умови її експлуатації передбачають контакт з абразивними середовищами та циклічні навантаження, що прискорюють спрацювання робочих поверхонь і скорочують експлуатаційний ресурс виробів. Підвищення

якого залишається актуальним технічним завданням у інструментальному виробництві.

Одним із перспективних шляхів подолання цієї проблеми є використання технологій хіміко-термічної обробки, що забезпечують радикальне зміцнення поверхні зі збереженням пластичності внутрішніх шарів матеріалу. Окреме місце серед них займає борування, здатне формувати боридні шари (FeB , Fe_2B) із твердістю, що сягає 20 ГПа. На відміну від азотування та цементації, боридні покриття відрізняються стійкістю до окиснення при підвищених температурах, а також корозійною стійкістю в кислих середовищах і розплавах кольорових металів [1-4]. Для сталі У8 борування відкриває шлях до суттєвого збільшення довговічності при відносно невисокій собівартості обробки.

Попри наявність загальних відомостей про механізм насичення бором, для конкретної марки У8 бракує перевірених кінетичних параметрів, а також практичного інструменту для розрахунку товщини шару залежно від температури й часу обробки.

Отже, вирішення даної проблеми потребує комплексного експериментального вивчення та подальшої ґрунтовної інтерпретації отриманих результатів з метою формування кількісної бази для процесу борування сталі У8.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі борування сталей накопичено значний масив досліджень, однак акцент переважно зроблено на легованих і швидкорізальних марках сталі. Роботи, присвячені вуглецевим інструментальним сталям класу У8, нечисленні, що й зумовлює необхідність окремого вивчення.

Базовою моделлю для аналізу швидкості росту дифузійних шарів є параболічна залежність товщини від часу, що впливає з другого закону Фіка. Відповідність зазначеної моделі реальним процесам доведена значною кількістю наукових праць стосовно різних матеріалів. Температурна залежність коефіцієнта дифузії традиційно описується за допомогою відомого рівняння Арреніуса. Наприклад, в роботах [5; 6] досліджували кінетику на сталях AISI H13 та AISI P20 відповідно. Числові значення енергії активації (Q) суттєво можуть відрізнятися залежно від хімічного складу матеріалу, умов дифузійного насичення: наприклад, для армко-заліза характерне значення ~ 157 кДж/моль

[7], а для сталі AISI W110 – 165,0 кДж/моль [1], що відображає характерну залежність – із збільшенням частки домішкових включень дифузійний бар'єр закономірно зростає.

За даними робіт [8, 9], температура чинить на товщину дифузійного шару значно потужніший вплив, ніж тривалість процесу, хоча кількісне співвідношення цих ефектів є індивідуальним для кожної марки сталі. Щодо морфології покриття, встановлено [10, 11], що на вуглецевих сталях формується зубчаста границя розділу боридного шару й металевої основи, яка обумовлена кристалографічною анізотропією дифузії; подібна геометрія підвищує адгезійну міцність з'єднання.

Для оптимізації та систематизації результатів у матеріалознавчих дослідженнях дедалі ширше застосовуються методи планованого експерименту й статистичного моделювання. Так, в [12] регресійний аналіз використовувався для моделювання та визначення товщини шару, що утворюється в процесі борування на ковкому чавуні, а в [13] методологія поверхні відгуку застосована для оптимізації твердості покриттів на кобальт-хромовому сплаві. Ці підходи дозволяють отримати компактні аналітичні моделі на основі відносно невеликого числа дослідів.

Незважаючи на наявність загальних уявлень про закономірності процесу борування, стосовно сталі У8 досі бракує систематизованої сукупності даних, яка б інтегрувала результати планованого експерименту, кінетичний аналіз із розрахунком енергії активації Q та передекспоненційного множника D_0 , статистичну оцінку внеску технологічних факторів та побудову прикладної регресійної моделі для прогнозування товщини шару.

Формулювання мети дослідження. Метою цієї роботи є кількісне охарактеризування закономірностей порошкового борування сталі У8: визначення кінетичних параметри дифузії бору, встановлення відносного внеску температури й тривалості насичення в товщину покриття, а також побудування прогностичної математичної моделі для інженерних розрахунків.

Методика досліджень. Матеріалом дослідження закономірностей росту боридних шарів слугувала високовуглецева сталь У8, склад якої за хімічними елементами відображено в таблиці 1. Невисокий рівень легування дозволяє

спостерігати дифузію бору у відносно чистому вигляді, без ускладнень, зумовлених присутністю карбідо- та нітридоутворюючих елементів.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі У8

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Вміст, %	0,75–0,84	0,17–0,33	0,17–0,33	≤ 0,030	≤ 0,028	≤ 0,20	≤ 0,25	≤ 0,25

Борування проводили в герметичних сталевих контейнерах у порошковій суміші наступного складу:



де B_4C – карбід бору (донор бору); KBF_4 – газоутворюючий активатор, що підвищує парціальний тиск бору біля поверхні металу [14]; Al_2O_3 – інертний наповнювач, котрий перешкоджає спіканню суміші та стабілізує її склад. Вибір складу насичуючої суміші обґрунтований даними літератури та власними попередніми дослідженнями.

Насичення здійснювали за трьома температурами – 850, 900, 950°C та трьома витримками – 4, 6, 8 год.

Металографічні дослідження проводили на компактному інвертованому мікроскопі ZEISS Axio Vert.A1, оснащеному цифровою камерою. За металографічними знімками визначали товщину боридного шару методом середньої лінії, що є типовим підходом при аналізі шарів з нерегулярною морфологічною структурою.

Для визначення мікротвердості використовували прилад ПМТ-3 при навантаженнях 10–200 г, витримка під навантаженням 7–10 с.

Для математичного опису швидкості росту боридного шару було застосовано параболічний закон, який є характерним для процесів, що перебувають під контролем об'ємної дифузії [1, 6, 8]:

$$d^2 = D \cdot t \quad (2)$$

де d – товщина дифузійного шару (м),

D – коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$),

t – час насичення (с).

Отже, товщина дифузійного шару перебуває у лінійному співвідношенні з квадратним коренем із тривалості процесу:

$$d = \sqrt{D} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Температурну залежність коефіцієнта дифузії D описують рівнянням Арреніуса [1, 6, 8]:

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (4)$$

де D_0 – передекспоненційний множник (коефіцієнт частоти), що залежить насамперед від типу кристалічної будови матеріалу, а також від таких параметрів, як величина атомного стрибка та власна частота коливань атома-дифузанта, $\text{м}^2/\text{с}$;

R - універсальна газова стала, Дж/(моль·К);

Q - енергія активації (теплота дифузії), (кДж/моль).

Після логарифмування рівняння (4) воно набуває лінійного вигляду:

$$\ln D = \ln D_0 - \left(\frac{Q}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

Отже, побудова графіка $\ln D - 1/T$ дозволяє графічно визначити Q за кутом нахилу апроксимуючої прямої та встановити $\ln D_0$ як значення у точці її перетину з віссю ординат.

Статистичний аналіз даних виконували у середовищі TIBCO Statistica. Вплив температури та тривалості насичення на товщину дифузійного шару оцінювали шляхом проведення дисперсійного аналізу (ANOVA) з використанням F-критерію та р-значення для перевірки значущості ефектів.

Практична значущість кожного досліджуваного фактора додатково характеризувалась величиною часткового ета-квадрата (η^2) – показника, що відображає відносний внесок окремого чинника у пояснення загальної мінливості залежної змінної.

З метою прогнозування товщини шару використовували регресійний аналіз у рамках методології поверхні відгуку (Response Surface Methodology). Модель враховувала вплив двох незалежних змінних, їх квадратичні ефекти та взаємодію між факторами. Ступінь відповідності моделі експериментальним даним визначали за скоригованим коефіцієнтом детермінації (R^2_{adj}).

Викладення основного матеріалу дослідження. Металографічний аналіз виявив, що борування сталі У8 у порошкових сумішах у температурному діапазоні 850–950°C супроводжується формуванням добре вираженого боридного шару (рис. 1). На всіх досліджуваних зразках боридна зона характеризується типовою зубчастою морфологією. Зі зростанням температури та тривалості насичення відбувається трансформація тонкоголчастої форми боридів у більш компактну пластинчасту структуру, що є закономірним для процесів тривалого дифузійного насичення. Варто відзначити, що максимальну довжину набувають голки, локалізовані вздовж границь зерен, що свідчить про пришвидшену зернограничну дифузію бору.

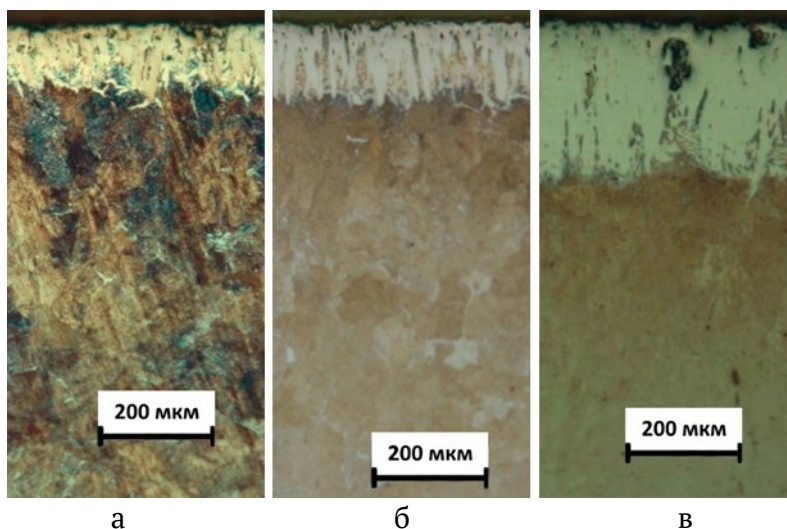


Рисунок 1 – Характер мікроструктури боридного шару, сформованого на сталі У8 при боруванні: а) 850 °С, 4 год; б) 850 °С, 8 год; в) 950 °С, 4 год.

Зубчаста геометрія міжфазної границі виконує роль механічного замка: взаємне проникнення виступів боридного шару й матриці підвищує опір розшаруванню при дотичних навантаженнях – так званий ефект «ластівчиного хвоста» [10; 11].

Безпосередньо під боридною зоною фіксується перехідна область із підвищеним вмістом цементиту відносно структури серцевини. Ця особливість пояснюється перерозподілом вуглецю під час борування: атоми вуглецю витісняються бором з приповерхневого шару вглиб металу, де й виділяються при охолодженні у вигляді додаткового цементиту.

Зведені дані щодо середньої товщини боридного шару, сформованого на сталі У8 за різних режимів насичення, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Узагальнені дані щодо товщини боридних шарів, одержаних на сталі У8, мкм

Температура борування, °С	Час борування, год		
	4	6	8
850	85	102	113
900	140	161	182
950	207	253	261

З таблиці видно, що підвищення температури від 850 до 950°С збільшує товщину шару більш як удвічі при однаковій витримці (наприклад, за 4 год: 85 → 207 мкм). Вплив часу насичення є менш виразним і набуває нелінійного характеру при тривалих витримках: так, при 950°С приріст товщини при збільшенні часу від 4 до 6 год складає ~46 мкм, при збільшенні часу від 6 до 8 год – лише ~8 мкм. Імовірною причиною такого нелінійного характеру може бути поступове збіднення насичуючої суміші та гальмування дифузії вуглецем, що накопичується в приповерхневій зоні.

Побудовані у координатах $d - \sqrt{t}$ графіки для трьох температур борування (рис. 2а) засвідчили стійку лінійну залежність в усьому досліджуваному діапазоні, що є переконливим підтвердженням параболічного закону росту боридного шару та визначальної ролі об'ємної дифузії бору відповідно до рівняння (2). Кількісні значення коефіцієнта дифузії D , розраховані з нахилів відповідних прямих для кожної температури, наведено в таблиці 3.

На наступному етапі було побудовано графік Арреніуса у координатах $\ln D - 1/T$ для сталі У8 (рис. 2б). Апроксимація експериментальних даних у координатах виявила чітку лінійну тенденцію, що підтверджує термічно активований характер дифузії бору та обґрунтовує використання рівняння Арреніуса. Кількісна обробка графічної залежності дозволила встановити два ключові кінетичні параметри: енергію активації дифузії $Q = 199,6$ кДж/моль та передекспоненційний множник $D_0 = 9,24 \times 10^{-4}$ м²/с.

Встановлена величина енергії активації дифузії бору в сталі У8 знаходиться у задовільному узгодженні з наявними у науковій літературі відомостями для сталей вуглецевого класу (таблиця 4).

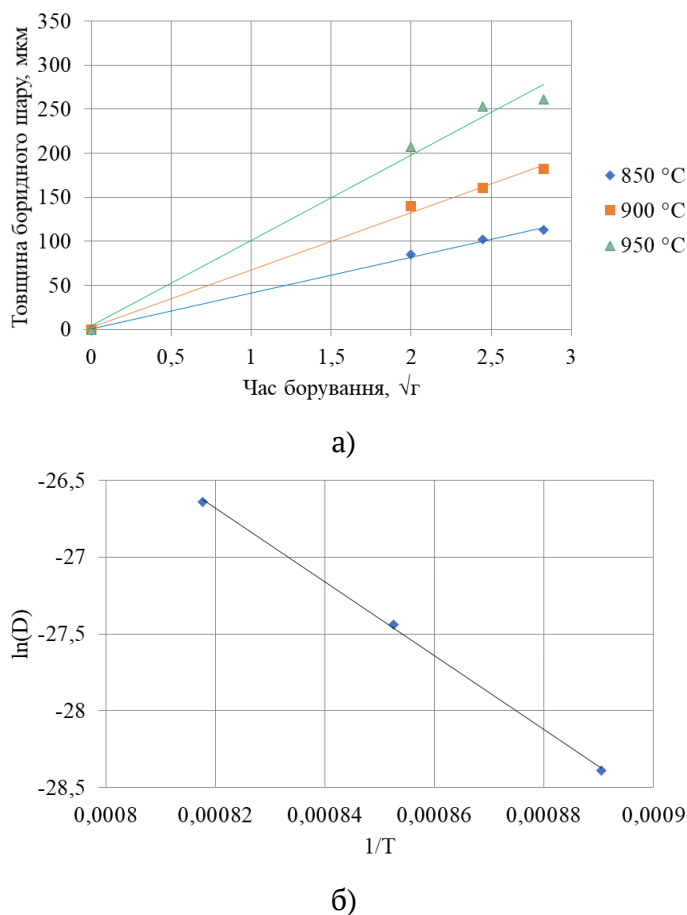


Рисунок 2 – Закономірності росту боридних шарів на сталі У8: а) залежність товщини боридного шару від кореня квадратного з часу обробки; б) залежність натурального логарифму коефіцієнта дифузії від оберненої температури борування

Таблиця 3

Визначені розрахунковим методом коефіцієнти дифузії бору для сталі У8

Марка сталі	Температура борування, °C	$D \cdot 10^{12}$, м²/с
У8	850	0,68
	900	1,10
	950	2,69

Підвищене значення енергії активації для сталі У8 порівняно з технічно чистим армко-залізом є закономірним наслідком легувального впливу вуглецю та домішкових елементів Si і Mn, які спричиняють викривлення кристалічної решітки, створюючи додаткові дифузійні бар'єри, тим самим збільшуючи енергетичний поріг активації дифузійного процесу.

Таблиця 4

Зіставлення величин енергії активації

Матеріал	Середовище борування	Енергія активації, кДж/моль	Посилання
AISI W1	порошкова суміш	171,2	[15]
AISI W110	порошкова суміш	165,0	[1]
AISI 1045	порошкова суміш	186,0	[1]
Армко-залізо	паста	157,0	[7]
Сталь У8	порошкова суміш	199,6	це дослідження

Статистичний аналіз експериментальних результатів проводився із залученням методів дисперсійного та регресійного аналізу. ANOVA застосовувався для розмежування систематичного впливу температури і тривалості борування від випадкової мінливості товщини боридного шару. Аналіз показав статистичну значущість обох факторів ($p < 0,05$), що відображено в таблиці 5. Розраховані значення часткового ета-квадрата (η^2) становили 0,9897 для температури та 0,8964 для тривалості, підтверджуючи переважний вплив температурного параметра дифузійного насичення. Така закономірність є фізично обґрунтованою, оскільки дифузія бору підпорядковується експоненційній температурній залежності Арреніуса. У технологічному аспекті це означає, що регулювання температури є пріоритетним способом досягнення необхідної товщини боридного шару, тоді як збільшення тривалості процесу відіграє допоміжну роль.

Таблиця 5

Оцінка дисперсії показників товщини боридного шару

Ефект	Сума квадратів відхилень SS	Ступені свободи df	Середній квадрат MS	Критерій Фішера F -значення	Рівень значущості p -значення	Частковий ета-квадрат η^2
Вільний член	251335,1	1	251335,1	3259,3893	0,000001	0,9988
Температура	29708,2	2	14854,1	192,633	0,000106	0,9897
Тривалість	2670,2	2	1335,1	17,314	0,010723	0,8964
Помилка	308,4	4	77,1			

З метою встановлення кількісного функціонального зв'язку між досліджуваними змінними було застосовано регресійний аналіз, який широко використовується для побудови емпіричних моделей, що описують властивості матеріалів та перебіг інженерних процесів. Принципова перевага регресійних моделей полягає у їх здатності не лише описувати наявні експериментальні дані, але й визначати оптимальні поєднання вхідних технологічних параметрів для цілеспрямованого формування заданих властивостей матеріалу. На підставі отриманого масиву експериментальних даних було побудовано емпіричну регресійну модель другого порядку, яка відображає зв'язок між товщиною боридного шару (d , мкм) на сталі У8 та такими технологічними параметрами, як температура борування (t , °C) і тривалість процесу (τ , год), що виражено рівнянням 6.

$$d = 2095,8888 - 5,5867 \cdot t - 26,1667 \cdot \tau + 0,0037 \cdot t^2 - 1,8333 \cdot \tau^2 + 0,0650 \cdot t \cdot \tau \quad (6)$$

Величина скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2_{adj} = 0,9886$ засвідчує, що побудована модель пояснює 98,86% загального розсіювання значень товщини боридного шару у границях вивченого діапазону умов насичення, що свідчить про її високу прогностичну точність та статистичну адекватність. Графічне представлення моделі у формі тривимірної поверхні відгуку (рис. 3) графічно відтворює експоненційний характер зростання товщини боридного

шару з підвищенням температури та параболічний – зі збільшенням тривалості процесу.

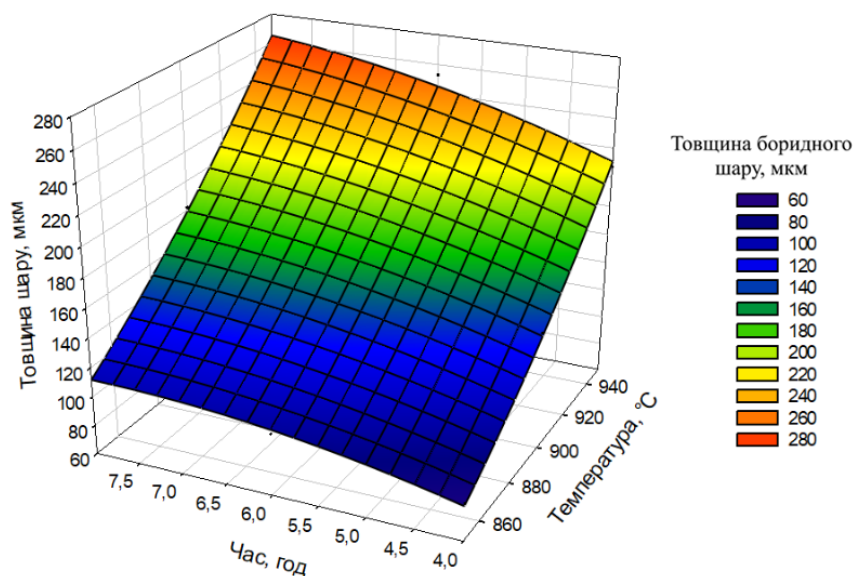


Рисунок 3 – Графічне зображення поверхні відгуку регресійної моделі товщини боридного шару

Розподіл мікротвердості за перерізом зразків, оброблених при трьох температурах протягом 6 год, показано на рис. 4.

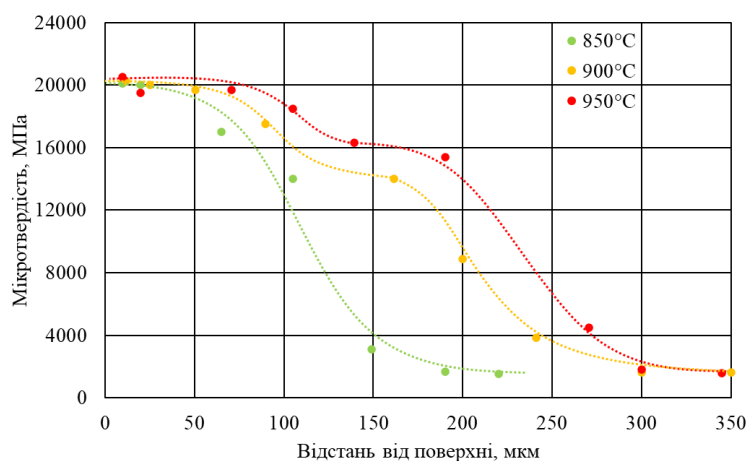


Рисунок 4 – Профіль мікротвердості за глибиною боридного шару сталі У8 при тривалості обробки 6 год

Розподіл мікротвердості по перерізу зразка чітко корелює зі структурою зон, що спостерігається при мікроскопічному дослідженні. Мікротвердість

боридного шару змінюється в діапазоні від ~20 ГПа до ~16 ГПа: зовнішня зона, що відповідає фазі FeB, характеризується максимальною твердістю (~20 ГПа), тоді як внутрішня зона фази Fe₂B демонструє нижчі значення близько 16 ГПа. У напрямку вглиб матеріалу, за границею боридної зони, спостерігається різке зниження твердості, що зумовлено зменшенням концентрації бору, формуванням лише твердого розчину бору в залізній матриці та зростанням концентрації вуглецю. Ця перехідна зона характеризується твердістю ~5-6 ГПа. У шарі, віддаленому від поверхні на 200–300 мкм, при різних температурах борування (рис. 4), твердість набуває значень, характерних для вихідного стану сталі У8.

Аналіз профілів мікротвердості різних зразків виявив схожість загальних тенденцій та практично однакові значення поверхневої твердості, що вказує на несуттєвий вплив температурних умов та часу борування на показники мікротвердості боридної зони високовуглецевих сталей.

Висновки. Проведене дослідження комплексно охарактеризувало процес порошкового борування інструментальної сталі У8 в діапазоні температур 850–950°C та тривалостей 4–8 год. Встановлено, що ріст боридного шару FeB/Fe₂B підпорядковується параболічному закону дифузії; розраховано енергію активації $Q = 199,6$ кДж/моль та передекспоненційний множник $D_0 = 9,24 \times 10^{-4}$ м²/с, що корелює з даними, наведеними у літературних джерелах для вуглецевих сталей і відображає гальмівний вплив вуглецю та легувальних елементів на дифузійний процес. Зубчаста морфологія міжфазної границі, виявлена металографічно, забезпечує ефективне механічне зчеплення дифузійного шару з основою. Дисперсійний аналіз довів домінуючу роль температури ($\eta^2 = 0,9897$) над тривалістю ($\eta^2 = 0,8964$), що є практично важливим орієнтиром для технологічного проектування. Побудована регресійна модель другого порядку ($R^2_{adj} = 0,9886$), яка дозволяє розраховувати товщину шару без проведення додаткових експериментів. Результати формують кількісну науково-практичну базу для оптимізації зміцнення деталей зі сталі У8.

ЖИТЕПАТҮПА/ REFERENCES

1. Matijević B. Evaluation of Boride layer growth on carbon steel surfaces. Metal Science and Heat Treatment. 2014. Vol. 56. P. 269–273. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-014-9744-7>
2. Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment / T. Balusamy et al. Vacuum. 2013. Vol. 97. P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.04.006>
3. Jurci P., Hudakova M. Characterization of microstructure and fracture performance of boronized H11 grade hot-work tool steel. Materials Performance and Characterization. 2020. Vol. 9. P. 339–357. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20190086>
4. Simulation of growth kinetics of Fe₂B layers formed on gray cast iron during the powder-pack boriding / M. Ortiz-Dominguez et al. Materials and Technology. 2014. Vol. 48. P. 905–916.
5. Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders/ M. S. Karakas et al. Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. P. 159–165.
6. Kayali Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace. Vacuum. 2015. Vol. 121. P. 129–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.08.006>
7. Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron / I. Campos-Silva et al. Surface Engineering. 2011. Vol. 27. P. 189–195. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708410X12550773057820>
8. Sen S., Sen U., Bindal C. An approach to kinetic study of borided steels. Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 191. P. 274–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.03.040>
9. Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis / Campos I. et al. Applied Surface Science. 2006. Vol. 252. P. 8662–8667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.12.002>
10. Allaoui O., Bouaouadja N., Saindarnan G. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201. P. 3475–3482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.238>
11. Béjar M. A., Moreno E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 173. P. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.12.006>
12. Yalamaç E., Türkmen I., Firtina Ö. Characterization and kinetic analysis of iron boride layer formed on the GGG 70 ductile cast iron. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2021. Vol. 74. P. 1701–1711. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02249-y>
13. Hardness optimization of boride diffusion layer on ASTM F-75 alloy using response surface methodology / J. L. Arguelles-Ojeda et al. Revista Mexicana de Física. 2017. Vol. 63. P. 76–81.
14. Dybkov V. I. Basics of Formation of Iron Boride Coatings. Journal of Mineral, Metal and Material Engineering. 2016. Vol. 2. P. 30–46.
15. Genel K., Ozbek I., Bindal C. Kinetics of boriding of AISI W1 steel. Mater. Sci. Eng. A. 2003. Vol. 347. P. 311–314. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00607-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00607-X)

Received 16.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.785

Svitlana Hryhorieva, Oleksandr Barmin

BORON DIFFUSION SATURATION KINETICS OF TOOL STEEL U8

Abstract. *This article presents the results of a study on the effect of powder boriding parameters – temperature (850, 900, 950°C) and holding time (4, 6, 8 hours) – on the growth kinetics, microstructure, morphology, and microhardness of the boride diffusion*

layer on high-carbon tool steel U8. Boriding was carried out in sealed containers using a powder mixture of 85% B_4C , 5% KBF_4 , and 10% Al_2O_3 . Metallographic examination revealed a well-defined dual-phase FeB/Fe_2B boride layer with a characteristic sawtooth interfacial morphology, which provides mechanical interlocking between the coating and the substrate, improving resistance to delamination. A cementite-enriched transition zone beneath the boride layer was observed, attributed to carbon redistribution during boron diffusion. Microhardness values reached approximately 20 GPa in the outer FeB zone and 16 GPa in the inner Fe_2B zone, dropping sharply to base-metal values beyond 200–300 μm depth. The boride layer growth was found to follow a parabolic law, confirming diffusion-controlled kinetics. Arrhenius analysis yielded an activation energy $Q = 199.6$ kJ/mol and a pre-exponential factor $D_0 = 9.24 \times 10^{-4}$ m²/s, consistent with literature data for carbon steels. Analysis of variance (ANOVA) confirmed that both factors are statistically significant ($p < 0.05$); the partial eta-squared values were $\eta^2 = 0.9897$ for temperature and $\eta^2 = 0.8964$ for time, establishing temperature as the dominant process variable. A second-order polynomial regression model based on response surface methodology was developed ($R^2_{adj} = 0.9886$), enabling reliable prediction of boride layer thickness without additional experiments. The results provide a quantitative basis for optimizing surface hardening of steel U8 components to improve their wear resistance and service life.

Keywords: boriding, boride layer, growth kinetics, microstructure, microhardness, regression model, analysis of variance.

Бармін Олександр Євгенович – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>

Григор'єва Світлана Вікторівна – інженер кафедри електричних машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>

Barmin Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Materials Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>

Hryhorieva Svitlana – engineer at the Department of Electrical Machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>

МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ НАЯВНИХ В ОБІГУ РЕСУРСІВ ВОЛЬФРАМУ МІЖ ГАЛУЗЯМИ ВИКОРИСТАННЯ

Анотація. Досліджуються галузі та форми застосування вольфраму, аналізуються способи переробки матеріалів, які містять вольфрам, з точки зору можливості перерозподілу наявного ресурсу між сферами його застосування. Встановлено, що з цієї точки зору найбільшим є виробу з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму; На території України щорічно знаходиться в обігу приблизно від однієї до двох тисяч тон виробів з твердих сплавів. Способи переробки відходів твердих сплавів, які не передбачають відновлення вольфраму з карбіду, характеризується мінімальними витратами енергії, але обмеженими можливостями щодо перерозподілу наявного ресурсу вольфраму між сферами його використання. Способи переробки відходів твердих сплавів, які передбачають відновлення вольфраму, створюють найширші можливості для перерозподілу наявного в обігу ресурсу вольфраму між різними сферами його використання.

Ключові слова: вольфрам, карбід вольфраму, перерозподіл ресурсів, циркулярна економіка.

Постановка проблеми. Воєнно-політична та економічна ситуація в світі, яка склалася на даний момент, спонукає країни Європи покладатися на власні сили і ресурси. Перш за все це стосується ресурсів, якими Європа бідна. Необхідно мати можливість сконцентрувати наявні запаси того чи іншого ресурсу і трансформувати його у ту форму, яка є найбільш необхідною на даний момент. При цьому бажано мати можливість зворотної трансформації в разі зміни ситуації. Мова йде як про заздалегідь накопичені запаси, так і про ту кількість ресурсу, яка знаходиться в обігу. Одним з таких дефіцитних у Європі ресурсів є вольфрам, без якого неможливе створення сучасних озброєнь і сучасне машинобудування взагалі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вольфрам дуже широко використовується в сучасній техніці. Основні сфери його використання за даними [1]:

- 1 твердосплавний інструмент: металорізальний, для обробки металів тиском, гірничо-видобувний;
- 2 зварювальні матеріали, дріт для електроерозійної обробки, дріт для ламп розжарювання;
- 3 інструментальні та конструкційні сталі, сплави на основі титану та нікелю (відливки, порошки, прокат, пресовані профілі);
- 4 високотемпературні електричні контакти;
- 5 високотемпературні змащувальні матеріали;
- 6 боеприпаси (осердя бронебійних підкаліберних снарядів, уражаючі елементи осколкових та касетних боеприпасів, картеч) [2,3,4];
- 7 авіаційна та ракетно-космічна техніка і ракетне озброєння [3,5].

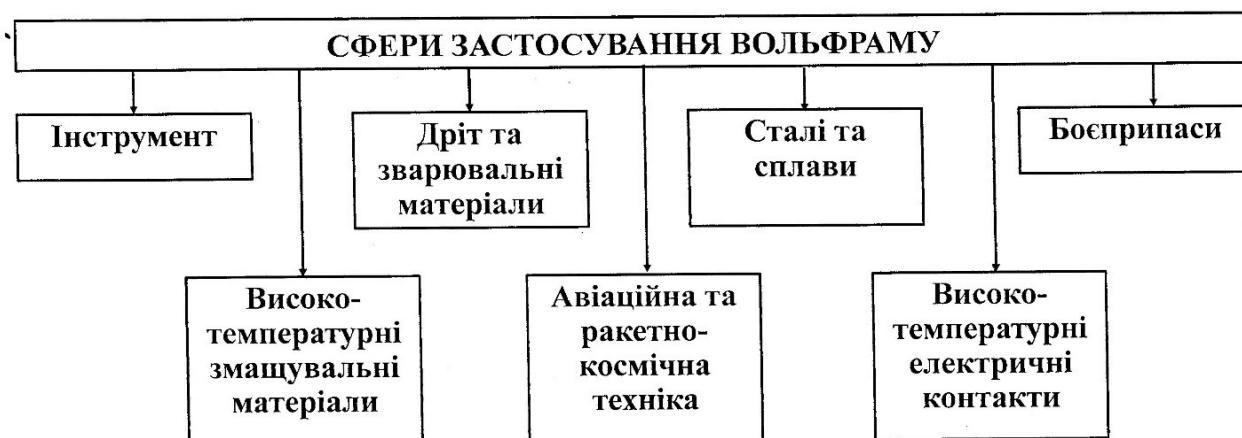
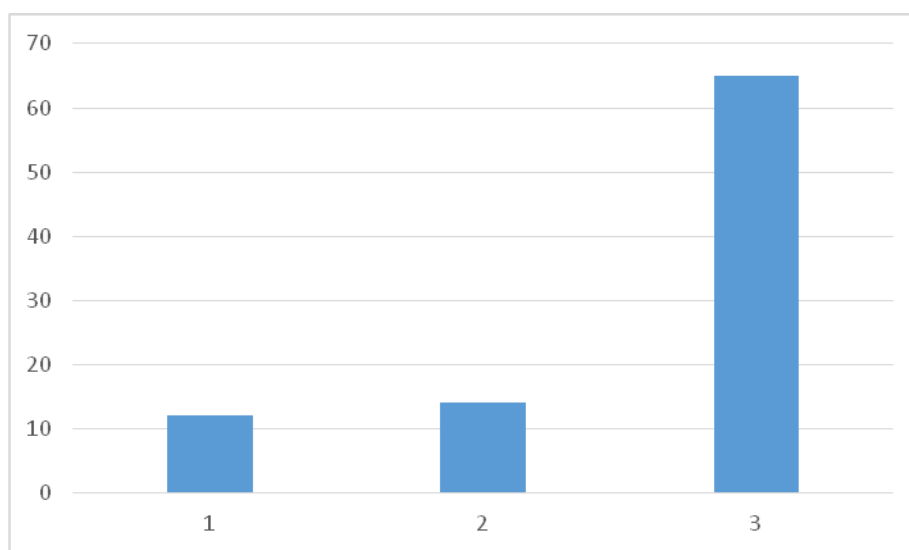


Рисунок 1 – Сфери застосування вольфраму у сучасній техніці

В цих сферах вольфрам використовується в різних сполуках та в чистому вигляді. Наприклад, в твердосплавних робочих частинах інструментів використовується карбід вольфраму. Для виплавки інструментальних та конструкційних сталей вольфрам застосовують у вигляді феросплавів, а в сплавах на основі титану та нікелю – у вигляді лігатур. В бронебійних боеприпасах, в касетних боеприпасах вольфрам може бути використаний як у вигляді карбиду, так і в чистому вигляді або у вигляді сплавів на основі вольфраму [2-4]. У зварювальних матеріалах (дріт, електроди) вольфрам

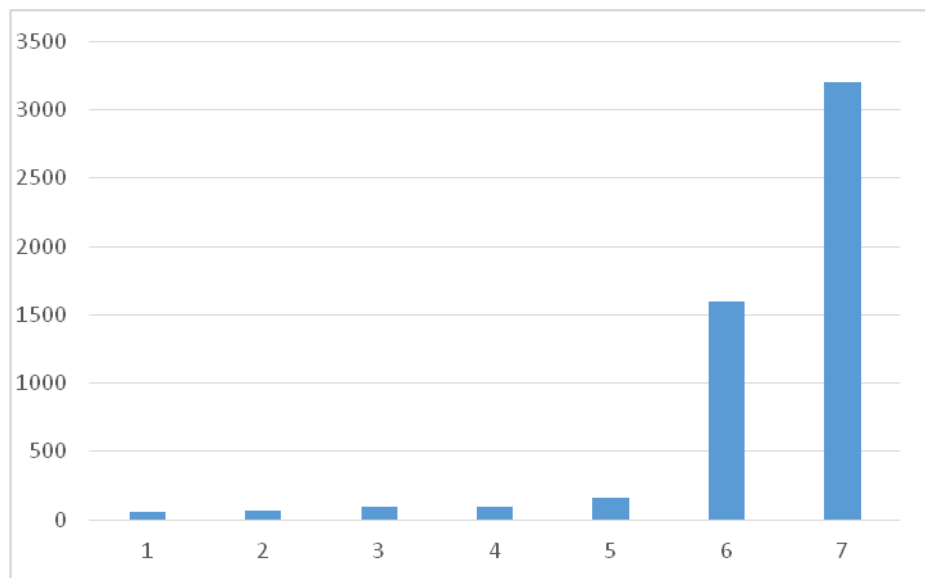
використовується у чистому вигляді [1]. У змащувальних матеріалах вольфрам використовується у вигляді хімічних сполук, наприклад, сульфідів [1].

За даними [1] приблизно 65% вольфраму, який видобувається в світі, використовується для виготовлення карбіду вольфраму, ще 14% – феросплавів і лігатур для виплавки сталей та сплавів на основі титану та нікелю і деяких бронз, 12% – вольфраму у чистому вигляді або сплавів на основі вольфраму. Ще близько 9% вольфраму використовується у вигляді хімічних сполук. Таким чином, найбільш часто вольфрам застосовується у вигляді карбіду. У графічному вигляді це наведено на рисунку 1.



1 – вольфрам у чистому вигляді та сплави на основі вольфраму,
2 – феросплави і лігатури для виготовлення інструментальних та конструкційних сталей і сплавів, 3 – карбід вольфраму
Рисунок 2 – Розподіл вольфраму, який видобувається в світі (у відсотках), для виготовлення конструкційних матеріалів [1]

Сам вольфрам як ресурс є вкрай дефіцитним і дуже нерівномірно розміщений по всьому світу. За даними [1] відомі світові запаси вольфраму сягають 3200 000 тон, з яких Китайська народна республіка – приблизно 1600 000 тон, рф – 160 000 тон, Демократична республіка В’єтнам – 95000 тон, Монгольська народна республіка – 63 000 тон, Іспанія – 54000 тон. Що стосується України, то видобуток вольфраму в нашій країні на теперішній час не здійснюється. Потенційні запаси вольфраму в Україні оцінюються в 95000 тон [6-10].



1 – Іспанія, 2 – Монгольська народна республіка, 3 – Демократична республіка В'єтнам, 4 – Україна (прогнозовані дані), 5 – російська федерація, 6 – Китайська народна республіка, 7 – загальні запаси в світі (оціночні дані)

Рисунок 3 – Розподіл запасів вольфраму по країнах (у тисячах тонн) [1,6-10]

Європейський континент є регіоном, у якому інтенсивна промислова діяльність триває найдовший час. Природно, що значна частина корисних копалин Європи вже вичерпана, хоча в цілому континент забезпечений більшістю корисних копалин, які необхідні для сталого розвитку. Україна є однією з небагатьох країн Європи, надра яких вивчені далеко не повністю. Таким чином не дивно, що європейські країни доволі активно просувають ідеї циркулярної економіки [11]. Циркулярна економіка або економіка замкнутого циклу – модель економічного розвитку, що є альтернативою лінійній економіці і яка передбачає відновлення, повторне використання, раціональне споживання ресурсів і дозволяє створити додаткову цінність за допомогою нових послуг та інтелектуальних рішень.

Слід зауважити, що перші елементи циркулярної економіки почали системно використовуватися в ході Першої та Другої світових воєн – багаторазове використання тари для боєприпасів, снарядних гільз, збирання і переплав виведеної з ладу техніки [12]. Можливо пригадати і більш ранні приклади – війни революційної Франції проти коаліцій монархічних держав Європи, коли за наказом Гаспара Монжа чавунні каналізаційні решітки

переплавлялися на ядра для гармат [13]; Карфаген, в якому для виготовлення зброї використали майже всі металеві предмети, які лишилися в місті [14]. Як видно з наведених прикладів вже перші спроби використати якісь елементи того, що після назвуть циркулярною економікою, стосувалися багаторазового використання одного й того ж матеріального ресурсу та трансформації такого ресурсу у ту форму, яка є необхідною у даний момент.

Метою статті є виявлення найбільших ресурсів вольфраму, які знаходяться в обігу та можуть бути трансформовані в ту форму, яка є необхідною на даний момент.

Виклад основного матеріалу. Однією з підвалин циркулярної економіки є багаторазове використання одного й того ж матеріального ресурсу. З точки зору багаторазовості використання матеріального (сировинного) ресурсу, наведені вище сфери застосування вольфраму можливо розділити за наступною ознакою:

1 можливе повторне використання майже всього обсягу вольфраму або його сполуки;

2 в процесі використання та/або переробки чи утилізації відбувається розпорошення ресурсу, подальше збирання якого є технічно неможливим та/або економічно не раціональним;

3 відбувається часткова втрата або розпорошення ресурсу, але частина зберігається і може бути перероблена зі збереженням чи підвищенням концентрації ресурсу та збереженням чи покращенням властивостей.

Будь-який боєприпас використовується одноразово і корпус його бойової частини, як правило, руйнується з розпорошенням ресурсу і технічною неможливістю його збирання для наступної консолідації (підвищення концентрації). Це ж стосується готових уражаючих елементів касетних боєприпасів або картечі. Виняток становлять боєприпаси, які були виготовлені, пролежали на складах визначений термін, не були використані в ході бойової підготовки чи бойових дій, як правило, морально застарілі. В цьому разі вони є цінним ресурсом і можуть бути розібрані в заводських умовах і їх складові можуть бути належним чином утилізовані і перероблені поодиночі чи комплексно. За даними [2] в теперішній час здійснюється перехід до використання для виготовлення бронебійних осердь підкаліберних снарядів з

важких вольфрамових сплавів (до 90% вольфраму) замість твердих сплавів на основі карбіду вольфраму. Це не дивно, тому що густина важких сплавів на основі вольфраму складає від 18,0 г/см³ до 18,5 г/см³, в той же час як густина твердих сплавів на основі карбіду вольфраму лише від 14,0 г/см³ до 14,5 г/см³. Більша густина важкого сплаву порівняно з твердим забезпечує краще пробивання броні та/або ураження інших цілей, наприклад, крилатих ракет і безпілотних літальних апаратів. Таким чином, може виникнути потреба у переробці частини карбіду вольфраму на вольфрам чи важкі сплави на основі вольфраму. Технічна можливість такої переробки є. Цілком можливе і зворотне перетворення чистого вольфраму на карбід.

Зварювальні матеріали (неплавкі електроди, дріт) та матеріали для електроерозійної обробки використовуються в процесі експлуатації, частина матеріалу розпорошується і втрачається безповоротно (при переточування електродів, розривах дроту). Частина ж матеріалів, які входять до складу виробів, що вже неможливо використати за призначенням (короткі залишки електродів і дроту) цілком може бути зібрана і перероблена як чистий вольфрам чи на сплави на його основі. Також такі відходи можуть бути перероблені на карбід вольфраму.

Можливість переробки сталей і сплавів зі збереженням концентрації вольфраму залежить від їх складу та призначення виробів, які виготовлені з того чи іншого матеріалу. У всі сталі вольфрам вводиться у вигляді феросплавів. Самі феросплави отримують спільним відновленням оксидів вольфраму та заліза алюмінієм [15]. З феросплавів виділити чистий вольфрам технічно складно і економічно недоцільно. У сплави на основі титану та нікелю вольфрам вводять у вигляді лігатур, які здебільшого теж виготовляються методом алюмінотермії. Виділити чистий вольфрам з лігатури також технічно складно і економічно недоцільно.

Вироби з титанових та нікелевих сплавів з вмістом вольфраму, є здебільшого елементами складних технічних систем, які утилізуються профільними, спеціально обладнаними підприємствами. В цьому разі ці вироби будуть перероблені зі збереженням вмісту вольфраму у вторинному матеріалі (відливки, порошок, напівфабрикати, заготовки). Знос таких виробів в процесі штатної експлуатації відносно невеликий і розпорошення вольфраму

не спостерігається. Навіть в разі пошкодження технічної системи часто наявна можливість зберегти більшу частину її елементів для переробки. Виділити зі сплавів вольфрам для використання в інших матеріалах технічно неможливо або дуже складно та економічно недоцільно.

З швидкорізальних сталей здебільшого виготовляється суцільний металорізальний інструмент, такий як свердла, зенкери, мітчики, розгортки, фрези, протяжки, меншою мірою суцільні різці. Осьовий інструмент в процесі переточування суттєво зменшується в розмірах (крім мітчиків), при цьому значна частина матеріалу робочої частини втрачається безповоротно разом з вольфрамом, який входить до його складу. Разом з вольфрамом втрачаються не менш дефіцитні кобальт і молібден. Частина спрацьованого інструменту (хвостовики, робоча частина, розміри якої вже недостатні для обробки заготовок) можуть бути перероблені без зменшення концентрації вольфраму. Здебільшого на машинобудівних підприємствах відходи швидкорізальних сталей збирають окремо для подальшої переробки. Леговані інструментальні сталі (наприклад, типу ХВГ) можуть бути перероблені таким же чином. Отже, відходи швидкорізальних та легованих інструментальних сталей можуть бути перероблені на матеріали з таких же сталей без зменшення вмісту вольфраму, але частина вольфраму втрачається в процесі експлуатації інструмента через знос і переточування.

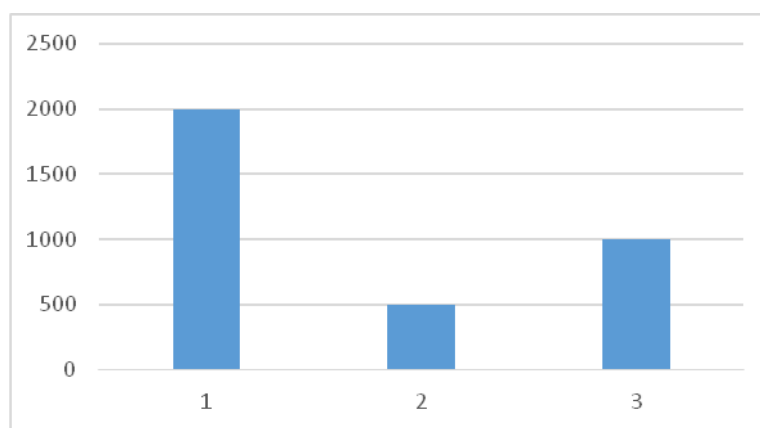
Конструкційні сталі, в тому числі нержавіючі, які леговані вольфрамом, використовуються відносно рідко. Якщо вироби з таких сталей мають достатньо великі розміри, то цілком можлива їх утилізація і переробка на профільних підприємствах зі збереженням концентрації вольфраму. Якщо ж вироби мають малі розміри, наприклад, кріпильні деталі, то вони здебільшого будуть утилізуватися разом з іншими відходами і ресурс вольфраму буде розпорошуватися без можливості подальшої консолідації.

Високотемпературні електричні контакти входять як елементи до складних технічних систем, які по закінченні терміну експлуатації утилізуються профільними підприємствами, на яких здійснюється належне сортування вторинної сировини. Таким чином, цей ресурс вольфраму зберігається і може бути перероблений як такий та перетворений на карбіди, феросплави та лігатури.

Тверді змащувальні матеріали, наприклад, дисульфід вольфраму, використовуються одноразово. Обсяги їх виробництва невеликі і вони необхідні в обмеженій кількості в тих технічних системах, де інші змащувальні матеріали не здатні виконувати свої функції.

Таким чином, найбільшим ресурсом з точки зору можливості перерозподілу наявної в обігу кількості вольфраму між різними галузями використання, є вироби з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму.

Наявність твердих сплавів у промисловому обігу України можливо оцінити наступним чином. На 1991 рік промисловість України споживала до двох тисяч тон виробів з твердих сплавів на рік [16]. У 2004 році ця цифра складала сотні тон, а у 2014 році – одну тисячу тон [17]. Причинами зменшення обсягів використання твердих сплавів є не тільки скорочення обсягів промислового виробництва, а і покращення якості твердосплавного інструменту, який став доступним українським підприємствам. Таким чином, потреби промисловості України у виробах з твердих сплавів становлять від однієї до двох тисяч тон на рік. Відповідно, на території країни щорічно знаходиться в обігу приблизно така кількість виробів з твердих сплавів, основою переважної більшості з яких є карбід вольфраму.



1 – 1991 рік, 2 – 2004 рік (орієнтовні дані), 3 – 2014 рік

Рисунок 3 – Споживання виробів з твердих сплавів в Україні (по роках у тонах) [16,17]

Для переробки виробів з твердих сплавів та трансформації ресурсу вольфраму з карбіду в інші форми можуть бути задіяні декілька способів. Усі способи переробки відходів твердих сплавів можливо розділити на дві великі групи:

1 способи, які передбачають розділення карбідів і кобальту, подрібнення виробу та подальше використання карбідів і кобальту без відновлення вольфраму;

2 способи, які передбачають відновлення вольфраму з карбідів.

Перша група способів передбачає переробку відходів твердих сплавів на нові вироби з твердих сплавів. Можливість зміни форми використання вольфраму для цих способів – зменшення розмірів частинок карбідів. Можливості для такого зменшення є як при вибуховому подрібненні відходів за рахунок збільшення швидкості детонації вибухової речовини [18], так і при механічному розмелювання після цинкотермічного виділення кобальту. Це може бути використано для переробки відходів застарілого металорізального інструменту, інструменту для обробки металів тиском та гірничо-видобувного інструменту на сучасний металорізальний інструмент. Також може бути змінена марка сплаву шляхом введення свіжих порошків карбідів вольфраму, титану і танталу, а також кобальту. Ця група способів придатна для всіх груп твердих сплавів на основі карбіду вольфраму. Також ця група характеризується мінімальними витратами енергії, але обмеженими можливостями щодо перерозподілу наявного ресурсу вольфраму між сферами його використання.

Друга група способів передбачає відновлення вольфраму з карбідів. Таке відновлення можливо зробити шляхом окислення карбіду до оксиду і подальшого відновлення вольфраму. На виході можуть бути отримані кілька продуктів в залежності від способу відновлення та співвідношення реагентів:

1 чистий вольфрам – алюмінотермія або відновлення воднем з наступним дегідруванням;

2 феросплави – алюмінотермія, спільне відновлення вольфраму і заліза;

3 лігатура з вмістом вольфраму на основі нікелю або титану – алюмінотермія, спільне відновлення з оксидами титану і нікелю

4 важкий сплав на основі вольфраму – алюмінотермія;

5 інші хімічні з'єднання вольфраму, наприклад, сульфіди.

З чистого вольфраму чи його оксиду можливе отримання карбіду, але в результаті переробки можливо отримати вже інші розміри частинок, як менші за вихідні, так і більші. В процесі отримання порошків карбідів вольфраму з оксидів чи порошків чистого вольфраму частинки карбідів гарантовано не

будуть мати тріщин та внутрішніх напружень, які можуть виникнути при розмелюванні. Таким чином, способи переробки відходів твердих сплавів, які передбачають відновлення вольфраму, створюють найширші можливості для перерозподілу наявного в обігу ресурсу вольфраму між різними сферами його використання.

Висновки

Найбільшим ресурсом з точки зору можливості перерозподілу наявної в обігу кількості вольфраму між різними галузями використання є виробництво з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму.

На території України щорічно знаходиться в обігу приблизно від однієї до двох тисяч тонн виробів з твердих сплавів, основою переважної більшості з яких є карбід вольфраму.

Способи переробки відходів твердих сплавів, які не передбачають відновлення вольфраму з карбідів, характеризується мінімальними витратами енергії, але обмеженими можливостями щодо перерозподілу наявного ресурсу вольфраму між сферами його використання.

Способи переробки відходів твердих сплавів, які передбачають відновлення вольфраму, створюють найширші можливості для перерозподілу наявного в обігу ресурсу вольфраму між різними сферами його використання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сайт International tungsten industry association [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.itia.info/applications-markets/>
2. Едуард Перов (02.04.2021) Підкаліберний броньовий снаряд: Історія з анатомією. Режим доступу: <https://www.ukrmilitary.com/2021/04/lom.html>
3. Сайт CSIS [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://missilethreat.csis.org/system/patriot/>
4. Сайт Lockheed Martin [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/guided-mlrs-unitary-rocket.html>
5. Санін Ф.П. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології: підручник. /Ф.П. Санін, Л.Д. Кучма, Є.О. Джур, А.Ф. Санін /.- Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. Ун-ту, 1999. – 320 с.
6. Сивий М., Паранько І., Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України: монографія. – Львів: Простір М, 2013. – 684 с.
7. Металічні корисні копалини України / О. В.Грінченко, М.В. Курило, М.А.Михайлов та ін. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2006. – 220 с.
8. Мінеральні ресурси України: щорічний довідник. – Київ: ДНВП «Геоінформ України», 2018. – 270 с.

9. Бабій К.В., Бубнова О.А., Малеев Є.В., Рюміна Д.М., Левченко К.С., Ікол О.О. Ресурси стратегічних корисних копалин України: монографія. / К.В. Бабій, О.А. Бубнова, Є.В. Малеев, Д.М. Рюміна, К.С. Левченко, О.О. Ікол / – Дніпро: ПБП «Економіка», 2024. – 324 с.
10. Сайт ТОВ «Інститут геології» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://insgeo.com.ua/wolframium/>
11. Циркулярна економіка. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальностями 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» / Є.С. Цюман, В.І. Зюзюн; Національний транспортний університет. – Київ: НТУ, 2023. – 133 с.
12. Знімки надлишків військової техніки після Другої світової війни. 1945-1948 (14 фото). Режим доступу: <https://nevsedoma.com.ua/uk/561534-znimki-nadlishkiv-vijskovoji-tehniki-pislja-drugoji-svitovoji-vijni-1945-1948-14-foto.html>
13. Le Paris des polytechniciens. Des ingénieurs dans la ville. Collection Paris et son patrimoine. Édité pour le bicentenaire l'école polytechnique. 1994.
14. Степан Кудрявченко (09.03.2026) Карфаген має бути зруйнований: гасло, що спалило античний світ. Режим доступу: <https://www.svitstyle.com.ua/karfahen-maie-butyzruinovanyi-haslo-shcho-spalylo-antychnyi-svit/>
15. В. П. Мовчан, М. М. Бережний. Основи металургії. Дніпропетровськ: Пороги. 2001. 336 с
16. Уданович М.Р. Анализ рынка и маркетинг в инструментальном производстве / Оборудование и инструмент для профессионалов, 2003, № 12, с. 32-34.
17. Лисовський А. Ф. Технологія виробництва крупногабаритних твердосплавних виробів та освоєння їх промислового виробництва для металургійної промисловості України / А. Ф. Лисовський, Е. О. Цігітшвілі, А. І. Кулик, О. Ф. Курочкін, В. Г. Лясков, В. В. Пашинський, А. Д. Рябцев, Д. Г. Сидоренко, А. В. Феофілактів / Сверхтвердые материалы, 2010, № 2, . 30-42. ISSN 0203-3119.
18. Kurinnyi V.P., Harkusha I.P., Musiienko S.P. Theoretical substantiation of the explosive crushing of particles of tungsten-cobalt alloys // Geotech. meh. 2019, 147, 73-81, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900045>

Received 16.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDK 620.1:621.7

Sergey Bozhko, Oleg Bondarenko, Volodymyr Kurinnyi, Olexandr Shevchenko

POSSIBILITIES OF REDISTRIBUTION OF AVAILABLE TUNGSTEN RESOURCES IN CIRCULATION BETWEEN INDUSTRIES OF USE

Abstract. *The purpose of this study is to identify the industries and forms of application of tungsten in which the largest amount of it is in circulation; to analyze the methods of processing materials containing tungsten, from the point of view of the possibility of redistributing the available resource between the areas of its application. The main research method in this work is the analysis of freely available data. The scientific novelty of this work is that it was established that the largest resource of tungsten in circulation is products made of hard alloys based on tungsten carbide. Based on the*

results of this study, the following conclusions can be drawn. The largest resource in terms of the possibility of redistributing the available amount of tungsten in circulation between different areas of use is products made of hard alloys based on tungsten carbide. Approximately one to two thousand tons of hard alloy products are in circulation in Ukraine annually, the basis of the vast majority of which is tungsten carbide. Methods of processing hard alloy waste that do not involve the recovery of tungsten from carbide are characterized by minimal energy consumption, but limited possibilities for redistributing the available tungsten resource between its areas of use. Methods of processing hard alloy waste that involve the recovery of tungsten create the widest possibilities for redistributing the available tungsten resource between its different areas of use.

Keywords: tungsten, tungsten carbide, resource redistribution, circular economy.

REFERENCES

1. Sait International tungsten industry association [Site International tungsten industry association] itia.info/applications-markets/ Retrieved from <https://www.itia.info/applications-markets/>
2. Eduard Perov (02.04.2021) Pidkalibernyi bronebiinyi snariad: Istoriia z anatomiieiu. [Sub-caliber armor-piercing projectile: A history with anatomy].ukrmilitary.com. Retrieved from <https://www.ukrmilitary.com/2021/04/1om.html>
3. Sait CSIS [Site CSIS]. missilethreat.csis.org. Retrieved from <https://missilethreat.csis.org/system/patriot/>
4. Сайт Lockheed Martin [Site Lockheed Martin]. lockheedmartin.com. Retrieved from <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/guided-mlrs-unitary-rocket.html>
5. F.P. Sanin, L.D. Kuchma, Ye.O. Dzhur, A.F. Sanin (1999) Tverdopalyvni raketni dvyhuny. Materialy i tekhnolohii: pidruchnyk [Solid-fired rocket engines. Materials and technologies: handyman] Dnipropetrovsk, Vyd-vo Dnipropetr. Un-tu, [in Ukrainian].
6. Syvyi M., Paranko I., Ivanov Ye. (2013) Heohrafiia mineralnykh resursiv Ukrainy: monohrafiia. [Geography of mineral resources of Ukraine: monograph] – Lviv: Prostir M, [in Ukrainian].
7. O. V.Hrinchenko, M.V. Kurylo, M.A.Mykhailov ta in. (2006.) Metalichni korysni kopalyny Ukrainy [Metallic brown diggings of Ukraine]. Kyiv: Vydavnycho-polihrafichniyi tsentr «Kyivskyi universytet», [in Ukrainian].
8. 8. Mineralni resursy Ukrainy: shchorichnyi dovidnyk (2018.) [Mineral resources of Ukraine: short-haired witness] Kyiv: DNVP «Heoinform Ukrainy» [in Ukrainian]
9. Babii K.V., Bubnova O.A., Malieiev Ye.V., Riumina D.M., Levchenko K.S., Ikol O.O. (2024) Resursy stratehichnykh korysnykh kopalyn Ukrainy: monohrafiia [Resources of strategic bark copalins of Ukraine: monograph]. Dnipro: PBP «Ekonomika» [in Ukrainian]
10. Sait TOV «Institute geologii» [Site Institute of geology R&D]. insgeo.com.ua. . Retrieved from <https://insgeo.com.ua/wolframium/> [in Ukrainian]
11. Tsyrukuliarna ekonomika. [Circular economy] [Elektronnyi resurs]: navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv druhooho (mahisterskoho) rivnia vyshchoi osvity za spetsialnostiamy 101 «Ekolohiia» ta 183 «Tekhnolohii zakhystu navkolyshnoho seredovyshcha» (2023) / Ye.S. Tsiuman, V.I. Ziuziun; Kyiv: NTU [in Ukrainian].
12. Znimky nadlyshkiv viiskovoi tekhniky pislia Druhoi svitovoi viiny. 1945-1948 (14 foto) [Photos of surplus military technology after another light war. 1945-1948 (14 photos)].

- Retrieved from <https://nevsedoma.com.ua/uk/561534-znimki-nadliskiv-vijskovoji-tehniki-pislja-drugoji-svitovoji-vijni-1945-1948-14-foto.html>
13. Le Paris des polytechniciens. Des ingénieurs dans la ville. Collection Paris et son patrimoine. Édité pour le bicentenaire l'école polytechnique. 1994.
14. Stepan Kudriavchenko (09.03.2026) Karfahen maie buty zruinovanyi: haslo, shcho spalylo antychnyi svit [Carthage must be destroyed: the slogan that burned the ancient world]. Retrieved from <https://www.svitstyle.com.ua/karfahen-maie-buty-zruinovanyi-haslo-shcho-spalylo-antychnyi-svit/>
15. V. P. Movchan, M. M. Berezhnyi. Osnovy metalurhii (2001) [Fundamentals of metallurgy]. Dnipropetrovsk: Porohy, [in Ukrainian].
16. Udanovych M.R. (2003) Analiz rynku y marketynh v ynstrumentalnom proyzvodstve / Oborudovanye y ynstrument dlia professyonalov [Market analysis and marketing in tool production] – Equipment and instrument for professionals, 12, 32-34 [in Ukrainian].
17. A. F. Lysovskiy, E. O. Tskitishvili, A. I. Kulyk, O. F. Kurochkin, V. H. Liasov, V. V. Pashynskiy, A. D. Riabtsev, D. H. Sydorenko, A. V. Feofilaktov. Tekhnolohiia vyrobnytstva krupnohabarytnykh tverdospavnykh vyrobiv ta osvoiennia yikh promyslovoho vyrobnytstva dlia metalurhiinoi promyslovosti Ukrainy (2010) [Technology for the production of large-sized carbide particles and the development of their industrial production for the metallurgical industry of Ukraine], Superhard Materials, 2, 30-42.
18. Kurinnyi V.P., Harkusha I.P., Musiienko S.P. Theoretical substantiation of the explosive crushing of particles of tungsten-cobalt alloys // Geotekh. meh. 2019, 147, 73-81, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900045>

Божко Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0736-4968>

Бондаренко Олег Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4958-1777>

Курінний Володимир Павлович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу геомеханічних основ технологій відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-6727-2344>

Шевченко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник відділу геомеханічних основ технологій відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2630-0186>

Bozhko Sergey Anatoliyovich – , Candidate of technical Sciences., Associated. Profesor., Associated Profesor of Department of rocket-space and innovation technology, Oles Honchar Dnipro National University. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0736-4968>

Bondarenko Oleg Vitalievich – Candidate of technical Sciences., Associated. Profesor., Associated Profesor of Department of rocket-space and innovation technology, Oles Honchar Dnipro National University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4958-1777>

Kurinni Volodymyr Pavlovich – Doctor of technical Sciences, Profesor, Senior Researcher, Department of Geomechanical Basis of Open-Pit Technologe, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-6727-2344>

Shevchenko Olexandr Ivanovich – Doctor of technical Sciences, Profesor, Senior Researcher, Department of Geomechanical Basis of Open-Pit Technologe, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2630-0186>

INVESTIGATION OF THE WEAR RESISTANCE OF NITRIDED SHKH15 STEEL IN AN ABRASIVE ENVIRONMENT

Abstract. *The study investigates the wear resistance of nitrided ShKh15 steel in an abrasive environment after glow-discharge nitriding in hydrogen-free nitrogen–argon atmospheres. The influence of technological parameters, including pressure and argon content, on the thickness, hardness, phase composition, and hardness gradient of nitrided layers was analyzed using a two-factor rotatable design. Empirical mathematical models describing nitrided layer properties and wear behavior were developed. Experimental results showed that wear resistance, surface hardness, and layer thickness can be controlled and optimized by varying nitriding conditions. The highest wear resistance was achieved under optimal nitriding conditions, significantly exceeding that of quenched steel.*

Keywords: *wear resistance, nitrided layers, glow-discharge nitriding, abrasive environment.*

Problem statement. During grain processing by extrusion, the working components of the extruder (screw and barrel) are subjected to significant operational loads, including high pressure and temperature, as well as a corrosive-abrasive environment, which results in their relatively short service life. Improving the wear resistance of the screw and barrel is therefore a promising area of research.

Analysis of recent studies and publications. Currently, numerous methods exist for improving the wear resistance of structural components, including thermal treatments, thermochemical treatments, thermal spraying, and hardfacing with wear-resistant materials.

Glow-discharge nitriding is one of the effective methods for surface strengthening of metals, providing the possibility to modify the properties of surface layers (hardness, thickness, phase composition, and property gradients through the layer thickness) over a wide range [1, 2]. This makes it possible to optimize the

properties of the strengthened surface layer in order to achieve maximum performance characteristics under actual operating conditions of structural elements [3]. Many machine parts and tools operate in abrasive and corrosive-abrasive environments, which leads to surface degradation caused by abrasive particles and the corrosive action of aggressive media. Therefore, ensuring an optimal balance between hardness, ductility, and corrosion resistance of surface layers is of considerable importance.

Presentation of the main research material. We have developed a technology and equipment for thermochemical treatment of machine parts and tools in glow discharge under hydrogen-free atmospheres (nitrogen-argon mixtures) [4]. A distinctive feature of this technology is the elimination of hydrogen embrittlement during diffusion saturation, as well as the improvement of the plastic characteristics of surface layers due to different phase ratios.

Surface modification of ShKh15 steel was carried out in a glow discharge in a nitrogen-argon gas mixture. The properties of the nitrided layer were controlled by four technological parameters: diffusion saturation temperature, pressure in the vacuum chamber, composition of the saturating atmosphere, and nitriding duration.

Theoretical and experimental studies showed that all of the above technological parameters of the nitriding process affect the properties of the nitrided layer. Therefore, the influence of each technological factor during glow-discharge nitriding on hardness, thickness, phase composition, and the property gradient through the thickness of the nitrided layer was investigated.

By varying the technological parameters of the nitriding process, the properties of the nitrided layer can be modified over a wide range, making it possible to obtain a nitride zone with different phase compositions, different thicknesses, or nitrided layers without a nitride zone (Fig. 1).

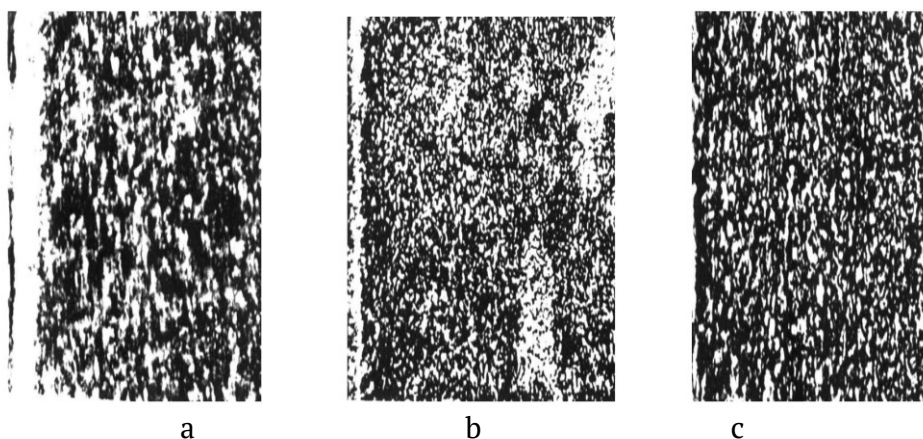


Figure - 1. Microstructure of ShKh15 steel ($\times 500$) after glow-discharge nitriding in hydrogen-free atmospheres:

a, b – with a nitride zone of different thicknesses; c – without a nitride zone.

To ensure maximum wear resistance of friction pairs operating in an abrasive environment, it is necessary for the surface layers to possess high hardness and maximum thickness. Theoretical and experimental studies of the ion nitriding process for metals have shown that, for ShKh15 steel, high hardness is achieved at temperatures of 560–580 °C, while the maximum thickness of the nitrided layer is obtained at a diffusion saturation duration of 6–8 h.

Therefore, in order to reduce the number of experiments in studying the properties of the nitrided layer and the wear process of nitrided specimens, a second-order two-factor rotatable design was used. During the investigations, the following factors were varied: the composition of the saturating atmosphere within the range of 29–71%, and the pressure in the vacuum chamber within the range of 55–225 Pa. The nitriding duration and temperature were fixed at 240 min and 570 °C, respectively.

To obtain the model (optimization parameter), a second-order algebraic polynomial was used:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

where $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ are regression coefficients;

x_1, x_2 are variable factors.

For recording the experimental conditions and processing the experimental data, factor levels were coded. The following variable factors were adopted:

pressure in the vacuum chamber – x_1 ;

volumetric argon content in the nitrogen mixture – x_2 .

When coding the values of x_1 and x_2 , the upper level is denoted as +1, the lower level as –1, and the zero level as 0.

The coding of factor x_i is determined by the expression:

$$x_i = \frac{Z_i - Z_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

where i is the factor number;

Z_i is the natural value of the i -th factor;

Z_{0i} is the natural value of the zero level of the i -th factor;

ε_i is the variation interval of the i -th factor.

Experimental studies were carried out at the levels and intervals presented in Table 1. The design matrix for the second-order composite rotatable design and the results of the experimental studies are presented in Table 2.

Table 1

Levels and intervals of factor variation

Designation	Factors	Levels of Variation					Variation Interval ε
		– 1,414	– 1	0	+ 1	+ 1,414	
Z_1	Pressure, Pa	55	80	140	200	225	60
Z_2	Volumetric argon content, %	29	35	50	65	71	15

Table 2

Working matrix and results of experimental studies

Nitriding Regime No.	Working Matrix		Microhardness $HV_{0.1}$, MPa	Nitrided Thickness, μm	Layer
	P , Pa	Ar , %			
1	200	65	7651,5	225,0	
2	200	35	9292,4	307,1	
3	80	65	8736,0	133,3	
4	80	35	10110,4	190,0	
5	140	71	7861,6	168,0	
6	140	29	9972,3	265,2	
7	225	50	8307,9	285,1	
8	55	50	9655,6	137,2	
9	140	50	9113,0	223,0	
10	140	50	9113,0	223,0	
11	140	50	9113,0	223,0	
12	140	50	9113,0	223,0	
13	140	50	9113,0	223,0	

Based on the results of experimental studies in accordance with the two-factor rotatable design, empirical mathematical relationships were obtained for the thickness of the nitrided layer (3) and the surface hardness (4) of ShKh15 steel as functions of argon content in the saturating atmosphere and pressure, while maintaining constant values of the other two technological parameters of the nitriding process ($\tau=240\text{min}$ and temperature 570°C). Based on these mathematical relationships, the graphs shown in Figs. 2 and 3 were obtained.

$$h(\mu\text{m})=224.5+52.3x_1-34.3x_2-6.4x_1x_2-6x_{12}-5.8x_{22}, \quad (3)$$

$$\text{HV}_{0.1}=9171.9-476.5x_1-746.3x_2-66.6x_1x_2-68.6x_{12}-205.8x_{22}. \quad (4)$$

It can be seen from Fig. 2 that the thickness and surface hardness of the nitrided layer vary with increasing argon content in the saturating atmosphere. Maximum values of these parameters are achieved at optimal argon concentrations in the saturating atmosphere. In particular, the maximum thickness of the nitrided layer is formed within the range of 22–27%, while the maximum hardness is achieved at a volumetric argon content of 15–20% in the saturating atmosphere.

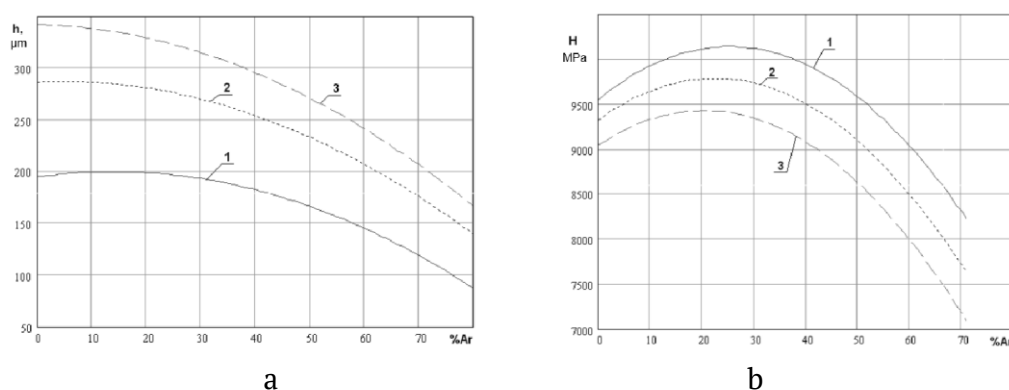


Figure - 2 Dependence of the nitrided layer thickness (a) and surface hardness (b) of ShKh15 steel on the argon content in the saturating atmosphere at different pressures: 1 – 80 Pa; 2 – 150 Pa; 3 – 200 Pa.

Fig. 3 shows the dependences of the thickness and surface hardness of the nitrided layer on the pressure in the vacuum chamber at different argon contents.

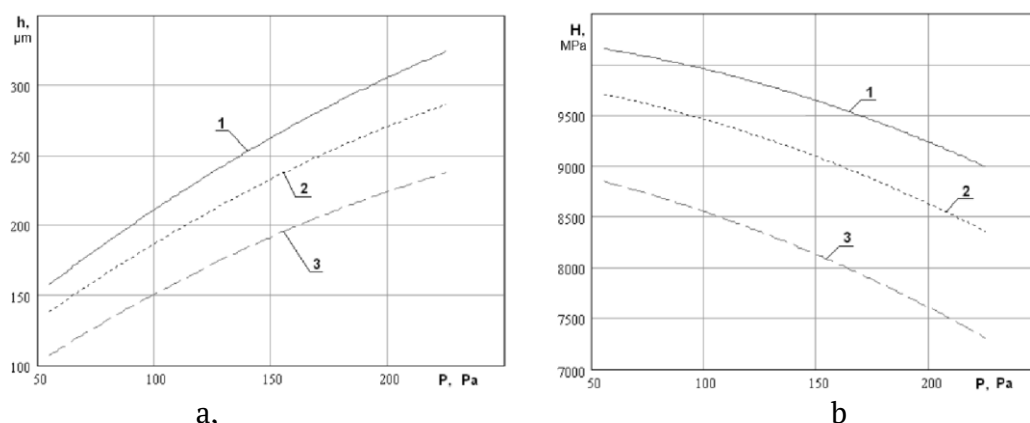


Figure - 3 Dependence of the nitrided layer thickness (a) and surface hardness (b) of ShKh15 steel on the pressure in the vacuum chamber during diffusion saturation at different argon contents in the saturating atmosphere: 1 – 35% Ar; 2 – 50% Ar; 3 – 65% Ar.

It can be seen from Fig. 3 that the thickness of the nitrided layer increases with increasing pressure in the vacuum chamber. This is attributed to an increase in the nitrogen potential of the saturating atmosphere as the pressure rises. In contrast, the hardness of the nitrided layer decreases with increasing pressure. This is due to the fact that, with increasing pressure, the amount of argon increases, and the sputtering process begins to prevail over the adsorption process of the reactive gas.

The technological parameters of the nitriding process have a significant influence on the phase composition of the surface layer and on the hardness distribution through its thickness.

Under different nitriding conditions, different phases are formed on the surface: ε , γ' , and $\alpha(\text{FeN})$. Their ratio affects the hardness and corrosion resistance of the surface layer. The presence of the hard ε -phase (Me_{2-3}N) contributes to improved corrosion resistance of the surface. Studies show that during glow-discharge nitriding in hydrogen-free atmospheres, all three phases may be present on the surface in different proportions. The content of the ε -phase increases with increasing temperature and with increasing pressure in the vacuum chamber.

Fig. 4 presents the hardness distribution profiles through the thickness of the nitrided layer under different nitriding conditions. It can be seen from Fig. 4 and Table 2 that by varying the nitriding conditions, the hardness gradient through the layer thickness can be changed over a wide range. This has a significant influence on the performance characteristics of structural elements.

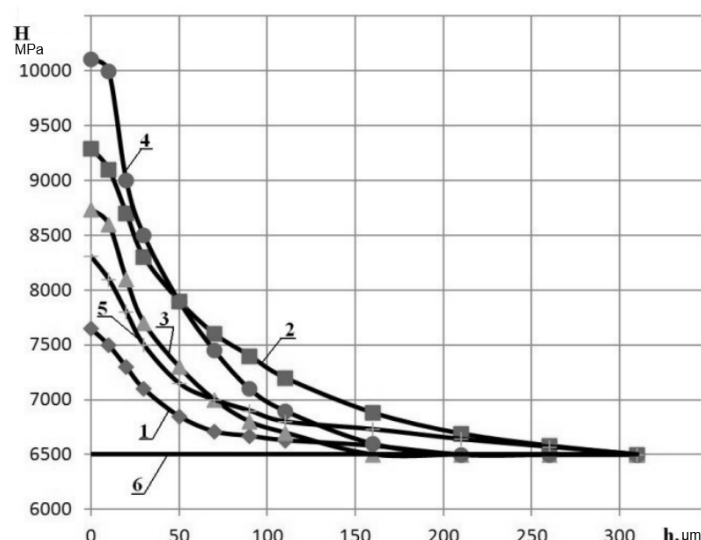


Fig. 4 – Hardness distribution through the thickness of the nitrided layer as a function of nitriding conditions (Table 2): 1–4 – corresponding nitriding conditions; 5 – condition No. 7; 6 – quenching.

Table 4 and Fig. 5 present the results of experimental studies on the wear resistance of ShKh15 steel specimens after different nitriding conditions (Table 2) in a model solution using end-face friction machines under a specific load of 0.5 MPa and a sliding speed of 1.37 m/s.

It can be seen from Table 4 and Fig. 5a that the wear resistance of specimens nitrided under different conditions varies significantly and substantially exceeds that of the quenched specimen. The highest wear resistance was exhibited by specimens nitrided under condition 4. After a friction distance of 5.4×10^3 m, the wear of specimens nitrided under condition 4 was 2.5 times lower than that of quenched specimens.

Table 4

Wear kinetics of shkh15 steel after quenching and ion nitriding in glow discharge under different conditions

Nitriding Condition No.	Wear, μm											
	Test duration, min											
	15	30	45	60	90	120	150	180	210	240	270	300
	Sliding distance $L \times 10^3$, m											
	0,27	0,54	0,81	1,1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,8	4,3	4,9	5,4
1	16	26	35	44	62,5	81,3	101	121	142	164	187	212
2	9	15	19,8	24,9	36	48	61	75	90	106	124	145
3	11	18,2	24,6	31	44	58	73	90	110	135	160	185
4	6	11	15	19	27	35,4	45	55	67	80	95	112
5	14	23	30,7	38,4	54	71	88	105,7	124	145	170	195
6	7,5	13	17	21	30	40	51	63	76	90	106	123
7	12	20,1	27	34	48,3	63	78,3	94,2	112	131	152	174
8	8,3	14	19	23,6	33,7	44	56	68,2	82	97	114	133
9	10	16	21,6	27,3	39	51	65	80	96	112,6	131	151
10	9,79	16,4	22	27,2	40	52	66	81	97	112	132	152
11	10,1	15,6	21	26,8	38,1	50,3	65,7	79	95	111	130	150
12	10,21	16	21,1	27	39,2	51,6	65	79,6	96	113,1	130,8	150,6
13	9,7	16,1	21,8	26,9	38,7	51	64,1	80,3	96,3	112,2	131,1	151,3
quenchin	35	61	76	89	114	139	164	189	214	239	264	289

As shown in Fig. 5b, as the nitrided layer wears out, the wear rate of nitrided specimens gradually approaches the wear rate of quenched steel. This is attributed to the change in hardness through the thickness of the nitrided layer.

Based on experimental studies using a two-factor rotatable design, the following mathematical relationship (5) describing wear as a function of the technological parameters of the nitriding process was obtained:

$$U(\mu\text{m})=152.0+14.8x_1-30.1x_2+1.5x_1x_2+3x_{12}+3.9x_{22} \quad (5)$$

Based on Equation (5), graphs were constructed (Fig. 6) showing the dependence of wear on the technological parameters of the nitriding process. The graphs show that wear increases with increasing pressure and argon content in the saturating atmosphere. This is explained by changes in the properties of the nitrided layer depending on these parameters (Figs. 2–3).

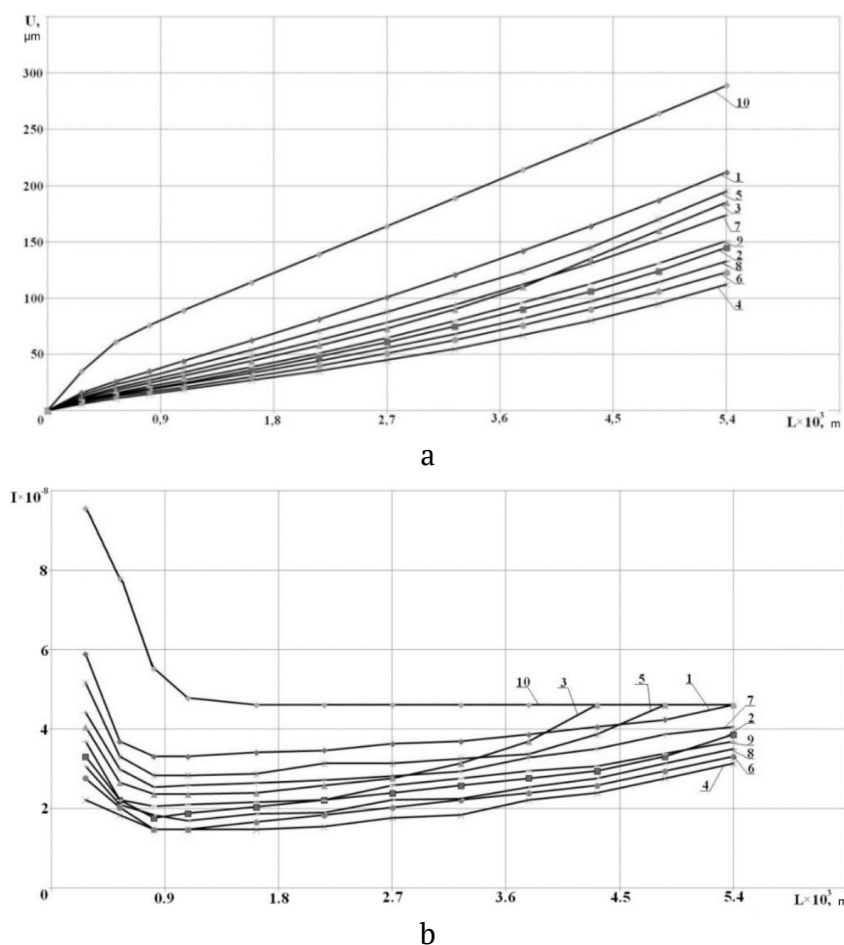


Figure - 5 Dependence of wear (a) and wear rate (b) of ShKh15 steel after quenching and nitriding under different conditions: 1–9 – nitriding conditions; 10 – quenching.

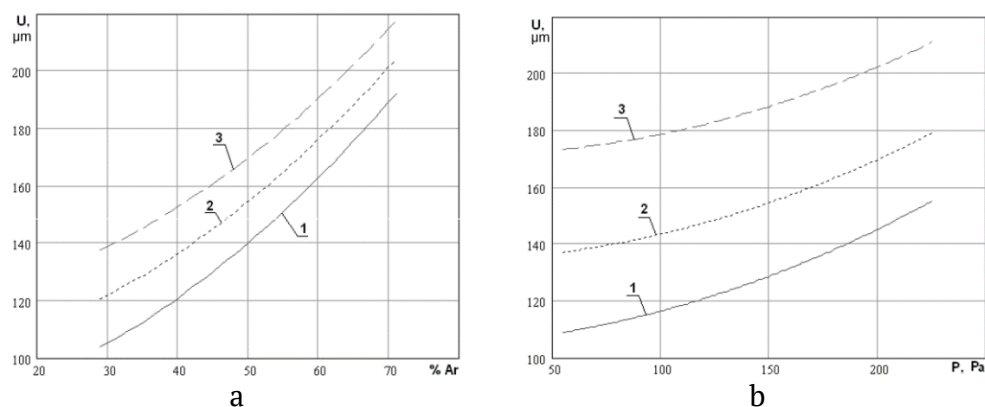


Figure - 6 Dependence of wear of ShKh15 steel on argon content (a) and pressure (b) in the saturating atmosphere ($\text{N}_2 + \text{Ar}$): a – at pressures: 1 – 80 Pa; 2 – 150 Pa; 3 – 200 Pa; b – at argon contents: 1 – 35% Ar; 2 – 50% Ar; 3 – 65% Ar.

Conclusions. Thus, the conducted studies of the properties of the nitrided layer formed during glow-discharge nitriding in hydrogen-free atmospheres, as well

as its wear behavior in a model solution for ShKh15 steel, have shown that these properties can be varied over a wide range by adjusting the technological parameters of the nitriding process and optimized according to the criteria of maximum wear resistance, surface hardness, and nitrided layer thickness.

REFERENCES

1. Fesenko, A. H., et al. (2015). Methods of surface strengthening in the manufacturing of machine parts. Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, RVV DNU.
2. Bilyk, I. I., & Rudenkyi, S. O. (2023). Technology of coating deposition and their properties. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
3. Kaplun, P., Honchar, V., Rudyk, O., Golenko, K., & Poberezhnyi, M. (2022). Investigation of corrosion and wear resistance of steels nitrided in a glow discharge in distilled water. Problems of Tribology, 27(3), Article 105.
4. Kaplun, P. V. (2004). Influence of coatings on wear resistance and durability of rolling bearings (Extended abstract of PhD dissertation). Kyiv.

Received 16.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

УДК 621.891

Володимир Гонча, Олександр Рудик

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ АЗОТОВАНОЇ СТАЛІ ШХ15 В АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Анотація. Досліджено зносостійкість азотованої сталі ШХ15 в абразивному середовищі після азотування в тліючому розряді у безводневих азотно-аргонових середовищах. Проаналізовано вплив технологічних параметрів, зокрема тиску та вмісту аргону, на товщину, твердість, фазовий склад і градієнт твердості азотованих шарів із використанням двофакторного рототабельного планування. Розроблено емпіричні математичні моделі, що описують властивості азотованого шару та процес зношування. Експериментально встановлено, що зносостійкість, твердість поверхні та товщину азотованого шару можна керувати змінювати й оптимізувати шляхом варіювання режимів азотування. Найвищу зносостійкість досягнуто за оптимальних параметрів азотування, що суттєво перевищує показники гартованої сталі.

Ключові слова: зносостійкість, азотовані шари, тліючий розряд, абразивне середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навчальний посібник / [А.Г. Фесенкота ін.]; Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2015. – 103 с.
2. Білик І.І., Руденький С.О. Технологія нанесення покриттів та їх властивості. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
3. Kaplun P., Honchar V., Rudyk, O., Golenko, K., Poberezhnyi M. Investigation of corrosion and wear resistance of steels nitrided in a glow discharge in distilled water. Problems of Tribology, 2022. Vol. 27. № 3 (105).
4. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: автореф. дис. канд. тех. наук / Київ 2004.–С. 20.

Гонча Володимир Антонович – к.т.н., доц. кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства Хмельницького національного університету Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3719-1408>

Рудик Олександр Юхимович – к.т.н., доц. кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства Хмельницького національного університету, Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6937-1366>

Volodymyr Honchar – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Tribology, Automobiles and Materials Science, Khmelnytskyi National University, Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3719-1408>

Oleksandr Rudyk – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Tribology, Automobiles and Materials Science, Khmelnytskyi National University, Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6937-1366>

ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR OBTAINING A HIGH-STRENGTH HEAT-RESISTANT ALLOY WITH REDUCED DENSITY IN LABORATORY CONDITIONS

Abstract. *The work presents a systematic analysis of modern electrothermal equipment used to obtain high-strength heat-resistant nickel-based alloys with reduced density in research laboratory conditions. The relevance of the study is due to the needs of the aviation and energy industries for materials capable of operating at high temperatures, cyclic loads and in aggressive environments while simultaneously reducing the mass characteristics of parts. A comparative assessment of electric arc furnaces, vacuum arc and electroslag remelting installations, vacuum induction and electron beam systems has been carried out from the standpoint of metal purity, chemical composition stability, the possibility of precise alloying and suitability for use in laboratory conditions. It has been established that laboratory arc furnaces are appropriate for the initial development of alloy compositions, while electron beam installations are effective for obtaining ultrapure materials, but have significant economic limitations. It is shown that vacuum induction melting provides an optimal balance between the depth of refining, the accuracy of the introduction of alloying elements, the homogeneity of the structure and energy efficiency. Criteria for selecting laboratory equipment for the synthesis of new generation heat-resistant alloys are formulated, taking into account technological and infrastructural limitations. The results obtained can be used in the creation of mobile laboratory complexes for the research and development of new heat-resistant materials.*

Keywords: *heat-resistant alloys, nickel alloys, vacuum arc remelting, electron beam melting, vacuum induction melting*

Statement of the Problem

A key priority of modern aircraft engineering is to increase the service life of critical components while simultaneously reducing their inertial and mass characteristics. In this context, the specific gravity of a gas turbine engine serves as a

fundamental parameter that links structural design with performance optimization. Further improvements require the development of advanced materials that can reliably operate under combined variable dynamic loads, high-frequency cyclic stresses, and significant thermal effects associated with extreme temperature conditions and the interaction of high-speed gas flows with the surface of the component [1].

A significant obstacle to the creation of new heat-resistant alloys is that due to the rapid development of technologies, the use of "classical" nickel-based alloys in today's realities is irrelevant. For example, in the aircraft industry, nickel-based heat-resistant alloys have reached their ceiling of capabilities, which is caused by working in conditions of achieving 85% of the temperature solidus [2, 3].

There are several ways to increase the heat resistance of parts. The main ones include optimizing the chemical composition of nickel alloys by predicting the specified characteristics using numerical methods [4-6] and using single-crystal structures in the manufacture of critical parts operating in extreme temperatures [7]. The first method involves alloying heat-resistant alloys with transition metals such as molybdenum, tungsten, and tantalum. In order to create heat-resistant alloys of the V generation, technological processes for additional economical alloying with elements such as rhenium and ruthenium are being developed [8, 9]. The exclusion of carbon from the alloy composition allows you to increase the solidus temperature to 1360 °C. This is an advantage of single-crystal blades of aircraft turbines, in which, due to the absence of high-angle grain boundaries, it is possible to exclude hafnium and carbon from the alloy. Also, minimization of carbon in the alloy composition is possible due to atmosphere-free melting.

In this regard, there is a need to conduct a comprehensive system analysis of existing technological solutions from the point of view of their functional capabilities for obtaining experimental heat-resistant nickel-based alloys of the V generation in a research laboratory. The organization of a research laboratory in conditions of military aggression imposes certain restrictions. Such restrictions include, first of all, the available area for placing equipment, as well as the permissible installed electrical connection capacity. Therefore, the scientific and practical task of the study is to substantiate the selection criteria and determine the most optimal type of technological equipment that will ensure the production of

experimental alloys with a given set of physical, mechanical and operational characteristics in laboratory production.

Analysis of recent research and publications

The problem of obtaining high-strength heat-resistant alloys with reduced density requires the use of precision equipment capable of ensuring high purity of the metal and precise control of melting parameters. Modern foundry equipment for metallurgical research in the manufacture of precision alloys is represented by a wide range of nomenclature units - from classic arc furnaces to complex electron-beam installations. The main equipment for smelting heat-resistant alloys based on nickel is equipment that operates on the principle of converting electrical energy into thermal energy. The main equipment in this direction is electric arc furnaces, the basic principles of which were laid down at the beginning of the 20th century. Despite the more than 125-year history since the creation of the first electric arc furnace, their designs are constantly being improved. In the works [10], modern aspects of steelmaking in electric arc furnaces are considered in detail, while Maia T. A. C. and Onofri V. C. D focus on the analysis of electrical furnace-ladle systems [11]. The issue of designing and building arc furnaces specifically for metallurgical and semiconductor research is highlighted in [12], which is critically important for the creation of research laboratories.

To obtain alloys with special properties, in particular heat-resistant ones, the use of vacuum is key. The historical and technical basis of electric vacuum furnaces was laid in the early works of Arsem W. C., and the development of vacuum-arc remelting (VAR) methods with a consumable electrode is described in the studies of Gruber H. [13, 14]. Modern technologies for smelting zirconium alloy ingots by the VAR method confirm the possibility of using this approach to obtain high-purity materials [15].

Electroslag remelting furnaces are an important equipment in the smelting of precision alloys [16]. The features of melting heat-resistant alloys with reduced density in chamber electroslag furnaces are devoted to separate works [17, 18], in which a comparative physicochemical analysis of electroslag remelting with a consumable electrode and refining with liquid metal was carried out.

The most common equipment for creating experimental grades of heat-resistant steels in laboratory conditions is equipment that works due to induction

methods of melting metals. The works of Saunders C. consider the use of vacuum induction electron-beam furnaces for engineering tasks of creating innovative alloys [19]. Particular attention is drawn to the possibility of purifying alloys with hydrogen in vacuum induction furnaces to achieve ultra-high purity [20]. Research into the issue of energy balance during metal melting in induction and arc furnaces [21] indicates the prospects of vacuum arc furnaces for creating a laboratory complex of equipment for studying the processes of creating the latest heat-resistant alloys. Separately, it is necessary to highlight the use of centrifugal induction furnaces for casting titanium alloys, which allows obtaining complex parts with high accuracy [22], which is an additional advantage when creating single-crystal compounds.

Separately, it is worth paying attention to the equipment, the principle of which is based on electron beam technologies (EB). For example, using the processing of zirconium alloys, a team of scientists in [23] considered electron beam remelting furnaces as an effective tool for processing refractory waste and microfabrication. Despite the high cost of the process, Matsui S. proves the possibility of using such equipment in the field of electron beam microprocessing [24]. Despite the wide coverage in open access sources of industrial installations and individual methods of remelting refractory alloys, there is still a need for a comprehensive analysis to develop the optimal configuration of highly mobile laboratory equipment for the creation and study of the properties of high-strength refractory alloys based on nickel.

Purpose of the Study

The purpose of the study is to conduct a comparative analysis of modern electrothermal equipment to select the optimal technological scheme for smelting high-strength heat-resistant alloys with reduced density in laboratory conditions, which will ensure high purity of the metal and stability of its physicochemical properties.

Statement of the main research material

Analysis of open sources of scientific and technical information allows us to identify the following equipment that can be used in the creation of innovative heat-resistant alloys:

- electric arc furnace (EAF);
- vacuum arc remelting furnace (VAR);

- electroslag remelting furnace (ESR);
- vacuum induction furnace (VIM), which also includes centrifugal casting induction furnaces;
- electron beam installation (EB).

Within the framework of the conducted study, the disadvantages and advantages of each of the groups of proposed equipment were highlighted, which are given in Table 1. According to the analysis of the ordered advantages and disadvantages, three groups of equipment can be distinguished as the most promising for obtaining heat-resistant alloys with reduced density in laboratory conditions:

- laboratory arc furnaces - for initial development of the recipe of small samples of refractory components;
- vacuum induction machines (VIM) – due to the possibility of precise control of chemical composition and deep refining, as well as the possibility of creating single-crystal systems;
- for the case of obtaining ultra-pure alloys or processing specific raw materials (scrap), electron beam systems are best suited.

Therefore, the main emphasis of further research was shifted to these three groups of equipment. The designs of electric arc furnaces (Fig.1) have been known since the beginning of the last century and are reliable and predictable in operation. The technological processes of smelting alloys in electric arc furnaces are quite simple and well-established in organizational terms. However, despite the high temperature of the arc, which allows working with refractory metals, this method has the following limitations for the development of new alloys with reduced density:

the electric arc creates a zone of extremely high temperatures at the point of contact, which leads to the evaporation of light alloying elements (Al, Mg, Li), which must be introduced into the melt when creating heat-resistant alloys with low density [10, 25];

difficulties with homogenization – in arc furnaces there is no intensive electrodynamic mixing, typical for induction systems, which often leads to chemical inhomogeneity of the ingot (liquefaction) in small volumes [21];

contamination with electrode material, which is critical in creating heat-resistant alloys of the V generation [14];

vacuum arc remelting (VAR) has special limitations in preparation for melting, as it requires the preliminary manufacture of a consumable electrode of a certain shape, which significantly complicates the process of creating new experimental alloys in laboratory conditions [14].

Table 1

Analysis of the advantages and disadvantages of electrothermal equipment for the production of heat-resistant alloys

Equipment type	Main purpose and features	Benefits for research	Limitation
Electric arc furnace (EAF)	Melting of the charge using an electric arc.	Ability to work with refractory metals, flexibility in system configuration.	Difficulty in controlling cleanliness without vacuum, high energy consumption.
Vacuum arc remelting (VAR)	Remelting of the consumable electrode in a vacuum.	High degree of purification from gases, obtaining dense ingots of zirconium and other alloys.	The need for a pre-fabricated electrode, the cyclical nature of the process.
Electroslag remelting (ESR)	Refining the metal through a layer of active slag.	Effective removal of non-metallic inclusions, possibility of melting titanium alloys.	High thermal inertia, complexity of implementation on a micro-scale.
Vacuum induction furnace (VIM)	Heating of metal by induction currents in a vacuum chamber.	Possibility of precise alloying, hydrogen refining, and obtaining ultra-high purity alloys.	Possibility of precise alloying, hydrogen refining, and obtaining ultra-high purity alloys.
Electron beam installation (EB)	Melting by a directed electron flow in a deep vacuum.	The highest level of vacuum, the possibility of scrap processing, precision micromachining.	High cost of equipment, complexity of operation.
Centrifugal induction furnace	Combining induction heating with centrifugal casting.	Obtaining high-precision shaped castings.	Limitations on the geometry and mass of castings.



Figure 1 – Model of an electric arc furnace with a rolling hearth in the laboratory of the Department of Metallurgical Equipment of Zaporizhzhia National University

Although electron beam (EB) technologies are considered as an effective tool for the processing of refractory waste [23, 24], there are a number of insurmountable obstacles that significantly limit their use within a small research laboratory with little funding, namely:

- deep vacuum in combination with high beam energy causes intensive evaporation of metals with high vapor pressure, such as chromium and aluminum [19]. This leads to an increase in the cost of manufacturing alloys with reduced density in such installations;

- creation of an electron beam installation requires complex beam focusing systems, high-voltage power supplies and continuous service, which is economically impractical in a small laboratory [19, 23, 24].

- due to selective evaporation of elements under the beam, the final chemical composition of the ingot may differ significantly from the calculated one, which requires several iterations of experiments and cost analyses [23].

- most laboratory EB systems are focused on microprocessing or scrap refining, rather than on the synthesis of multicomponent alloys with precise dosage of alloying elements [23].

The designs of vacuum induction furnaces (Fig.2) satisfy the basic requirements for minimizing the occupied area and relatively economical energy consumption. The advantages of vacuum induction furnaces include:

- high purity and refining of the metal - the melting process in a deep vacuum provides effective degassing of the melt (removal of nitrogen and oxygen), which is critical for heat-resistant alloys. As noted in studies [20], the use of hydrogen refining in induction furnaces allows for the production of ultra-high purity alloys, which directly affects the indicators of long-term strength and plasticity of the material.

- unlike arc furnaces, where uncontrolled burnout of alloying elements in the arc zone is possible, induction heating ensures composition stability. This allows the introduction of light alloying elements (for example, aluminum or lithium) to reduce the density of the alloy with high dosing accuracy [27-29].

- electrodynamic forces arising in the induction furnace ensure natural mixing of the liquid metal. This guarantees homogeneity (uniformity) of the chemical composition throughout the volume of the sample, which is especially important when developing new alloying systems on a laboratory scale;

- allow for precise control of the melt overheating temperature and holding time, which is necessary for complete dissolution of refractory components and formation of the optimal primary structure of the ingot.

- the design of modern laboratory induction furnaces often allows for the integration of centrifugal casting systems [22], which makes it possible not only to obtain an alloy, but also to manufacture prototypes of complex shape from it for further mechanical testing.



Figure 2 – Vacuum induction furnace of the company Zhuzhou Hanhe Industrial Equipment Co., Ltd. [26]

Thus, vacuum induction melting is the most rational method for laboratory research of high-strength heat-resistant alloys with reduced density, since it provides the best balance between material purity, alloying accuracy and the ability to control the structure of the future alloy. But it is worth noting that in the event of military aggression, there are somewhat limited opportunities for the delivery of foreign equipment. Therefore, an important technical issue arises of developing highly mobile laboratory complexes with the possibility of their reproduction with a minimum fleet of mechanical equipment and using the technological capabilities of domestic enterprises.

Conclusions. Thanks to the research, the criteria for selecting laboratory equipment for the synthesis of multicomponent systems based on nickel have been generalized, taking into account the specifics of introducing light alloying elements to reduce the specific gravity of the heat-resistant alloy. The relationship between the design features of vacuum-induction systems and the possibility of implementing hydrogen refining in micro-volumes of the melt to obtain heat-resistant structures has been established. The use of induction heating methods as the most effective way to minimize liquation heterogeneity when obtaining high-strength heat-resistant light alloys in laboratory conditions has been substantiated.

REFERENCE

1. Potapov O. M. Composites: prospects for the use in the space and rocket equipment. *Kosmìčna nauka ìtehnologìà*. 2015. Vol. 21, no. 5(96). P. 69–74. <https://doi.org/10.15407/knit2015.05.069>
2. Zalewski P., Kachel S., Motyl K. Space rocket for air-rocket system. *Journal of Konbin*. 2023. Vol. 53, no. 2. P. 45–64. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7125>
3. Aircraft Gas Turbine Engine Testing / S. Fábry et al. *Acta Avionica Journal*. 2019. P. 39–44. <https://doi.org/10.35116/aa.2019.0016>
4. Glotka O. A., Olshanetskii V. Y. Mathematical Prediction of the Properties of Heat-Resistant Nickel Alloys After Directional Crystallization. *Materials Science*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00716-z>
5. Gaiduk S. V., Kononov V. V., Kurenkova V. V. Regression Models For Prediction of Corrosion Parameters of Casting Heat-resistant Nickel Alloys. *Modern electrometallurgy*. 2016. Vol. 2016, no. 3. P. 51–56. URL: <https://doi.org/10.15407/sem2016.03.08>
6. Glotka O. A., Gayduk S. V., Olshanetskiy V. Y. The distribution of alloying elements in secondary carbides of heat-resistant nickel alloys. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*. 2020. Vol. 95, no. 3. P. 25–36. URL: <https://doi.org/10.15407/mom2020.03.025>
7. Kvasha Y. A., Zinevych N. A. Aerodynamic improvement of an aircraft gas-turbine engine fan. *Technicalmechanics*. 2021. Vol. 2021, no. 3. P. 23–29. <https://doi.org/10.15407/itm2021.03.023>
8. Rudy E., Kieffer B., Fröhlich H. Untersuchungen im System Ruthenium-Rhenium. *International Journal of Materials Research*. 1962. Vol. 53, no. 2. P. 90–92. URL: <https://doi.org/10.1515/ijmr-1962-530206>
9. Thermal shock behavior of potassium doped and rhenium added tungsten alloys / S. Nogami et al. *Physica Scripta*. 2020. T171. P. 014020. URL: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab3dcc>
10. Visuri V.-V., Echterhof T. Electric Arc Furnace Steelmaking. *Metals*. 2025. Vol. 15, no. 12. P. 1285. URL: <https://doi.org/10.3390/met15121285>
11. Maia T. A. C., Onofri V. C. Survey on the electric arc furnace and ladle furnace electric system. *Ironmaking & Steelmaking*. 2022. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2128550>
12. Barbouche M., Hajji M., Ezzaouia H. Electric arc furnace design and construction for metallurgical and semiconductor research. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 82, no. 5-8. P. 997–1006. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7424-4>
13. Arsem W. C. The electric vacuum furnace. *Journal of the American Chemical Society*. 1906. Vol. 28, no. 8. P. 921–935. URL: <https://doi.org/10.1021/ja01974a001>
14. Gruber H. Consumable-electrode vacuum arc melting. *JOM*. 1958. Vol. 10, no. 3. P. 193–198. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03397883>
15. Technology for smelting zirconium alloy ingots by vacuum arc remelting with consumable electrode / O. Y. Kapustian et al. *Sovremennaâ èlektrometallurgìà*. 2022. Vol. 2022, no. 1. P. 40–46. URL: <https://doi.org/10.37434/sem2022.01.05>
16. Reconstruction of electroslog-remelting furnaces / A. I. Panchenko et al. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42, no. 10. P. 721–723. URL: <https://doi.org/10.3103/s0967091212100105>
17. Technological And Metallurgical Peculiarities Of Melting The Titanium Alloy Ingots In Chamber-type Electroslog Furnaces / I. V. Protokovilov et al. *Sovremennaâ èlektrometallurgìà*. 2018. Vol. 2018, no. 2. P. 45–51. URL: <https://doi.org/10.15407/sem2018.02.06>

18. Physicochemical comparison of electroslog remelting with consumable electrode and electroslog refining with liquid metal / G. Polishko et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 46, no. 8. P. 789–793. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1428419>
19. Saunders C. Application of vacuum processes in engineering including electron beam welding, vacuum furnaces and metallizing. *Vacuum*. 1980. Vol. 30, no. 4-5. P. 167–173. URL: [https://doi.org/10.1016/s0042-207x\(80\)80679-8](https://doi.org/10.1016/s0042-207x(80)80679-8)
20. Making high-purity alloys in induction vacuum furnaces with hydrogen refining. *Vacuum*. 1966. Vol. 16, no. 7. P. 409. URL: [https://doi.org/10.1016/0042-207x\(66\)90327-7](https://doi.org/10.1016/0042-207x(66)90327-7)
21. Sh.B. Tashbulatov N. M. S. ,, N.X. Tadjiev N. X. T., M.N. Gaybullaev M. N. G. Energy Balance In Steel Liquefaction In Induction Furnaces And Electric Arc Furnaces. *Academicia Globe: Inderscience Research*. 2024. Vol. 1, no. 2. P. 9. URL: <https://doi.org/10.47134/academicia.v1i2.9>
22. Casting of Titanium Alloys in Centrifugal Induction Furnaces / A. Karwiński et al. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 59, no. 1. P. 403–406. URL: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0068>
23. On the melting of zirconium alloys from scraps using electron beam and induction furnaces – recycling process viability / L. A. T. Pereira et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, no. 3. P. 4867–4875. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.006>
24. MATSUI S. Electron beam microfabrication. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 1989. Vol. 55, no. 2. P. 279–284. URL: <https://doi.org/10.2493/jjspe.55.279>
25. Some Problems on Large Electric Arc Furnace. DENKI-SEIKO[ELECTRIC FURNACE STEEL]. 1960. Vol. 31, no. 4. P. 206–213. URL: <https://doi.org/10.4262/denkiseiko.31.206>
26. Customized Vacuum Induction Melting Furnace. /. URL: <https://uk.zzhgy.com/customized-vacuum-induction-melting-furnace-product/> (date of access: 08.02.2026)
27. Phase Stability of Low-Density, Multiprincipal Component Alloys Containing Aluminum, Magnesium, and Lithium / X. Yang et al. *JOM*. 2014. Vol. 66, no. 10. P. 2009–2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1059-z>
28. Research Progress of Heat Resistant Magnesium Alloys / X. Wang et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2160, no. 1. P. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2160/1/012015>
29. Shyam A., Bahl S. Heat-resistant aluminium alloys. *Nature Materials*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01436-6>

Received 18.03.2026.

Accepted 20.04.2026.

Published 30.04.2026

УДК 621.78.04

Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Власов А.О., Шейко С.П., Гарус Д.В.

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ ВИСОКОМІЦНОГО ЖАРОСТІЙКОГО СПЛАВУ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ

Анотація. Сучасний розвиток авіаційної та енергетичної техніки обумовлює зростання вимог до матеріалів, що працюють в умовах високих температур, складного напружено-деформованого стану та інтенсивних термоциклічних

навантажень. Особливої актуальності набуває створення високоміцних жаростійких сплавів на основі нікелю зі зниженою щільністю, що дозволяє одночасно підвищувати ресурс відповідальних деталей та зменшувати масу конструкцій. Водночас традиційні нікелеві жаростійкі сплави наближаються до межі своїх експлуатаційних можливостей, що зумовлює необхідність розробки нових багатокомпонентних систем легування та вдосконалення технологій їх отримання.

Метою роботи є проведення комплексного порівняльного аналізу сучасного електротермічного обладнання для вибору оптимальної технологічної схеми лабораторного отримання експериментальних жаростійких сплавів зі зниженою щільністю. У роботі розглянуто особливості застосування електродугових печей, установок вакуумно-дугового переплаву, електрошлакового переплаву, вакуумно-індукційних та електронно-променевих систем з урахуванням їх технологічних можливостей, енергетичних характеристик, рівня вакууму, стабільності хімічного складу та можливостей рафінування металу.

Показано, що електродугові печі доцільні для первинного відпрацювання рецептур сплавів та роботи з тугоплавкими компонентами, проте характеризуються обмеженими можливостями контролю чистоти металу. Установки вакуумно-дугового та електрошлакового переплаву забезпечують високий рівень очищення металу, однак мають технологічні обмеження для швидкого створення нових експериментальних композицій у лабораторних умовах. Електронно-променеві технології забезпечують надвисоку чистоту металу, але характеризуються високою вартістю та складністю експлуатації.

Встановлено, що найбільш раціональним рішенням для лабораторного синтезу багатокомпонентних жаростійких сплавів є вакуумно-індукційне плавлення, яке забезпечує ефективну дегазацію, високу точність легування, гомогенізацію розплаву та можливість отримання зливків із прогнозованою структурою. Сформульовано критерії вибору лабораторного обладнання з урахуванням обмежень виробничої площі, енергоспоживання та доступності технологічної інфраструктури. Отримані результати можуть бути використані при створенні мобільних лабораторних комплексів для дослідження та розробки нових жаростійких матеріалів.

Ключові слова: жаростійкі сплави, нікелеві сплави, вакуумно-дуговий переплав, електронно-променеве плавлення, вакуумно-індукційне плавлення

Гречаний Олексій Миколайович, доктор філософії (Ph.D.), доцент, доцент кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет, доцент кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проектування, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 0000-0003-0524-4998, **Hrechanyi Oleksii**, Ph.D., Docent, Associate Professor of Departament Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Computer Design, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, 0000-0003-0524-4998

Васильченко Тетяна Олександрівна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет, доцент кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проектування, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 0000-0002-0340-3900

Vasilchenko Tetyana, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Departament Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Computer Design, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, 0000-0002-0340-3900

Власов Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет, доцент кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проектування, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 0000-0003-3253-6435

Vlasov Andrii, Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of Departament Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Computer Design, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, 0000-0003-3253-6435

Шейко Сергій Петрович канд. техн. наук, доцент, професор кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет, 0000-0001-5761-

Sheyko Sergiy, Senior Lecturer, Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor of Departament Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University 0000-0001-5761-4263

Гарус Дмитро Валерійович, магістрант кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет, 0009-0006-3553-4901

Harus Dmytro, magister of Departament Metallurgical Equipment Zaporizhzhia National University, 0009-0006-3553-4901

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ НА СТРУКТУРУ ВАЛКОВИХ ЧАВУНІВ

Анотація. У статті розглядається вплив рідкісноземельних металів на мікроструктуру валкових чавунів. Наведено аналіз сучасного стану вальцеливарного виробництва та питання у обраному напрямку дослідження. Протягом багатьох років у вальцеливарному виробництві ведуться роботи із заміни магнію іншими модифікаторами. Аналіз наявних досліджень і публікацій охоплює питання, що зосереджені на окремих складниках, тоді як модель модифікування чавунних валків РЗМ потребує подальшого дослідження та узагальнення. Метою статті є встановлення карбідоутворюючої здатності різних РЗМ у білих валкових чавунах. Для досягнення цієї мети була поставлена наступна задача – установити вплив хімічних елементів церієвої та ітрієвої підгруп РЗМ на мікроструктуру валкового чавуну. Обґрунтувати вибір РЗМ для обробки білих валкових чавунів. Виявлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – самарію та церію та ітрієвої підгрупи – гадолінію та ітрію при швидкості охолодження, що має місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків. Встановлені індивідуальні закономірності впливу досліджених підгруп рідкісноземельних металів на мікроструктуру відрізняються інтервалами їх залишкових вмістів. Модифікування білого чавуну РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту. Встановлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів підгруп на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків: карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи була у 5,2 рази більшою за церієву підгрупу. Це дало можливість обґрунтувати тип основи комплексного модифікатора для досягнення необхідних властивостей матеріалу прокатних валків.

Ключові слова: валковий чавун, рідкісноземельний метал, структурний складник, карбідоутворююча здатність, модифікування чавуну, мікроструктура чавуну, структуроутворення, евтектичні перетворення

Вступ. Чавунні прокатні валки є складними виливками, в яких поверхневий робочий шар представлений білим (або половинчастим з кулястим або пластинчастим графітом), а серцевина - сірим чавуном з графітом таких же форм [1]. Якість литих чавунних валків, їх службові властивості залежать від багатьох факторів, але, головним чином, від фізико-хімічних властивостей застосовуваних розплавів і процесів, що протікають у період затвердіння та подальшого охолодження в ливарній формі. Застосовувані на прокатних станах нині валки з модифікованого чавуну різноманітні за розмірами та призначенням, виготовляються з різною структурою та механічними властивостями [2]. Питанням технології лиття валків із такого чавуну, дослідженням структури, механічних та теплофізичних властивостей цього валкового матеріалу присвячено роботи багатьох українських дослідників [3-5].

Автором [6] було досліджено п'ять (церій, ітрій, лантан, неодим і празеодим) з шістнадцяти рідкісноземельних металів церієвої групи та наведено експериментально-теоретичні основи отримання ітрієвого чавуну для виробництва деталей відповідального призначення в галузях народного господарства. Що ж до способів введення модифікаторів, були вивчені різні способи їх введення. Найкращим вважається примусове занурення.

Великий інтерес представляють комплексні модифікатори, застосування яких розширює можливості отримання чавунів із широким діапазоном структур та властивостей.

В Україні у сімдесяті роки були розроблені склади комплексних модифікаторів на базі рідкісноземельних металів та ітрію [7]. Промислове випробування таких комплексних модифікаторів на чавунах електропічних плавок показало перспективність їх застосування. Отже, питання щодо складу комплексних модифікаторів досі залишається дискусійним. Так, наприклад, в Україні отримано велику кількість патентів та авторських свідоцтв на склади комплексних модифікаторів для отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом. Часто в них наводяться відомості, викликані, очевидно, різними умовами виробництва. У ряді модифікаторів обґрунтовується необхідність високих вмістів кальцію, в інших – навпаки, низьких. Як основний

модифікувальний елемент вводяться магній, церій, ітрій, лантан, рідкісноземельні метали, фториди ітрію, фториди рідкісноземельних металів, кальцій та інші. У роботі [8] пропонується діаграма вибору модифікаторів для чавунів і показано, що ефект сфероїдизації визначається створенням відповідними модифікаторами бар'єру в рідкій фазі на межі кристалів графіту в процесі їх зростання. Найбільш сильними модифікаторами, згідно з діаграмою, є магній, ітрій, церій, лантан і гадоліній.

В даний час кількість комплексних модифікаторів перевищує дві тисячі складів, до яких входять графітізуючі, стабілізуючі, сфероїдизуючі та інші компоненти. Найбільша кількість модифікаторів створена на основі феросиліцію, для посилення модифікуючої дії якої вводять цирконій, барій, стронцій, титан, рідкісноземельні та інші хімічні елементи. В інших випадках використовують безкремнієві модифікатори. Точних даних про ефективність модифікаторів немає, незважаючи на те, що у науково-технічній літературі наведено результати численних експериментальних досліджень. Це, очевидно, тим, що ефективність тих чи інших модифікаторів залежить від різноманітних умов виробництва. Тому вибір модифікаторів роблять експериментальним шляхом. Вальцеливарне виробництво, як складний тип виробництва, що охоплює використання білих, половинчастих і сірих чавунів, потребує експериментальних досліджень з відпрацювання та оптимізації складів комплексних модифікаторів для отримання високоякісних чавунів і в робочому шарі, і в серцевині прокатних валків. Аналіз тенденцій розвитку цього виду техніки показав, що розвиток його йде за такими основними напрямками: удосконалення хімічного складу ливарних сплавів, способів їх отримання та складів лігатур.

До РЗМ відповідно до промислової класифікації металів [9] відносяться хімічні елементи з номерами 57...71 Періодичної системи Д. І. Менделєєва, що мають однакову кількість електронів на зовнішній оболонці атомів і відповідно схожі фізико -хімічні властивості. До рідкісноземельних також відносять близькі до них перехідні метали третьої групи – хімічні елементи з порядковим номером 39 та 21 – ітрій та скандій.

Рідкісноземельні елементи ділять на дві підгрупи [10-12]: церієву (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) і ітрієву (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tu, Lu).

Фізичні властивості РЗМ, а також дані про їх кристалічну структуру вперше були узагальнені Гшнейдером і доповідалися на симпозіумі РЗМ в 1959 р. у Чикаго.

Самарій (лат. Samarium) Sm - атомний номер 62, атомна маса 150,36, атомний радіус 1,802А, густина 7,536 г/см³ температура плавлення 1345K (1072 ± 5°C), температура поліморфного перетворення 1193K9 (1670°C). Самарій не сильно окислюється, проте має дуже високий тиск пари.

Гадоліній (лат. Gadolinium) Gd – атомний номер 64, атомна маса 157,25, атомний радіус 1,802А, густина 7,886 г/см³ температура плавлення 1585K (1312 ± 15°C), температура кипіння 3103K, гадоліній та самарій мають дуже близькі значення радіусів атомів, але відрізняються кристалічними структурами, через те, що гадоліній має гексагональну структуру типу магнію.

Церій (лат. Serium) Ce – атомний номер 58, атомна маса 140,12, атомний радіус 1,71А, густина 6,789 г/см³ температура плавлення 1077K (804 ± 5°C), температура кипіння 3743K (3470 °C).

Ітрій (лат. Yttrium) Y – атомний номер 39, атомна маса 88,9059, атомний радіус 1,801А, густина 4,472 г/см³ температура плавлення 1825K (1552 ± 15°C), температура кипіння 2903K (2630°C).

В Україні модифікований чавун вперше було отримано в інституті машинознавства та сільськогосподарської механіки АН УРСР у 1948 році [13]. Після цього в дослідження цього чавуну включився цілий ряд інститутів (ЦНДІТмаш, ДМетІ та ін). В Україні як основний модифікатор для отримання прокатних валків застосовується чистий магній або лігатури на його основі. При обробці валкового розплаву магнієм виникають труднощі, пов'язані з інтенсивним випаром, що тягне за собою викиди металу, піроефекти, загазованість приміщень. Тому протягом багатьох років ведуться роботи із заміни магнію іншими модифікаторами.

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом, поряд з такими сплавами, як фероцерій, мішметал для поліпшення властивостей чавуну, все більше застосування знаходять комплексні модифікатори (КМ) на основі РЗМ. Цей напрямок знаходить все більшого поширення у зв'язку із відносною простотою використання КМ порівняно з обробкою металевим магнієм. Автори [3, 4] дійшли єдиної думки, що для зниження концентрації неметалевих включень у

вибіленому шарі прокатних валків необхідна при модифікуванні чавунного розплаву заміна магнію РЗМ. Вплив модифікаторів на процеси кристалізації автори розглядають, передусім, з погляду їхнього впливу на поведінку вуглецю в розплаві. Враховується, крім того, зміна властивостей розплаву за рахунок глибокого розкислення та обезсірчення його РЗМ. По відношенню до заліза всі РЗМ мають нижчі температури плавлення і нижчий поверхневий натяг, тобто є поверхнево-активними елементами-модифікаторами.

Отже, одним із найбільш доступних методів покращення якості чавунів є модифікування. Більшість літературних відомостей щодо впливу РЗМ на властивості високовуглецевих сплавів заліза зосереджена на дослідженні наступних питань: 1) нейтралізації шкідливих елементів, 2) сфероїдизації графіту та утворенні зародків та 3) утворенні карбідів та характері кристалізації чавуну. Однак відомостей щодо впливу всіх РЗМ, у тому числі самарію та гадолінію на кристалізацію білих, половинчастих і сірих валкових чавунів дуже мало. Так, у роботі [14] було визначено, що евтектичне перетворення з утворенням пластинчастої ледебуритної евтектики в доевтектичному валковому чавуні при литті у циліндричні форми проходило при присадках гадолінію в межах 1,6...3,2%.

У роботі авторів [15] отримані результати досліджень показали доцільність застосування для модифікування чавуну робочого шару двошарових прокатних валків комплексного модифікатору на основі рідкісноземельних металів та термічної обробки литих заготовок валків, а також їх позитивний вплив на фізико-механічні та службові властивості: матеріал дослідного валка (після комплексної обробки) у порівнянні з серійним на відстані 10-30 мм від поверхні бочки мав підвищені властивості: границя міцності при розтягу σ_b була більшою на 3-7, границя міцності при вигині σ_u - на 2-3, ударна в'язкість a_k - на 4-15, а термостійкість - на 27%.

У роботі [16] наведені результати дослідження і уточнення технології отримання комплексних модифікаторів вуглетермічним способом з окискуваної сировини та застосування їх у вальцеливарному виробництві. Цим дослідженням передувало дослідження особливостей модифікуючого впливу індивідуальних рідкісноземельних металів церієвої групи (церію, лантану та самарію) на параметри кристалізації і структуроутворення валкових

чавунів при різних швидкостях охолодження, що мають місце у реальній валковій формі. Встановлено, що мінімальна необхідна кількість модифікатора, що дозволяла досягти максимального рівня зниження температури початку евтектичної кристалізації залежала від швидкості охолодження. Підвищення швидкості охолодження призводило до зміщення цієї кількості модифікатора у бік менших концентрацій.

У роботі [17] зазначено, що кафедра ливарного виробництва Українського державного університету науки і технологій понад шістдесят років займається дослідженням впливу модифікування рідкісноземельними металами на якість литих чавунних виливків. Одним з важливих питань для теорії та практики виробництва чавуну з кулястим графітом є дослідження впливу величини присадки на параметри кристалізації чавуну. Визначення ролі модифікатора в процесі модифікування валкового чавуну дозволить створити найбільш ефективні модифікатори і розробити раціональну технологію отримання високоміцного чавуну. Проведено дослідження впливу величини присадки трьох індивідуальних рідкісноземельних металів з вмістом домішок, %: лантану (0,39%), церію (0,41%) та ітрію (0,24%) на параметри кристалізації валкового чавуну хімічного складу, %: вуглець 3,29; кремній 1,81; марганець 0,44; фосфор 0,07; сірка 0,026; залізо решта. Встановлено подібний вплив дослідних рідкісноземельних металів на параметри кристалізації валкового чавуну та критичні їх концентрації, які призводили до найбільших змін параметрів кристалізації та утворення кулястих графітних включень в структурах модифікованих чавунів. За модифікування чавунного розплаву з метою одержання кулястого графіту ітрію необхідно додавати в 1,5-1,6 разів менше, ніж церію або лантану.

У роботах [18, 19] були досліджені питання про вплив РЗМ на карбідоутворювальну здатність валкових чавунів та доведено, що це має велике теоретичне і практичне значення. У роботах виявлені закономірності впливу основних РЗМ в інтервалі швидкості охолодження, що мають місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих валкових чавунів. Встановлено, що вплив досліджених РЗМ на мікроструктуру відрізнявся інтервалами їх залишкових вмістів у валкових чавунах. При постійних умовах плавлення, близьких вихідних і кінцевих вмістах сірки в

металах було оцінено коефіцієнти засвоєння РЗМ як відношення залишкового вмісту $PZM_{зал.}$ до введеного PZM_e . Визначення коефіцієнта засвоєння РЗМ проводили за усередненим залишковим їх вмістом у нижніх частинах досліджуваних зразків. Дослідили присадки РЗМ від 0,2 мас.% до 2,4 мас.%. Коефіцієнти засвоєння всіх досліджених РЗМ при малих присадках у розплав чавуну були в діапазоні від 10 до 56,5%.

Таким чином, наявні дослідження охоплюють питання, що зосереджені на окремих складниках, тоді як модель модифікування РЗМ потребує подальшого дослідження та узагальнення.

Метою статті є встановлення карбідоутворюючої здатності двох різних груп РЗМ у білих валкових чавунах та встановити вплив хімічних елементів церієвої та ітрієвої підгруп РЗМ на мікроструктуру валкового чавуну. Обґрунтувати вибір РЗМ для обробки білих чавунів.

Методика дослідження. Для виконання поставлених у роботі завдань використовували стандартні методи контролю, апробовані методи дослідження та сучасне обладнання для отримання чавунів, проведення хімічного, металографічного аналізу. Мікроскопічне дослідження проводили на оптичних метало-мікроскопах МІМ-8М та Neophot 21 при збільшеннях 12...1300. Шліфі досліджували до та після травлення. Як основний травник використовували 2% -ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Кількість структурних складників визначали точковим методом Глаголева у 20 полях зору зі збільшенням 400, що забезпечувало достатню достовірність. Мікротвердість структурних складових чавунів визначали на приладі ПМТ-3 за ГОСТ 9450-76 при навантаженні 0,49Н та збільшенні 487. Точність вимірювання діагоналі відбитка становила 0,07 мкм. Величину мікротвердості розраховували як середню 50 вимірів. Застосування науково обґрунтованих методів обробки експериментальних даних при використанні розроблених методик обробки чавунних розплавів забезпечило отримання результатів із досить високим ступенем точності та достовірності.

Особливості обробки чавунів рідкісноземельними металами. Для розробки оптимальних режимів модифікування та типів КМ на основі РЗМ необхідне знання особливостей впливу індивідуальних РЗМ на структуру та властивості та дані про їх засвоєння за різних умов плавки та обробки чавунів.

Для модифікування чавунних розплавів використовували індивідуальні РЗМ із вмістом домішок %: церій – 0,41, ітрій – 0,24, гадоліній – 0,29, самарій – 0,46.

Оскільки до складів комплексних модифікаторів входять церій, лантан, ітрій, а також гадоліній, самарій та ряд інших лантановидів, а в літературі, як показав аналітичний огляд, практично відсутні відомості про їх вплив на структуру валкових чавунів, провели дослідження впливу цих хімічних елементів. Для цього було проведено серію плавок на чавуні постійного хімічного складу, мас. %: С 3,49; Si 0,30; Mn 0,05; P 0,005; S 0,2; Fe - решта

При постійних умовах плавки, близьких вихідних і кінцевих вмістах сірки в металі доцільно, як встановлено в роботі [4], оцінювати засвоєння РЗМ спеціальним коефіцієнтом. Засвоєння церію та самарію зменшувалося зі зростанням величини присадки їх у розплав чавуну, а ітрію та гадолінію – збільшувалося. Найкращий коефіцієнт засвоєння в досліджуваному діапазоні присадок у білих чавунах мали ітрій і гадоліній, а найгірший – самарій, що, мабуть, пов'язане з відмінностями температури плавлення цих хімічних елементів. Коефіцієнт засвоєння (середній) РЗМ церієвої підгрупи при модифікуванні чавунів становив 48,2, а РЗМ ітрієвої підгрупи при модифікуванні чавунів – 38,5%. Таким чином, засвоєння РЗМ ітрієвої підгрупи було на 20% меншим, ніж РЗМ церієвої підгрупи.

Мікроструктура вихідного немодифікованого чавуну. Зразок з немодифікованого чавуну після кристалізації зі швидкістю охолодження 5,5 град/с мав структуру доевтектичного БЧ: дендрити аустеніту були оточені ледебуритної евтектикою стільникового типу з мікротвердістю $H_{50}7512$ МПа. Евтектоїдне перетворення аустеніту проходило з утворенням трооститу, мікротвердість якого складала 3883 МПа, рідко зустрічалися ділянки пластинчастого перліту. Перетворення ледебуритного аустеніту частіше відбувалося з поділом фаз, цементит нашаровувався на евтектичному, ферит виділявся окремо.

Мікроструктура чавунів, модифікованих РЗМ церієвої групи. Відповідно до завдань даної роботи досліджували особливості структури типових валкових чавунів, модифікованих зростаючими присадками індивідуальних РЗМ. Дослідження проводили на доевтектичних чавунах, виплавлених на постійній шихті. При модифікуванні досліджуваного базового

чавуну зростаючими кількостями самарію чавун з його залишковим вмістом 0,094% мав структуру доєвтектичного БЧ, у порівнянні з вихідним чавуном зросла кількість аустеніту до 40,5% (табл. 1), а також знизилася кількість ледебуриту і підвищилася його мікротвердість. При евтектоїдному перетворенні утворювався троостит з більшою мікротвердістю H_{50} 3991 МПа.

При підвищенні концентрації елемента-модифікатора до 0,198% при кристалізації

Таблица 1

Вплив РЗМ церієвої підгрупи на кількість карбідної складової у чавуні

Тип РЗМ	Середній вміст РЗМ, %	Кількість карбідних структурних складників, %		
		карбід	карбід + ледебурит	ледебурит
-	-	-	-	76,0
Sm	0,094	-	-	59,5
	0,198	-	43,8	-
	0,423	23,2	-	-
	0,82 1	26,6	-	-
	1,082	25,9	-	-
Ce	0,113	-	-	30,6
	0,208	-	31,0	-
	0,392	-	30,4	-
	0,651	29,2	-	-
	0,948	27,5	-	-
	1,423	26,9	-	-

більшість рідини перетворювалася на аустеніт, кількість якого досягала 56,2% (див. табл. 1). Решта рідини, що залишилася, зазнавала евтектичного перетворення з утворенням тонкого ледебуриту і ділянок з конгломератною структурою. Після затвердіння при охолодженні від евтектичної до евтектоїдної температури відбувалося виділення вторинного цементиту, який ріс в аустеніті у вигляді пластин. Евтектоїдне перетворення проходило в основному з утворенням тонкодиференційованого перліту (трооститу). Значення мікротвердості карбідної фази і мартенситу в чавунах із залишковим вмістом самарію 0,198% були в середньому на 10% вище порівняно з чавуном, що містить 0,094% модифікатора.

Подальше підвищення концентрації самарію в чавуні (до 0,423%) призводило до різкого зменшення кількості ледебуриту, майже вся евтектична

рідина зазнавала розпаду з утворенням конгломератної структури, тобто спостерігалось роздільне зростання дендритів аустеніту та цементитних пластин. Дрібні ледебурні колонії зустрічалися дуже рідко. Після затвердіння вторинний цементит виділявся у вигляді пластин. Крім того, деякі дендритні гілки аустеніту переохолоджувалися до температури мартенситної області. При вмістах самарію 0,821% кристалізація ледебуриду повністю придушувалася, евтектичне перетворення проходило з поділом фаз. Кількість мартенситу у структурі чавуну зростала.

При модифікуванні вихідного чавуну церієм отримані близькі результати щодо зміни структури матриці. У межах досліджених концентрацій (0,113...1,423%) було отримано БЧ, у матрицях яких кількість перліту зростала від 66,4 до 72,5%. У чавуні із вмістом церію 0,113% порівняно з базовим чавуном зросла кількість аустеніту та знизилася кількість ледебуриду (30,6%), а також його мікротвердість до 6992 МПа. При евтектоїдному перетворенні утворювався перліт з нижчою мікротвердістю H_{50} 3790 МПа. При підвищенні вмісту церію до 0,208 і 0,392% при кристалізації більшість рідини перетворювалася на аустеніт, кількість якого досягала 68,0% (див. табл.1). Решта рідини, що залишилася, зазнавала евтектичного перетворення з утворенням тонкого ледебуриду і ділянок з конгломератною структурою.

Евтектоїдне перетворення проходило в основному з утворенням тонкодиференційованого перліту (трооститу) з мікротвердістю 4280 МПа. Слід зазначити, що з концентраціях 0,113...0,392% в ледебуритних колоніях зустрічався аномальний ферит. При вмістах церію 0,651 і 0,948% кристалізація ледебуриду в чавуні повністю придушувалася, евтектичне перетворення проходило з поділом фаз. Мікротвердість карбідів досягала максимальних значень – 9463 та 9571 МПа відповідно. При евтектоїдному перетворенні утворювався троостит з мікротвердістю 4373 МПа.

Таким чином, а) максимальну кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуріті стільникового типу) було отримано при 0,821% самарію, 0,948% церію; б) середній вміст РЗМ цієї підгрупи становив 0,885%; в) середній вміст карбідної складової – 27,1%.

Мікроструктура чавунів, модифікованих РЗМ ітрієвої групи. У первинній структурі чавуну з залишковим вмістом 0,020% гадолінію дендрити

аустеніту займали 34,5%, решта 65,5% припадала на ледебурит і цементит, що був продуктом роздільної кристалізації евтектичних фаз (табл.2).

Таблиця 2

Вплив РЗМ ітрієвої підгрупи на кількість карбідної складової у чавун

Тип модифікатора	Середній вміст РЗМ %	Кількість карбідної структурної складової, %		
		карбід	карбід + ледебурит	ледебурит
-	-	-	-	76,0
Gd	0,020	-	65,5	-
	0,190	13,9	-	-
	0,900	17,9	-	-
	1,446	16,7	-	-
Y	0,023	-	-	69,5
	0,079	-	30,1	-
	0,250	-	55,8	-
	0,731	54,8	-	-
	1,423	46,9	-	-

Існують критичні вмісти індивідуальних РЗМ, які забезпечують максимальну кількість карбідів у структурі чавуну. Середній залишковий вміст елементів ітрієвої підгрупи в чавуні було на 8% менше, ніж церієвої. Максимальна кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) була отримана при 0,900% гадолінію та 0,731% ітрію. Середній вміст РЗМ цієї підгрупи становив 0,816%. Середній вміст карбідної складової 36,4%, що на 34% більше, ніж церієвої підгрупи.

Подальше підвищення вмісту індивідуальних РЗМ сприяло зменшенню кількості надлишкових карбідів у структурі чавунів. У чавунах із залишковим вмістом гадолінію 0,190; 0,900 і 1,446% при евтектичній кристалізації відбувався повний поділ фаз, і первинна структура складалася з дендритів аустеніту та цементиту. Вторинний цементит при подальшому охолодженні після затвердіння виділявся з аустеніту як тонких пластин. Евтектоїдне перетворення аустеніту при малому вмісті гадолінію призводило до утворення тонкого перліту з мікротвердістю 3883 МПа. Зі збільшенням вмісту гадолінію в чавуні мікротвердість перліту зростала, у структурі утворювався троостит, мікротвердість якого досягала 5120 МПа.

Вплив модифікування ітрієм було аналогічним впливу самарію: воно виражалося в зменшенні кількості ледебуриту, кристалізація якого повністю пригнічувалася при 0,731% ітрію, збільшенні мікротвердості цементиту і матриці (троооститу), в перетворенні частини аустеніту в мартенсит, частка якого зі збільшенням залишкового змісту ітрію зростала.

Отже, для модифікування білого чавуну існують критичні змісти індивідуальних РЗМ, що забезпечували максимальну кількість карбідів у його структурі. Так, максимальна кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) була отримана при 0,314% самарію та 0,900% гадолінію, а також при 0,731% ітрію, 0,651% церію (див. табл.1 і 2). Подальше підвищення вмісту індивідуальних РЗМ сприяло зменшенню кількості надлишкових карбідів у структурах чавунів.

Як впливає з даних кількісного металографічного аналізу (див. табл. 1 та 2), при постійній швидкості охолодження кількість та тип структурних складників чавуну залежать від виду та залишкового вмісту індивідуального РЗМ.

Визначення карбідоутворюючої здатності РЗМ. Металографічний аналіз модифікованих індивідуальними РЗМ чавунів та розрахунок середніх відносних величин кількості карбідної складової на одиницю залишкового вмісту РЗМ показали, що за карбідоутворювальною здатністю досліджувані РЗМ ітрієвої групи мали в середньому показник $845+747=796$ (рис.1), а досліджувані РЗМ церієвої групи – $193+114=154$ (рис.2).

Таким чином, в інтервалі досліджених концентрацій РЗМ та швидкостей охолодження вплив РЗМ на структурні зміни валкового БЧ був аналогічним. Модифікування білого чавуну РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту. Найбільша зміна структури модифікованого БЧ спостерігалася при залишковому вмісті самарію 0,423% або гадолінію 0,190%, а також ітрію 0,731%, і церію 0,651%. Підвищення дисперсності та мікротвердості перліту, поява в структурах мартенситу та пластинкова будова карбідної евтектики повинні сприяти підвищенню зносостійкості та міцності БЧ.

Таким чином, незважаючи на те, що середній залишковий вміст елементів ітрієвої підгрупи в чавуні було на 8% меншим, карбідоутворююча здатність цієї

підгрупи була у 5.2 рази більшою за церієву підгрупу. Зазначені індивідуальні особливості РЗМ необхідно враховувати при виборі високоефективних складів КМ, так заміщення частини церію (20...50%) на гадоліній в КМ при модифікуванні, наприклад, білих валкових чавунів, дає ефект в 1,5...3,7 рази більший, що свідчить про особливу цінність його як складової КМ.

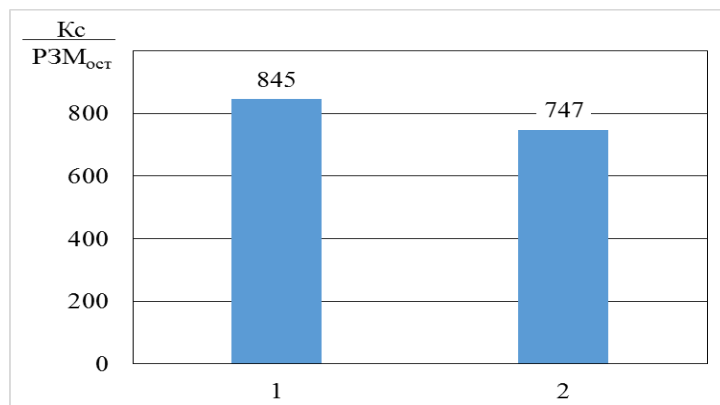


Рис. 1. Карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи: 1 – гадоліній ; 2 – ітрій

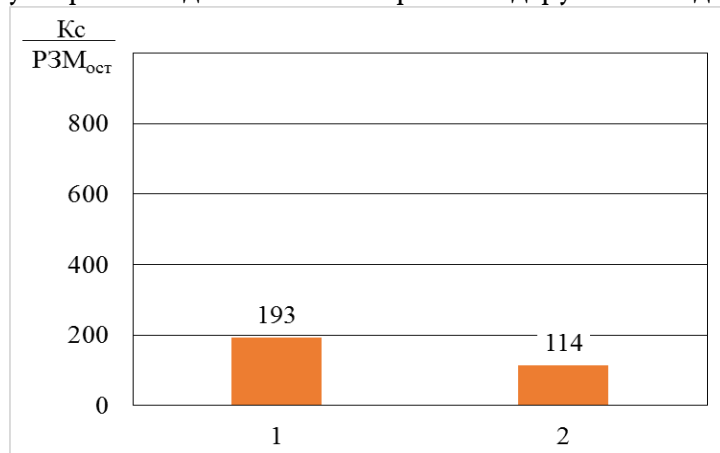


Рис. 2. Карбідоутворююча здатність РЗМ церієвої підгрупи : 1 - самарій ; 2 – церій

Висновки. Виявлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – самарію та церію та ітрієвої підгрупи – гадолінію та ітрію при швидкості охолодження, що має місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків. Встановлено, що в інтервалі досліджених концентрацій РЗМ вплив РЗМ на структурні зміни валкового БЧ був аналогічним. Модифікування білих чавунів РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту.

Встановлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів двох підгруп на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків: карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи була у 5,2 рази більшою у порівнянні з церієвою підгрупою. Це дало можливість обґрунтувати тип основи комплексного модифікатора для досягнення необхідних властивостей матеріалу прокатних валків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кривошеев А.Є. Литі валки (теоретичні і технологічні основи виробництва).– М.: Металургвиздат, 1957.– 360 с.
2. ТУ У 28.9-00187375-106:2018. Валки чавунні та сталеві для гарячого прокатування металів. Технічні умови. Чинний з 05.03.2018.– Дніпро, 2018. – 36 с.
3. Білай Г.Є. Дослідження впливу модифікування на кристалізацію чавуну, структуру і властивості листопрокатних валків: Автореф. дис. ... кандидата техн. наук: 05.323/ Дніпропетр. металург. ін-т.– Дніпропетровськ, 1967.– 23 с.
4. Колотило Є.В. Дослідження та удосконалення процесів виробництва листопрокатних валков із модифікованих чавунів: Дис.... кандидата техн. наук: 05.16.04; Захищена 14.11.1977; Затв. 26.04.1978. – Дніпропетровськ, 1977.–207 с.
5. Будаг'янц Н.А., Карсский В.Е. Литі прокатні валки. – М.: Металургия, 1983.– 173 с.
6. Анікін А.А. Експериментально-теоретичні основи одержання ітрієвого чавуну для виробництва деталей відповідального призначення в галузях народного господарства: Автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04/ Моск. ін-т стали і спл.–М., 1989.– 47 с.
7. Рябчиков І.В. Матеріали для позапічної обробки залізвуглецевих сплавів // Металургія машинобудування. – 2005.– № 2.– С. 9–17.
8. Комплексні сплави з рідкоземельними металами для модифікування чавуну / І.С.Кумиш, Н.П.Лякишев, А.А.Федотов та ін. // Теорія та практика одержання і застосування комплексних феросплавів:– Тбілісі, 1974.– С. 184–190.
9. Уткін Н.І. Виробництво кольорових металів. –М.: "Интермет Инжиниринг", 2000.– 442 с.
10. Савицький Є.М. Перспективи дослідження та застосування рідкоземельних металів, сплавів і соединений // Рідкоземельні метали і сплави. – М.: Наука, 1971.– С.5–17.
11. Маркова І.А., Терехова В.Ф., Савицький Є.М. Ітрії, його сплави та застосування // Рідкоземельні метали і сплави. – М.: Наука, 1971.– С. 24–28.
12. Торчинова Р.С., Терехова В.Ф., Савицький Є.М. Сплави самарію та європію // Рідкоземельні метали і сплави. – М.: Наука, 1971.– С. 34–41.
13. Василенко А.А., Григор'єв І.С. Модифікований чавун в машинобудуванні.–К.: Гостехвиздат, 1950.– 166 с.
14. Іванова Л.Х., Ніколаєнко О.А. Легування білого чавуну гадолінієм/ Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2017: матеріали ІХ Міжнарод.наук.-техн. конф., 30-31 трав. 2017 р. м.Київ/ Загальна редакція Р.В.Лютій, І.М.Гурія.- К.: НТУУ «КПІ», 2017.- С.79.
15. Іванова Л.Х., Калашнікова А.Ю., Терехін В.О. Розробка технології виготовлення двошарового прокатного валка / Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.(21-23 травня 2019 р., м.Запоріжжя)/ під заг. ред. О.І.Пономаренко.- Запоріжжя: ФОП Наталія Олександрівна Систерова, 2019.- С.102-104.

- 16.Іванова Л.Х., Колотило Е.В., Хитько О.Ю., Терехієн В.О. Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами / Метал і лиття України, т.28, 2020, №1(320), С.30-33.
- 17.Іванова Л.Х., Колотило Е.В., Мирошніченко Г.О. Рідкісноземельні метали у валкових чавунах / Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні– ІТММ’2022: тези доповідей Міжнародної наук.-практич. конф., (Дніпро, 18 травн. 2022 р.) – Дніпро: УДУНТ, 2022.- С.30-34.
- 18.Іванова Л.Х., Колотило Е.В., Білий А.П., Шемет Карбідоутворювальна здатність рідкісноземельних металів у валкових чавунах/ Розвиток промисловості та суспільства: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф.(28 -30 травня 2025 р., м.Кривий Ріг).- Кривий Ріг, КНУ, 2025.С. 74.
- 19.Іванова Л.Х., Колотило Е.В. Дослідження кристалізації половинчастих чавунів / Литво. МЕеталургія. 2025: матеріали XXI Міжнар. наук.-практ. конф. (27-29 травня 2025 р., м.Харків-м.Київ)/ під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І.- Харків, НТУ «ХПІ», 2025.- С. 131-133.

Received 10.03.2025.

Accepted 15.04.2025.

Published 30.04.2026

УДК 621.74:669.131.7

Liudmyla Ivanova, Vadym Selivorstov, Oleksandr Khytko, Oleksandr Bilyi

SYSTEM APPROACH TO DETERMINING THE EFFECT OF RARE-EARTH METALS ON THE STRUCTURE OF ROLL CAST IRONS

Abstract. *The article examines the effect of rare-earth metals on the microstructure of roll cast irons. An analysis of the current state of roll casting production and the issues within the selected research direction is presented. For many years, efforts have been made in roll casting to replace magnesium with alternative modifiers. The analysis of available studies and publications mainly focuses on individual components, while a comprehensive model of modification of roll cast irons using rare-earth metals still requires further investigation and generalization.*

The aim of the study is to determine the carbide-forming ability of various rare-earth metals in white roll cast irons. To achieve this goal, the following task was formulated: to establish the influence of chemical elements of the cerium and yttrium subgroups of rare-earth metals on the microstructure of roll cast iron, as well as to substantiate the selection of rare-earth metals for the treatment of white roll cast irons.

Regularities of the influence of rare-earth elements of the cerium subgroup (samarium and cerium) and the yttrium subgroup (gadolinium and yttrium) on the structure formation processes of white cast irons for rolling rolls under cooling rates typical for roll casting molds have been established. It has been shown that the individual effects of the studied subgroups of rare-earth metals on the microstructure differ in terms of their residual content ranges.

Modification of white cast iron with rare-earth metals leads to changes in the type of carbide eutectic and the dispersion of pearlite. It has been established that the carbide-forming ability of rare-earth metals of the yttrium subgroup is 5.2 times higher than that of the cerium subgroup. This made it possible to substantiate the composition of the base of a complex modifier to achieve the required properties of roll materials.

Keywords: roll cast iron, rare-earth metal, structural constituent, carbide-forming ability, cast iron modification, cast iron microstructure, structure formation, eutectic transformations

REFERENCES

1. Krivosheev, A.E. (1957). Litye valki (teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva). M: Metallurgizdat, 360 p.
2. TU U 28.9-00187375-106:2018. (2018). Valky chavunni ta stalevi dlia hariachoho prokatuvannia metaliv. Tekhnichni umovy. Dnipro, 36 p.
3. Bilai, H.E. (1967). Doslidzhennia vplyvu modyfikuvannia na krystalizatsiiu chavunu, strukturu i vlastyivosti lystoprokatnykh valkv. Abstract of PhD thesis. Dnipropetrovsk Metallurgical Institute, 23 p.
4. Kolotylo, E.V. (1977). Doslidzhennia ta udoskonalennia protsesiv vyrobnytstva lystoprokatnykh valkv iz modyfikovanykh chavuniv. PhD thesis. Dnipropetrovsk, 207 p.
5. Budagyants, N.A., Karsskiy, V.E. (1983). Litye prokatnye valki. M: Metallurgiya, 173 p.
6. Anikin, A.A. (1989). Eksperimentalno-teoreticheskie osnovy polucheniya ittrievogo chuguna dlia proizvodstva detaley otvetstvennogo naznacheniya v otraslyakh narodnogo khozyaystva. Abstract of DSc thesis. M Institute of Steel and Alloys, 47 p.
7. Ryabchikov, I.V. (2005). Materialy dlia pozapechnoy obrabotki zhelezouglerodistykh splavov. Metallurgiya mashinostroeniya, No. 2, pp. 9-17.
8. Kumysh, I.S., Lyakishev, N.P., Fedotov, A.A., et al. (1974). Kompleksnye splavy s redkozemelnymi metallami dlia modifitsirovaniya chuguna. In: Teoriya i praktika polucheniya i primeneniya kompleksnykh ferrosplavov. Tbilisi, pp. 184-190.
9. Utkin, N.I. (2000). Proizvodstvo tsvetnykh metallov. M: Intermet Inzhiniring, 442 p.
10. Savitskiy, E.M. (1971). Perspektivy issledovaniya i primeneniya redkozemelnykh metallov, splavov i soedineniy. In: Redkozemelnye metally i splavy. M: Nauka, pp. 5-17.
11. Markova, I.A., Terekhova, V.F., Savitskiy, E.M. (1971). Itriy, ego splavy i primeneniye. In: Redkozemelnye metally i splavy. M: Nauka, pp. 24-28.
12. Torchinova, R.S., Terekhova, V.F., Savitskiy, E.M. (1971). Splavy samariya i evropiya. In: Redkozemelnye metally i splavy. M: Nauka, pp. 34-41.
13. Vasilenko, A.A., Grigoriev, I.S. (1950). Modifitsirovanny chugun v mashinostroenii. Kyiv: Gostekhizdat, 166 p.
14. Ivanova, L.Kh., Nikolaenko, O.A. (2017). Leguvannia biloho chavunu hadoliniiem. In: Novi materialy i tekhnolohii v mashynobuduvanni: materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Kyiv: NTUU «KPI», p. 79.
15. Ivanova, L.Kh., Kalashnikova, A.Yu., Terekhin, V.O. (2019). Rozrobka tekhnolohii vyhotovlennia dvosharovoho prokatnogo valka. In: Lytvo. Metalurhiia 2019: materialy XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Zaporizhzhia, pp. 102-104.

16. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V., Khytko, O.Yu., Terekhin, V.O. (2020). Otrymannia i zastosuvannia kompleksnykh modyfikatoriv z ridkisnozemelnymy metalamy. Metal i lytvo Ukrainy, Vol. 28, No. 1(320), pp. 30–33.
17. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V., Miroshnychenko, H.O. (2022). Ridkisnozemelni metaly u valkovykh chavunakh. In: Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni (ITMM'2022). Dnipro: UDUNT, pp. 30–34.
18. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V., Bilyi, A.P., Shemet, O. (2025). Karbidooutvoriuvalna zdattnist ridkisnozemelnykh metaliv u valkovykh chavunakh. In: Rozvytok promyslovosti ta suspilstva: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Kryvyi Rih: KNU, p. 74.
19. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V. (2025). Doslidzhennia krystalizatsii polovynchastykh chavuniv. In: Lytvo. Metalurhiia 2025: materialy XXI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kharkiv–Kyiv: NTU «KhPI», pp. 131–133.

Іванова Людмила Харитонівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

Селівьорстов Вадим Юрійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

Хитько Олександр Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

Білий Олександр Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

Ivanova Liudmyla Kharytonivna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

Selivorstov Vadym Yuriiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

Khytko Oleksandr Yuriiovych – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

Bilyi Oleksandr Petrovych – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

МУЛЬТИАГЕНТНА АРХІТЕКТУРА М’ЯКИХ СЕНСОРІВ НА БАЗІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена високою енергоємністю виробництва феросплавів та обмеженими можливостями прямого моніторингу внутрішніх параметрів ванни рудовідновлювальних печей (РВП/SAF), що ускладнює ефективне управління технологічним процесом. Проблема полягає у домінуванні реактивних підходів до управління, які не забезпечують своєчасного реагування на зміну стану системи. Метою роботи є розроблення концепції інтелектуальної системи управління на основі мультиагентної архітектури з використанням «м’яких сенсорів». У дослідженні застосовано методи глибокого навчання, зокрема рекурентні нейронні мережі (LSTM/GRU), фізико-інформовані нейронні мережі (PINN) та підходи мультиагентної координації. У результаті запропоновано структуру системи, що включає спеціалізованих агентів за напрямками енергоефективності, технологічної безпеки та контролю хімічного складу, взаємодія яких забезпечується агентом-оркестратором. Отримані результати свідчать про можливість переходу до проактивного управління з горизонтом прогнозування 1–3 години, що дозволяє знизити питомі витрати електроенергії та підвищити безпеку функціонування печі. Встановлено, що інтеграція мультиагентного підходу та гібридних нейромережевих моделей забезпечує підвищення точності прогнозування та стабільності технологічного процесу.

Ключові слова: енергетична оптимізація, предиктивна аналітика, фізико-інформоване моделювання, часові ряди, цифровий двійник, інтерпретованість моделей, промислові процеси, адаптивне управління.

Постановка проблеми. Сучасна електрометалургія перебуває на етапі глобальної цифрової трансформації, зумовленої необхідністю підвищення енергоефективності та зниження вуглецевого сліду. Виробництво феросплавів

у рудовідновлювальних печах (РВП) є одним із найбільш енергомістких процесів, де вартість електроенергії становить від 40% до 70% собівартості готової продукції. У цих умовах перехід від традиційних методів автоматизації до інтелектуальних систем управління стає не просто технологічною перевагою, а економічною необхідністю.

Головною проблемою управління РВП є природа самого агрегату як «чорної скриньки». Екстремально високі температури (до 2000°C), агресивне хімічне середовище та складність фізико-хімічних перетворень унеможливають установку датчиків прямого вимірювання температури та складу розплаву безпосередньо в зоні реакції. Наявні системи АСУ ТП, як правило, спираються на непрямі електричні параметри та досвід операторів, що призводить до реактивного стилю управління – виправлення відхилень, які вже виникли.

Висока інерційність процесу (від кількох годин до доби) вимагає впровадження проактивних стратегій. Основна мета даного дослідження полягає у відході від використання поодиноких ізольованих нейромережевих моделей на користь мультиагентної архітектури (Multi-Agent System, MAS). Такий підхід дозволяє декомпонувати складний металургійний процес на функціональні області відповідальності, де кожен агент (енергетичний, термічний, технологічний та фізико-хімічний) фокусується на своєму домені даних.

Центральним елементом запропонованої архітектури є «м'які сенсори» (Soft Sensors). На відміну від фізичних датчиків, вони являють собою програмні алгоритми, які в режимі реального часу синтезують потік даних АСУ ТП та лабораторних аналізів для предиктивного моделювання ключових показників, таких як температура випуску та стан гарнісажу.

Інтеграція цих сенсорів у мультиагентне середовище під управлінням агента-оркестратора дозволяє створити систему підтримки прийняття рішень, здатну передбачати стан ванни з горизонтом у 1,5–3 години, забезпечуючи стабільність плавки та мінімізацію енергетичних втрат.

Загальна дворівнева архітектура розробленої мультиагентної системи, що інтегрує рівень збору даних та рівень інтелектуального аналізу, представлена на рис. 1.

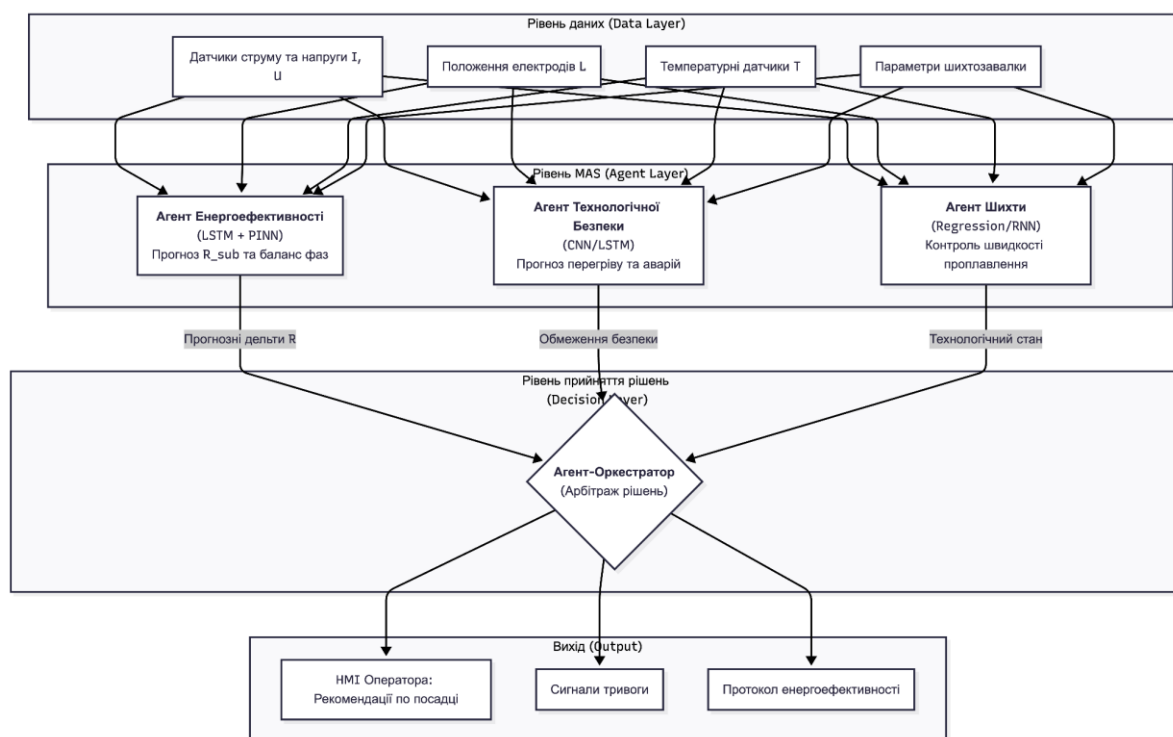


Рисунок - 1. Ієрархічна структура мультиагентної системи управління РВП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз світової практики та сучасних наукових публікацій у галузі автоматизації рудовідновлювальних печей – SAF – свідчить про поступову еволюцію інтелектуальних систем управління від жорстко детермінованих підходів до гнучких гібридних моделей, що інтегрують дані та фізичні закономірності процесу. На початковому етапі формування інтелектуального управління домінували експертні системи, зокрема рішення типу FurnStar, які забезпечували стабілізацію технологічних режимів на основі формалізації металургійного досвіду операторів [1]. Незважаючи на їх ефективність у типових умовах, ключовим обмеженням таких систем залишалася залежність від жорстко заданих правил, що істотно знижувало їх адаптивність до змін складу шихти, електричних параметрів та геометрії ванни.

Подальший розвиток був пов'язаний із впровадженням методів глибокого навчання та концепції «м'яких сенсорів», що дозволило перейти до оброблення складних нелінійних залежностей у технологічних процесах. Використання просторово-часових згорткових мереж забезпечило підвищення точності

моніторингу теплових полів, тоді як рекурентні архітектури, зокрема LSTM, продемонстрували високу ефективність у моделюванні часової динаміки стану футерування та інших інерційних характеристик процесу [2–4]. Водночас характерною проблемою цього етапу залишалася непрозорість моделей, що обмежувало можливість інтерпретації отриманих результатів та знижувало рівень довіри до системи з боку операційного персоналу. У зв’язку з цим сучасні дослідження акцентують увагу на розвитку інтерпретованого машинного навчання, яке дозволяє кількісно оцінювати вплив окремих технологічних параметрів на результати прогнозування та забезпечує обґрунтованість прийнятих рішень [5].

На сучасному етапі відбувається перехід до створення інтегрованих цифрових двійників технологічних процесів, що забезпечують відтворення реакційної зони печі у режимі реального часу та формують основу для комплексного управління [6]. Особливого значення набуває використання фізико-інформованих нейронних мереж, які поєднують емпіричні дані з фундаментальними законами тепломасообміну, що дозволяє уникати фізично некоректних прогнозів і підтримувати високу точність моделювання навіть за умов обмеженості вимірювальної інформації [7, 8]. Такий підхід забезпечує принципово новий рівень узгодженості між математичною моделлю та реальними процесами в рудовідновлювальних печах.

Попри суттєвий прогрес, сучасні дослідження характеризуються фрагментарністю, оскільки більшість запропонованих рішень орієнтовані на вирішення окремих задач і функціонують ізольовано, що призводить до суперечностей у рекомендаціях та знижує ефективність управління. У цьому контексті актуальним є формування інтегрованих підходів, здатних об’єднати різні типи моделей у межах єдиної системи. Перспективним напрямом є використання мультиагентної архітектури, у якій окремі агенти реалізують функції спеціалізованих «м’яких сенсорів», а їх взаємодія координується централізованим агентом-оркестратором із використанням методів глибокого навчання з підкріпленням, що забезпечує узгодженість рішень та підвищує адаптивність системи до динамічних умов функціонування [9].

Мета дослідження. Метою дослідження є обґрунтування та розроблення мультиагентної архітектури інтелектуальної системи управління

рудовідновлювальними печами на основі «м'яких сенсорів» і методів глибокого навчання для забезпечення проактивного прогнозування стану технологічного процесу, підвищення енергоефективності та зниження технологічних ризиків.

Методологія дослідження. В основу запропонованого рішення покладено децентралізовану мультиагентну архітектуру, яка, на відміну від монолітних нейромережових моделей, забезпечує декомпозицію складного технологічного процесу рудовідновлювальної печі – SAF – на окремі функціональні домени з чітко визначеними областями відповідальності. Такий підхід дозволяє підвищити адаптивність системи до нелінійних змін технологічного середовища та забезпечує більш гнучке управління процесами плавки. Кожен агент у структурі системи реалізує функцію інтелектуального «м'якого сенсора», що спеціалізується на моделюванні конкретного фізико-хімічного аспекту та здійснює оброблення даних у межах власного інформаційного простору.

Координація взаємодії агентів здійснюється централізованим агентом-оркестратором, який використовує методи глибокого навчання з підкріпленням для узгодження їхніх рішень та формування оптимальних рекомендацій щодо керування процесом. У межах запропонованої архітектури агент, орієнтований на енергетичні характеристики процесу, виконує прогнозування динаміки накопичення корисної енергії та оцінювання стабільності електричних параметрів функціонування печі, використовуючи рекурентні нейронні мережі типу PI-LSTM. Особливістю цієї моделі є модифікація функції втрат шляхом інтеграції фізичних обмежень, що може бути формалізовано у вигляді:

$$L = \omega \times \text{MSE}(T_{\text{pred}}, T_{\text{true}}) + \omega \times \phi \quad (1)$$

де: $\text{MSE}(T_{\text{pred}}, T_{\text{true}})$ характеризує середньоквадратичну помилку прогнозування температури, а $\phi(E_{\text{balance}})$ – регуляризаційний доданок, що враховує рівняння енергетичного балансу та забезпечує фізичну узгодженість результатів моделювання.

Інший агент, що відповідає за термічний стан системи, здійснює моніторинг футерування та прогнозування ризиків локальних перегрівів на основі аналізу темпів зміни температури. Для цього застосовуються

просторово-часові згорткові нейронні мережі, які інтерпретують розподіл температурних датчиків як динамічну багатовимірну структуру, що дозволяє виявляти критичні теплові аномалії та зони потенційного руйнування футерування.

Агент, орієнтований на технологічні параметри, забезпечує прогнозування хімічного складу феросплаву та шлаку, а також визначення оптимального моменту випуску продукції. Для реалізації цих функцій використовуються моделі на основі механізму уваги, які дозволяють враховувати довготривалі залежності у часових рядах і виділяти найбільш значущі фактори, зокрема зміни у складі шихти, що впливають на результати процесу із часовим лагом.

Так, запропонована мультиагентна архітектура забезпечує інтеграцію спеціалізованих моделей аналізу у межах єдиної системи, що дозволяє підвищити точність прогнозування, узгодженість управлінських рішень та ефективність функціонування рудовідновлювальних печей в умовах високої невизначеності та обмеженості вимірювальної інформації.

Виклад основного матеріалу. Розроблена методологія базується на реалізації адаптивного управління технологічним процесом рудовідновлювальних печей у нестаціонарних режимах функціонування, що передбачає врахування динамічних змін параметрів системи під час пусків після тривалих простоїв та в умовах аварійних ситуацій. У цьому контексті агент-оркестратор забезпечує координацію взаємодії інтелектуальних агентів та формування узгоджених керуючих впливів залежно від поточного стану системи. Його функціонування передбачає використання двох режимів управління, які визначають характер прийняття рішень та розподіл пріоритетів у системі.

У режимі оптимізації здійснюється генерація рекомендацій, спрямованих на досягнення цільових технологічних параметрів, насамперед температури випуску, за умови мінімізації питомих витрат електроенергії, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності металургійних процесів [1]. Водночас у режимі «наставника», який активується у випадку тривалого простою печі понад 24 години, відбувається зміщення акцентів управління – пріоритет передається агенту, відповідальному за безпечний режим функціонування,

тоді як агент-оркестратор обмежує оптимізаційні впливи, здатні порушити регламентовану динаміку розігріву електродів або призвести до деградації футерування. Такий підхід дозволяє забезпечити відповідність керуючих рішень технологічним вимогам і мінімізувати ризики пошкодження обладнання.

Взаємодія між агентами в межах MAS реалізується через протокол узгодження цілей. Якщо Агент Енергоефективності пропонує збільшити потужність для прискорення плавки, Агент-Оркестратор перевіряє цей запит на відповідність динамічним лімітам Агента Безпеки (температура кожуха та стан футерування). Тільки за відсутності порушень технологічних обмежень команда передається на НМІ оператора у вигляді рекомендації щодо зміни посадки електроду.

Підготовка даних та формування ознак здійснюється із застосуванням методу ковзного вікна, що дозволяє враховувати часову інерційність процесу та забезпечує адаптацію моделей до поступового дрейфу параметрів системи. Важливою складовою вхідного простору є інтегральна характеристика накопиченої енергії E_{sum} , яка розраховується з моменту закриття льотки та відображає сукупний енергетичний вплив на ванну, узагальнюючи інформацію про попередні режими роботи печі. Для підвищення інтерпретованості результатів у методологію інтегровано підхід Explainable AI, зокрема використання значень Шеплі, що дозволяє кількісно оцінювати внесок окремих факторів у формування прогнозу та виявляти найбільш значущі параметри процесу.

З урахуванням високої інерційності та нелінійності процесу рудовідновлення оцінювання ефективності запропонованої мультиагентної системи здійснюється шляхом порівняльного аналізу з результатами сучасних досліджень у галузі інтелектуального моделювання технологічних процесів [2]. Очікується, що точність прогнозування температури випуску на горизонті 1,5–3 години характеризуватиметься середньою абсолютною помилкою у межах 12–18°C, що є прийнятним з огляду на технологічні допуски та дозволяє використовувати систему для оперативної підтримки прийняття рішень. При цьому значення коефіцієнта детермінації $R^2 > 0,88$ свідчить про високий рівень узгодженості моделі з реальними процесами, що відбуваються у ванні печі.

Порівняно з монолітними нейромережевими підходами, мультиагентна архітектура демонструє підвищену стійкість у перехідних режимах функціонування, що є критично важливим для промислових умов експлуатації. Очікуваний ефект її впровадження полягає у зниженні питомих витрат електроенергії на 3–5% за рахунок скорочення часу перегріву розплаву після досягнення технологічної готовності, а також у підвищенні рівня технологічної безпеки. Зокрема, застосування предиктивного аналізу темпів зростання температури дозволяє ідентифікувати ризики локальних перегрівів футерування до моменту спрацювання стандартних захисних механізмів.

Важливою перевагою запропонованого підходу є забезпечення інтерпретованості рішень, що досягається завдяки використанню методів Explainable AI. Аналіз внеску вхідних параметрів дозволяє встановити ключову роль накопиченої енергії плавки та положення електродів у формуванні прогнозу, що узгоджується з фундаментальними положеннями електротермії та підтверджує фізичну обґрунтованість побудованих моделей.

Висновки. У ході дослідження розроблено та науково обґрунтовано мультиагентну архітектуру інтелектуальної системи управління рудовідновлювальною піччю, що забезпечує підвищення ефективності функціонування технологічного процесу в умовах обмеженості прямих вимірювань і високої невизначеності виробничого середовища. Отримані результати підтверджують доцільність застосування мультиагентного підходу, який ґрунтується на декомпозиції складного технологічного процесу на окремі функціональні домени, що дозволяє реалізувати спеціалізовані «м'які сенсори» з підвищеною стійкістю до зашумленості промислових даних та більш високою точністю моделювання порівняно з монолітними нейромережевими структурами.

Наукова новизна дослідження полягає у використанні гібридного підходу до навчання, що передбачає інтеграцію фізико-інформованих нейронних мереж у структуру агента-оркестратора. Це забезпечує включення фундаментальних рівнянь теплового балансу у процес оптимізації моделі, що, у свою чергу, гарантує фізичну узгодженість прогнозів і підвищує надійність функціонування системи за умов дефіциту прямих вимірювальних даних.

Встановлено, що впровадження предиктивної аналітики з горизонтом прогнозування 1,5–3 години створює передумови для переходу від реактивного до проактивного управління технологічним процесом, що забезпечує потенційне зниження питомих витрат електроенергії та підвищення рівня технологічної безпеки. Реалізація спеціалізованого режиму управління, орієнтованого на дотримання технологічних регламентів у критичних режимах функціонування, дозволяє мінімізувати ризики порушення роботи електродів і деградації футерування.

Важливим результатом є також забезпечення інтерпретованості прийнятих рішень за рахунок використання методів Explainable AI, що дозволяє подолати обмеження, пов'язані з «чорним ящиком» нейромережових моделей. Отримані пояснювальні характеристики сприяють підвищенню довіри оператора до інтелектуальної системи управління та створюють передумови для її ефективного впровадження у промислову практику.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Behera N., Hamed H., Ghosh A., Sharma C. A hybrid explainable machine learning and optimization framework for energy reduction in DRI-based electric arc furnace steelmaking. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2025. Vol. 11, № 4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01283-0>.
2. Sun Y., Zhang Q., Raffoul S. Physics-informed neural network for predicting hot-rolled steel temperatures during heating process. *Journal of Engineering Research*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.011>.
3. Xia Y., Wang H., Xu A. dmPINNs: An integrated data-driven and mechanism-based method for endpoint carbon prediction in BOF. *Metals*. 2024. Vol. 14, № 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14080926>.
4. Degel R., Borowski N., Reuter M. A., Hecker E. Process modelling and twinning for metals production – a key enabler of the circular economy. *World of Metallurgy – ERZMETALL*. 2024. Vol. 77, № 1. URL: <https://erzmetall.de/en/issues/2024/77/1> (дата звернення: 21.03.2026)
5. Liu H.-X., Li M.-J., Guo J.-Q., Zhang X.-K., Hung T.-C. Temperature prediction of submerged arc furnace in ironmaking industry based on residual spatial-temporal convolutional neural network. *Energy*. 2024. Vol. 309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133024>.
6. Godoy-Rojas D. F., Leon-Medina J. X. Attention-based deep recurrent neural network to forecast the temperature behavior of an electric arc furnace side-wall. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 4. Article 1418. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041418>.
7. Fortuna L., Graziani S., Rizzo A., Xibilia M. G. Soft sensors for monitoring and control of industrial processes. *Springer Science & Business Media*. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-480-9>.
8. Nadim K., Ragab A., Ghezzaz H. Multi agent deep reinforcement learning for supervising local controllers in energy-intensive industrial processes. 2026. *Control Engineering Practice*. 2026. Vol. 170. Article 106794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2026.106794>

UDC 621.365.5:004.8:66.041

D.R. Kontorovych, A.M. Ovcharuk, M.S. Lednov

MULTI-AGENT ARCHITECTURE OF SOFT SENSORS BASED ON DEEP LEARNING FOR PROACTIVE ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT OF SUBMERGED ARC FURNACES

Abstract. *The relevance of this study is determined by the high energy intensity of ferroalloy production and the limited ability to directly monitor internal bath parameters in submerged arc furnaces (SAF), which significantly complicates effective process control under conditions of uncertainty and noisy industrial data. Existing automated control systems are predominantly based on reactive strategies that focus on correcting already occurred deviations, leading to increased energy consumption and higher operational risks. Therefore, there is a growing need to implement proactive approaches capable of predicting system states and generating control actions in advance.*

The aim of this study is to develop a concept of an intelligent control system based on a multi-agent architecture using soft sensors to improve energy efficiency and operational safety. The research employs deep learning methods, including recurrent neural networks (LSTM/GRU), physics-informed neural networks (PINN), as well as multi-agent coordination and decision-making approaches. The proposed system architecture includes specialized agents focused on energy balance, thermal state monitoring, and technological process parameters, whose interaction is coordinated by an orchestrator agent responsible for synthesizing optimal control actions.

The results demonstrate the feasibility of transitioning to proactive control with a prediction horizon of 1–3 hours, enabling reduction of specific energy consumption and mitigation of operational risks. In addition, the proposed approach provides improved robustness to noisy industrial data and enhances the interpretability of model outputs through the integration of explainable artificial intelligence techniques. It is established that the combination of a multi-agent approach with hybrid neural network models improves prediction accuracy, consistency of control decisions, and overall stability and reliability of the technological process in energy-intensive industrial environments.

Keywords: *energy optimization, predictive analytics, physics-informed modeling, time series, digital twin, model interpretability, industrial processes, adaptive control.*

Конторович Дмитро Радиславович - аспірант кафедри електрометалургії ім. М.І. Гасика ННІ ДМетІ Українського державного університету науки і технологій, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7910-2322>

Овчарук Анатолій Миколайович - проф., док. техн. наук, професор кафедри електрометалургії ім. М.І. Гасика ННІ ДМетІ Українського державного університету науки і технологій, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2822-0782>

Ледньов Михайло Сергійович - директор ПрАТ «ВЕГА ПЛЮС», Україна. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0554-0937>

Kontorovich Dmytro Radyslavovych - PhD student, Department of electrometallurgy, NNI DMetI, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7910-2322>

Ovcharuk Anatolii Mykolayovych - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of electrometallurgy, NNI DMetI, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2822-0782>

Lednov Mychailo Mykolayovych - director of JSC “VEGA PLUS” ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0554-0937>

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ГУМОВИХ ВІБРООПОР НА АМПЛІТУДУ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ВІБРАЦІЙНОГО СТОЛУ

Анотація. В статті проводиться розгляд та дослідження вібраційного обладнання для віброформування бетонних виробів з використанням пружних гумових вібраційних опор. Актуальність даної теми підтверджується постійним використанням підприємствами обладнання подібного типу при виготовленні малогабаритних бетонних виробів для облаштування покриття вулиць та майданів. Метою даної роботи було дослідження впливу температури гумових віброопор на амплітуду вертикальних коливань вібраційного столу, дотримання необхідної величини якої має вирішальний вплив на якість виготовленої продукції. Під час дослідів використовувались загальні емпіричні і теоретичні методи досліджень.

На початку проведений розгляд різноманітних конструкцій гумових вібраційних опор, що використовуються у віброформувальному обладнанні, з оцінкою їх конструктивних та експлуатаційних особливостей. Надалі здійснено експериментальні дослідження на діючому вібраційному обладнанні по визначенню температурних режимів роботи гумових віброопор та вимірюванню амплітуди вертикальних коливань робочого органу. У ході досліджень виявлено, що на початку амплітуда коливань має мінімальні значення, а далі зі збільшенням температури гума втрачає жорсткість унаслідок підвищення рухливості макромолекул і зменшення модуля пружності, що призводить до поступового підвищення амплітуди коливань. Виконано детальний аналіз результатів експериментальних досліджень з метою оцінки впливу досліджуваних параметрів на ефективність роботи обладнання. Наведено практичні рекомендації щодо експлуатації та удосконалення віброформувального обладнання з гумовими пружними віброопорами з урахуванням отриманих результатів.

Ключові слова: вібростіл, амплітуда коливань, гума, віброопора, жорсткість, ущільнення, малогабаритні бетонні вироби.

Постановка проблеми. В наш час для віброформування бетонних виробів широко застосовується вібраційне обладнання різних типів [1]. Вібраційний спосіб ущільнення бетонних сумішей на обладнанні подібного типу є доволі поширеним завдяки простоті та високій ефективності.

Надійність і продуктивність вібраційного обладнання значною мірою визначаються станом та довговічністю його пружних віброопор. Саме вони сприймають основні динамічні навантаження, ізолюють фундамент і робочу зону від небезпечної дії вібрації та забезпечують необхідні параметри коливань. Тому під час проектування вібраційних машин вибору та конструкції віброопор приділяють особливу увагу [2,3].

У вібраційному обладнанні застосовуються два основних види пружних віброопор: пружинні та гумові. Кожен з цих видів має як свої переваги, так і недоліки [4,5].

Але використання в якості вібраційних опор саме гумових елементів має свою специфіку застосування, яка потребує розгляду, дослідження та обґрунтування.

Аналіз останніх публікацій і досліджень. Відомо, що від параметрів коливань рухомої частини вібростолу залежить якість ущільнення бетонної суміші [6]. Основними величинами, які впливають на це, є амплітуда та частота коливань рухомої частини вібростолу. В свою чергу, рухома частина вібростолу знаходиться у стані вимушених коливань, частота яких задається віброзбуджувачем, а амплітуда залежить від маси рухомої частини з сумішшю та жорсткості пружних вібраційних опор.

Крім того, зміна жорсткості вібраційних опор впливає на амплітуду коливань рухомої частини вібростолу [4], що слідує з рівнянь:

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (1)$$

де A – амплітуда коливань робочого органу;

$f_0 = F_0 / m$;

ω – циклічна частота коливань робочого органу;

$\beta = b / 2m$;

b – коефіцієнт дисипативного в'язкого опору.

ω_0 – власна частота коливань системи

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт жорсткості пружної опори;

m – маса рухомих частин вібраційного столу.

З рівнянь (1) і (2) випливає, що при зменшенні жорсткості k пружної опори при незмінній масі m її рухомих частин, відповідно зменшується власна частота коливань системи ω_0 , а амплітуда A вимушених коливань рухомої частини вібростолу буде збільшуватися.

Вібраційне обладнання працює у різних кліматичних умовах та в різні пори року. Гумові пружні опори мають бути стійкими до природних умов і в той же час мати підвищену довговічність та зносостійкість. У роботах [4,7] викладено основні принципи конструювання високоефективних пружних опор зі зменшеною матеріалоємністю й збереженням простоти їхніх конструкцій. Пружні елементи опори можуть бути виготовлені з технічної гуми відповідної твердості, але нині краще використовувати нові полімерні матеріали, наприклад поліуретан, який містить уретанову групу $-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$. Кисень у молекулярному ланцюзі надає полімерам гнучкість, еластичність, їм властива атмосферостійкість і морозостійкість (до -60°C) при відносній вологості до 95%. Залежно від вихідних речовин, які використовуються при отриманні поліуретанів, вони можуть мати різні властивості: бути твердими та еластичними.

Постановка задачі. Довговічна експлуатація пружних опор зменшує витрати на їхнє оновлення, знижує пов'язані з простоями для їхньої заміни втрати часу, сприяє підвищенню безпечності експлуатації вібраційної машини в цілому.

Температура в виробничому цеху (або на відкритому майданчику) по виготовленню бетонних виробів в залежності від пори року може коливатися від мінус 20°C взимку до плюс 40°C влітку. Також припускається, що температура гуми, з якої виготовлено віброопору, буде впливати на

технологічні параметри обладнання, насамперед на величину амплітуди коливань робочого органу вібростолу.

Сформульоване завдання досліджень виглядає наступним чином:

- на діючому віброформувальному обладнанні (вібростіл) потрібно провести вимірювання амплітуди вертикальних коливань робочого органу (віброплити);
- метою даного дослідження є виявлення існування залежності амплітуди коливань від зміни температури гумових вібраційних опор;
- представити практичні рекомендації по експлуатації та удосконаленню віброформувального обладнання з гумовими пружними віброопорами.

В якості об'єкта досліджень обираємо технологічний процес віброформувального обладнання.

Викладення основного матеріалу. Основне призначення пружних опор - це зменшення передачі вібрацій від робочого органу віброформувального обладнання на фундамент, раму або робочу платформу.

В цілому вони забезпечують наступне:

- зниження вібраційного навантаження на всю конструкції робочого місця;
- зменшення шуму та динамічних впливів на робоче середовище;
- можливість роботи обладнання без додаткового масивного фундаменту.

Пружні опори разом із масою вібростолу утворюють пружно-масову систему, яка визначає амплітуду коливань A при заданій частоті (1) та власну частоту системи ω_0 (2).

Із вищенаведеного слідує, що пружні опори:

- задають жорсткість системи;
- впливають на амплітуду;
- визначають, наскільки близька робоча частота до резонансної.

Підсумовуючи, можемо зробити висновок, що пружні опори віброформувального обладнання виконують такі функції:

1. Ізоляція вібрацій — зменшення передачі коливань на конструкцію.
2. Забезпечення необхідних параметрів коливань — впливають на амплітуду та частотні властивості.
3. Демпфування — поглинання частини енергії для стабільної і безпечної роботи.

В якості обладнання для проведення досліджень обираємо вібраційний стіл для виготовлення бетонних виробів [8] (рис. 1). Даний тип віброформувального обладнання має широке застосування для виробництва тротуарної плитки, поребрика, бетонних перекриттів невеликих розмірів тощо.

Згідно з технічними вимогами до віброформування залізобетонних виробів [9] технологічні параметри робочого процесу повинні бути в наступних межах:

- амплітуда вертикальних коливань – 0,75-1,0 мм (при діючій циклічній частоті коливань 314 с^{-1});
- тривалість віброущільнення – близько 45 с.



Рисунок 1 - Вібраційний стіл

Тривалість процесу віброформування визначається формою й габаритами виробів, наявністю арматури, типом застосовуваного обладнання, інтенсивністю вібраційного впливу на бетонну суміш, а також її жорсткістю. Орієнтовно час віброформування приймають таким, щоб він відповідав подвійному значенню показника жорсткості бетонної суміші, при цьому його уточнюють за результатами експериментальних перевірок. Контроль відповідності фактичних параметрів вібрації нормативним слід виконувати щотижня у шести–семи характерних точках на поверхні робочого органу за умови паспортного навантаження обладнання.

Всі чотири віброопори (див. рис. 2) даного віброобладнання конструктивно виконані згідно [10]. При виборі конструкції та матеріалу віброопор бралися до уваги їх зручність та експлуатаційна надійність [11].

У якості матеріалу вібраційних опор обираємо гумовий елемент (дюритовий шланг) – рукав Б(І) – 2,5 – 50 – 62 У по ГОСТ 18698-79, завтовшки 6 мм., висотою $h = 100\text{ мм}$, діаметром $d = 62\text{ мм}$.

Метою даного дослідження було виявити залежність амплітуди вертикальних коливань робочого органу від нагрівання гумових віброопор під час роботи вібраційного столу.

Для досягнення поставленої мети були проведені досліди, під час яких одночасно здійснювалось вимірювання амплітуди коливань та температури віброопор.

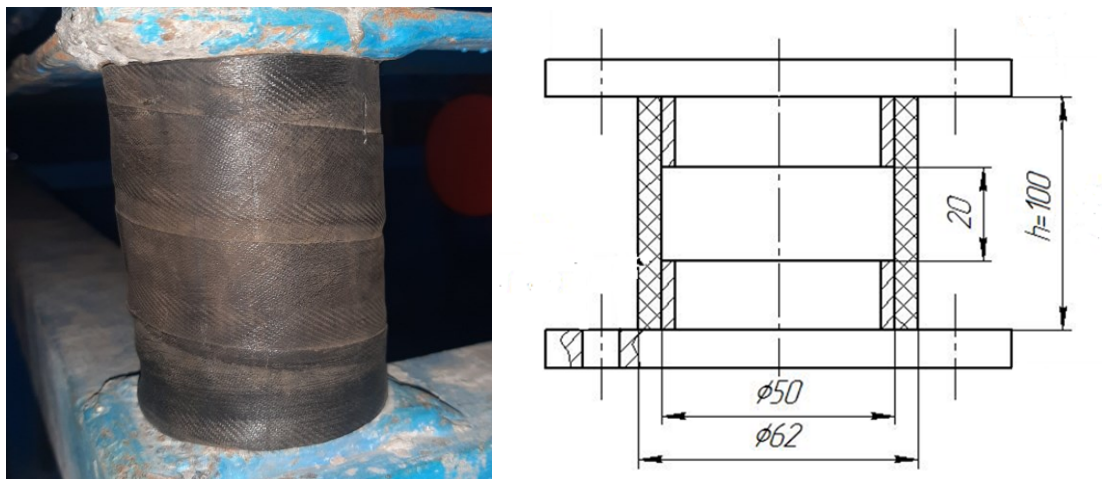


Рисунок 2 - Пружна опора

Для вимірювань використовувалось наступне обладнання (рис. 3):

- пірометр GM300, який вимірює температуру в межах від – 50 до + 420 оС;
- віброметр GM63A, з межами вимірювання для вібропереміщення 0,001-1,999 мм.



Рисунок 3 - Вимірювальне обладнання

План проведення вимірювань:

1. Підготовка до роботи дослідного та вимірювального обладнання.
2. Замір температури гумової віброопори (приблизно повинна збігатися з температурою повітря в робочому приміщенні).
3. Після початку роботи вібраційного столу проводимо одночасне вимірювання температури і амплітуди з інтервалом у 20 секунд.
4. Точка, в якій вимірюється показник, під час досліду, не змінюється.
5. Процес вимірювання продовжуємо до тих пір, поки температура і амплітуда не стабілізують свої значення.

Температура гумових віброопор – це не єдиний і не головний фактор, який впливає на величину амплітуди віброколивень віброформувального обладнання. Вимірювальна амплітуда також залежить від багатьох чинників. Насамперед, від частоти коливень, величини збурюючої сили та загальної маси коливальної системи. В нашому випадку ми розглядали функцію залежності амплітуди від температури віброопор $A = f(T_B)$ при сталих величинах інших впливових чинників.

Результати вимірювань представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Зміна амплітуди вертикальних коливань та температури гумових віброопор під час роботи вібростолу

№ п/п	Час, с, (хв)	Температура, °C	Амплітуда, мм	№ п/п	Час, с, (хв)	Температура, °C	Амплітуда, мм
1	2	4,6	0,66	14	4-20	23,1	0,89
2	20	5,3	0,69	15	4-40	23,4	0,9
3	40	6,2	0,7	16	5	23,6	0,9
4	1 хв	7,2	0,71	17	5-20	23,8	0,9
5	1-20	8,0	0,74	18	5-40	24,1	0,9
6	1-40	10,1	0,78	19	6	24,4	0,91
7	2	12,0	0,82	20	6-20	24,5	0,91
8	2-20	14,5	0,83	21	6-40	24,9	0,91
9	2-40	17,2	0,85	22	7	25,1	0,91
10	3	19,1	0,86	23	7-20	25,1	0,91
11	3-20	20,5	0,87	24	7-40	25,1	0,91
12	3-40	21,6	0,88	25	8	25,1	0,91
13	4	22,8	0,89				

Наглядно зміна амплітуди вертикальних коливань та температури віброопор з плином часу представлена на рис. 4 у вигляді графіків.

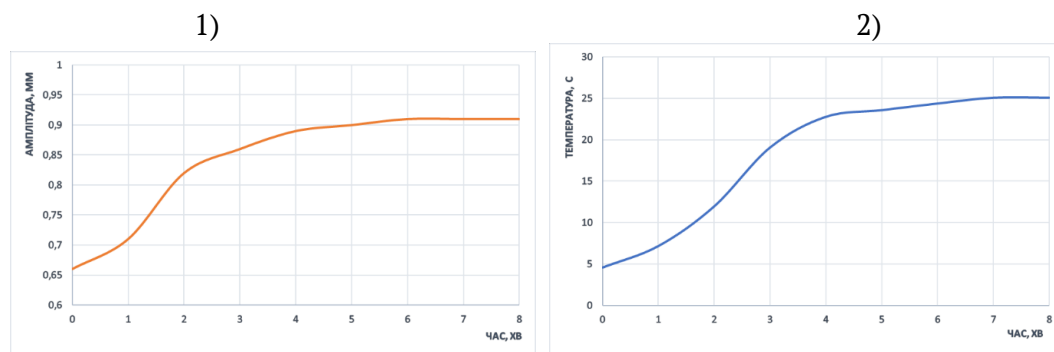


Рисунок 4 - Графік зміни: 1) амплітуди вертикальних коливань; 2) температури віброопор

З аналізу побудованих графіків можемо зробити наступні висновки.

1. З плином часу і температура і амплітуда збільшують свої показники.
2. Максимальне збільшення температури відбувається на протязі двох хвилин в проміжку часу після першої і до четвертої хвилини.
3. Максимальне збільшення амплітуди відбувається на протязі однієї хвилини в проміжку часу після першої і до третьої хвилини.

4. Починаючи з четвертої хвилини величини амплітуди та температури практично не змінюють свого значення і набувають сталої величини наприкінці вимірювального періоду.

У процесі роботи вібростолу гумові елементи зазнають комбінованих деформацій — стиску та згину, що виникають під дією сил збудження від віброзбуджувача. В результаті гума починає нагріватися.

Гума втрачає жорсткість при нагріванні через особливості її молекулярної структури та фізико-механічних властивостей.

Основні причини цього явища наступні.

1. Зростання рухливості макромолекул.

Гума є полімерним матеріалом, структура якого складається з довгих ланцюгів макромолекул. При підвищенні температури:

- збільшується тепловий рух молекулярних ланцюгів;
- послаблюються міжмолекулярні зв'язки;
- ланцюги легше деформуються під навантаженням.

У результаті модуль пружності гуми зменшується, а матеріал стає більш податливим.

2. Зменшення модуля Юнга та модуля зсуву.

Жорсткість гумових елементів безпосередньо залежить від модулів пружності – модуля Юнга та модуля зсуву. При нагріванні величини цих модулів зменшуються, тому за однакової сили деформація стає більшою, а отже жорсткість опори падає.

3. Вплив температури на в'язкопружні властивості.

Гума є в'язкопружним матеріалом, тобто її поведінка залежить і від навантаження, і від температури. З підвищенням температури зростає в'язка складова деформації, що призводить до зменшення опору деформаціям і, як наслідок, до збільшення амплітуди переміщень у гумовому елементі віброопори.

Всі перелічені чинники призводять до того, що зі зростанням температури гуми зменшується її жорсткість, а зменшення жорсткості віброопори збільшує амплітуду коливань робочого органу. При цьому покращується віброізоляція фундаменту, але при надмірному нагріванні можливе зниження несучої здатності самих віброопор.

Отже, зі збільшенням температури гума втрачає жорсткість унаслідок підвищення рухливості макромолекул і зменшення модуля пружності, що характерно для в'язкопружних полімерних матеріалів.

Зменшення жорсткості гумових віброопор призводить до збільшення амплітуди коливань робочого органу вібростолу. Підвищення температури гумових віброопор триває до тих пір, поки кількість тепла, що утворюється в гумі, не зрівняється з кількістю тепла, яка за той же час перейде з неї в навколишнє середовище.

Взявши до уваги результати практичних та теоретичних досліджень технологічного процесу роботи вібраційного столу на гумових вібраційних опорах, можемо сформулювати деякі рекомендації для даного виду віброформувального обладнання.

1. Використання гумових вібраційних опор є цілком прийнятним для виготовлення бетонних виробів на віброформувальному обладнанні.

2. Гумові віброопори доцільно використовувати при високій частоті коливань (більше 50 Гц) і порівняно невеликій амплітуді коливань (до 1,2 мм).

3. Доцільно користуватися подібним видом обладнання у теплу пору року або в приміщеннях з обігрівом при температурі навколишнього повітря від +5°C до +28°C.

4. У холодну пору року потрібно проводити попередній «прогрів» обладнання, для того щоб температура гуми досягла необхідних значень, при яких величина амплітуди вібропереміщень буде оптимальною.

5. Самим оптимальним часом для робочого процесу буде час, коли значення амплітуди коливань набудуть необхідної рекомендованої величини і не будуть змінюватись на протязі процесу віброформування. Це забезпечить досягнення однакового коефіцієнту ущільнення бетонної суміші, і як наслідок – однакової міцності у всіх виробах.

6. Для запобігання сильному нагріву гумових елементів, що може призвести до втрати несучої здатності віброопор та їх інтенсивнішому руйнуванню, рекомендується створити вентиляційні отвори в металевих поверхнях, які ізолюють внутрішній простір віброопори від зовнішнього середовища. При цьому отвори не повинні ослаблювати міцність конструкції вібростолу.

Висновок. У ході експериментального дослідження віброформувального обладнання з пружними гумовими віброопорами та його аналізу було отримано науково обґрунтовані результати, які мають практичну цінність для подальшого розвитку вібраційної техніки та вдосконалення технологічних процесів у виробництві будівельних матеріалів і конструкцій.

Чітке дотримання технології виробництва бетонних виробів має безпосередній вплив на якість виготовленої продукції. Насамперед потребує контролю такий технологічний параметр, як амплітуда віброколивань.

На діючому віброформувальному обладнанні був проведений вимір амплітуди вертикальних коливань віброплити та температури гумових елементів віброопор. Виявлена залежність представлена у виді графіків, з аналізу яких слідує, що температура гумових віброопор впливає на величину необхідної амплітуди вертикальних коливань, а отже на оптимальний режим роботи обладнання. З приводу цього розроблені практичні рекомендації по експлуатації та удосконаленню віброформувального обладнання з гумовими пружними віброопорами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2007. 230 с.
2. Гусев Б. В., Зазимко В. Г. Вібраційна технологія бетону. Київ : Будівельник, 1991. 230 с.
3. Petrović Z., Marković G. Application of rubber pads for vibration isolation in industrial equipment. *Journal of Sound and Vibration*. 2023. Vol. 548. Art. 117522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117522>
4. Нестеренко М. П., Воскобійник О. П., Павленко А. М. Розроблення пружних опор вібраційних площадок для формування залізобетонних виробів. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2017. № 1(43). С. 238–243. URL: <http://journals.nupp.edu.ua/znp/article/view/129>
5. Li Q., Wang X., Zhao Y. Dynamic stiffness and damping characteristics of elastomeric supports for vibration isolation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 210. Art. 111089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.111089>
6. Черевко О. М., Давиденко Ю. О., Черевко П. О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2010. Вип. 2(27). С. 138–146.
7. Нестеренко М. П., Скляренко Т. О., Малинський С. М. Дослідження руху віброплощадки із циліндричними та конічними опорами. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2009. Вип. 2(23). С. 56–62. URL: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/8328>.

8. Коротич Ю. Ю. Обґрунтування параметрів малогабаритного обладнання для віброформування бетонних виробів : дис. ... д-ра філос. : 133 – галузеве машинобудування. Полтава, 2023. 177 с. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14134>.
9. ДСТУ-Н Б А.3.1-34:2016. Настанова з виробництва бетонних і залізобетонних виробів. Чинний від 01.04.2017. Київ, 2017. 24 с.
10. Пружна опора для вібраційних пристроїв : пат. № 68059 Україна. № 2003098610; заявл. 22.09.2003; опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.
11. Нестеренко М. П., Склярєнко Т. О. Розроблення та впровадження ефективної вібраційної установки з круговими коливаннями робочого органа для формування малогабаритних залізобетонних виробів. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). 2012. Вип. 1(31). С. 236–240. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/item/7660>.

Received 15.03.2026.

Accepted 16.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 624.04

Y. Y. Korotych

INFLUENCE OF RUBBER VIBRATION MOUNT TEMPERATURE ON VIBRATING TABLE VERTICAL VIBRATION AMPLITUDE

Abstract. *The article examines and studies vibration equipment used for vibroforming concrete products with the application of elastic rubber vibration mounts. The relevance of this topic is confirmed by the widespread use of such equipment by industrial enterprises in the production of small-sized concrete products for paving streets and public areas.*

The aim of this work was to investigate the effect of the temperature of rubber vibration mounts on the amplitude of vertical oscillations of a vibrating table, maintaining the required value of which has a decisive impact on the quality of the manufactured products. General empirical and theoretical research methods were employed in the study.

Initially, various designs of rubber vibration mounts used in vibroforming equipment were analyzed, with an assessment of their structural and operational features. Subsequently, experimental studies were carried out on operating vibration equipment to determine the temperature regimes of rubber vibration mounts and to measure the amplitude of vertical oscillations of the working element.

The research revealed that at the initial stage the oscillation amplitude has minimal values; however, as the temperature increases, rubber loses stiffness due to increased mobility of macromolecules and a decrease in the modulus of elasticity, which leads to a gradual increase in amplitude. A detailed analysis of the experimental results was

conducted to evaluate the influence of the studied parameters on the efficiency of the equipment operation.

Practical recommendations for the operation and improvement of vibroforming equipment with elastic rubber vibration mounts are provided, taking into account the obtained results.

Keywords: *vibrating table, vibration amplitude, rubber, vibration mount, stiffness, compaction, small-sized concrete products.*

REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (2007). Vibration machines and processes of the construction industry. Kyiv: KNUBA.
2. Gusev, B. V., & Zazymko, V. H. (1991). Vibration technology of concrete. Kyiv: Budivelnik.
3. Petrović, Z., & Marković, G. (2023). Application of rubber pads for vibration isolation in industrial equipment. *Journal of Sound and Vibration*, 548, Article 117522. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117522>.
4. Nesterenko, M. P., Voskobiinyk, O. P., & Pavlenko, A. M. (2017). Development of elastic supports for vibration platforms used in reinforced concrete products manufacturing. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(43), 238–243. <http://journals.nupp.edu.ua/znp/article/view/129>.
5. Li, Q., Wang, X., & Zhao, Y. (2025). Dynamic stiffness and damping characteristics of elastomeric supports for vibration isolation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 210, Article 111089. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.111089>.
6. Cherevko, O. M., Davydenko, Y. O., & Cherevko, P. O. (2010). Influence of vibration parameters on the compaction process of concrete mixtures. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(27), 138–146.
7. Nesterenko, M. P., Skliarenko, T. O., & Malynskyi, S. M. (2009). Study of vibration platform motion with cylindrical and conical supports. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 23(2), 56–62. <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/8328>
8. Korotych, Y. Y. (2023). Substantiation of parameters of compact equipment for vibration forming of concrete products [PhD dissertation. National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»]. eNUPPIR Open. <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14134>.
9. Scientific Research Institute of Construction Production (RIBV). (2017). Guidelines for the production of concrete and reinforced concrete products. (DSTU-N B A.3.1-34:2016).
10. Nesterenko, M. P., Skliarenko, T. O., & Nesterenko, M. M. (2004). Elastic support for vibration devices (Patent No. 68059 A, Ukraine).
11. Nesterenko, M. P., & Skliarenko, T. O. (2012). Development and implementation of an efficient vibration unit with circular oscillations of the working body for manufacturing small-sized reinforced concrete products. *Collection of Scientific Works (Branch Mechanical Engineering, Construction)*, 1(31), 236–240.

Юрій Юрійович Коротич – доктор філософії, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-5318>

Yurii Korotych - PhD, Associate Professor of the Department of branch machinery and mechatronics, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-5318>

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ У ПРОЦЕСІ ЛИТТЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ТИСКОМ НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ОБЛАДНАННІ

Анотація. У статті висвітлено результати впровадження комп'ютеризованої системи керування процесом лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому виробничому обладнанні. Описано практичну реалізацію керування подачею розплаву, тиском ущільнення та охолодження форми в режимі реального часу з урахуванням температурно-швидкісних параметрів кожного циклу. Завдяки алгоритмам адаптивного регулювання вдалося скоротити тривалість технологічного циклу на 10 %, знизити енерговитрати, а також зменшити частку дефектних виробів із пористістю та тріщинами. Встановлено, що використання комп'ютерного моніторингу дозволяє точніше виявляти критичні зони в прес-формі, де відбуваються перегріву або недостатнє заповнення. Наведено технічні характеристики модернізованої лінії та порівняння з традиційною схемою керування. Показано, що впровадження комп'ютерної підтримки прийняття рішень сприяє стабілізації параметрів лиття при змінних умовах роботи, зокрема при переході на нові марки сплавів або зміні конфігурації виробів.

Ключові слова: лиття під тиском, алюмінієві сплави, комп'ютерне керування, адаптивна система, дефекти, модернізація, продуктивність.

Постановка проблеми

Під час лиття алюмінієвих сплавів під тиском часто виникають труднощі з підтриманням стабільних параметрів процесу – тиску, температури, швидкості подачі металу – що безпосередньо впливає на якість виливків. Застарілі системи керування не завжди здатні оперативно реагувати на зміни в технологічному середовищі, що призводить до появи дефектів, нестабільної мікроструктури та перевитрати енергії [1; 2]. Сучасні комп'ютеризовані платформи, які поєднують функції візуального моніторингу, предиктивної

діагностики та автоматичного регулювання, вже демонструють позитивний ефект у частині оптимізації виробничих циклів [3; 4]. Проте у впровадженні таких систем існує низка бар'єрів: труднощі інтеграції з наявним обладнанням, несумісність форматів даних від різних типів сенсорів, а також брак кваліфікованих кадрів, здатних обслуговувати нові комплекси [5]. Усе це зумовлює актуальність дослідження, спрямованого на розробку адаптованої системи комп'ютерного керування для процесу лиття під тиском, яка враховує особливості модернізованих технічних вузлів і динаміку процесу в цілому.

Останні роки позначені стійкою тенденцією до цифровізації процесів лиття алюмінієвих сплавів під тиском, що виявляється у впровадженні комп'ютеризованих систем адаптивного керування, які реагують на зміну стану об'єкта в режимі реального часу. У публікаціях [3; 4; 6] наголошується, що якість литих виробів тісно пов'язана з точністю контролю фаз заповнення, підпресовки та кристалізації, які потребують інтеграції сенсорики, цифрового моніторингу та систем передбачуваного аналізу. Роботи [1; 5; 7] демонструють, що поєднання адитивних технологій із литтям дає змогу виготовляти тонкостінні або порожнисті елементи з мінімальним числом дефектів.

З огляду на фізичну специфіку процесу, однією з ключових змінних залишається швидкість подачі розплаву, яка повинна бути достатньою для повного заповнення форми до початку тверднення. Її визначають, зокрема, через рівняння (1):

$$v = \sqrt{\frac{2(P_i - P_0)}{\rho}} \quad (2);$$

де v – швидкість потоку, P_i – тиск упорскування, P_0 – атмосферний тиск, ρ – густина металу. Цей вираз [2; 8] застосовується в системах автоматичного контролю, де параметри оперативно коригуються на основі зворотного зв'язку.

У загальному вигляді структура керованого технологічного процесу лиття може бути представлена у вигляді функціональної моделі (2):

$$Q = f(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m; a_1, \dots, a_k) \quad (2);$$

де Q – узагальнений показник якості виливка; x_i – інерційні (повільнозмінні) параметри процесу, наприклад, температура металу, хімічний склад або параметри форми; u_j – малоінерційні (швидкодіючі) параметри, що можуть

оперативно регулюватися: тиск, швидкість упорскування, тривалість підпресовки; α_k – коефіцієнти моделі, які відображають зв'язки між змінними. Подібна модель дозволяє не просто спостерігати, а й активно впливати на перебіг процесу, керуючи ним відповідно до заданої мети – мінімізації дефектів або енергоспоживання, що підтверджується результатами [6; 9; 10].

У виробничій практиці, вже створено і впроваджено цілі цехи, де подібні системи діють як невід'ємна частина цифрового виробництва. Система комп'ютерного керування там не лише фіксує процес, а й формує цифрову «тінь» – динамічну модель, що відображає реальний стан прес-форми, температурні поля та критичні точки заповнення [7].

Незважаючи на досягнення, досі існують об'єктивні труднощі: складність інтеграції нових сенсорів з наявними контролерами, неоднорідність форматів даних та висока залежність ефективності систем від рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу. Ці бар'єри вимагають не лише технічних, а й організаційних рішень, що й визначає актуальність подальших досліджень у сфері адаптивного керування литтям на модернізованому обладнанні.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності впровадження адаптивної комп'ютеризованої системи керування процесом лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому обладнанні. У фокусі – аналіз впливу цифрового моніторингу температурно-динамічних параметрів, оптимізація режимів упорскування та охолодження, а також оцінка можливостей зниження енерговитрат і частки браку за рахунок автоматичного регулювання процесу в реальному часі.

Викладення основного матеріалу дослідження

У рамках дослідження було проведено серію експериментів на оновленій ливарній лінії, оснащій комп'ютеризованою системою керування, спеціально адаптованою для високошвидкісного лиття алюмінієвих сплавів під тиском. Система мала дворівневу структуру: на верхньому рівні працював операторський інтерфейс з візуалізацією параметрів і можливістю ручного налаштування, а на нижньому – програмований логічний контролер Simatic S7-1200, який збирав сигнали з датчиків тиску, температури та положення поршня з частотою 10 мілісекунд. Під час випробувань реєструвались ключові динамічні показники – зокрема, швидкість руху поршня (до 7 м/с), тиск

ущільнення, температура форми та температурний перепад у фінальній фазі кристалізації. Як свідчить аналіз отриманих у реальному часі графіків (рис. 1), ефективність лиття значною мірою залежала від точного узгодження фаз: перекриття литникового каналу, завершення заповнення та підпресовки. Завдяки динамічному регулюванню тиску – на основі сигналів з термодатчиків і сенсорів зусилля – вдалося уникнути гідроударів, зменшити об’єм залишків у камері та досягти стабільного формоутворення виливків. На рисунку 1 представлено типовий цикл лиття з фіксацією температури та тиску при різних швидкостях руху поршня.

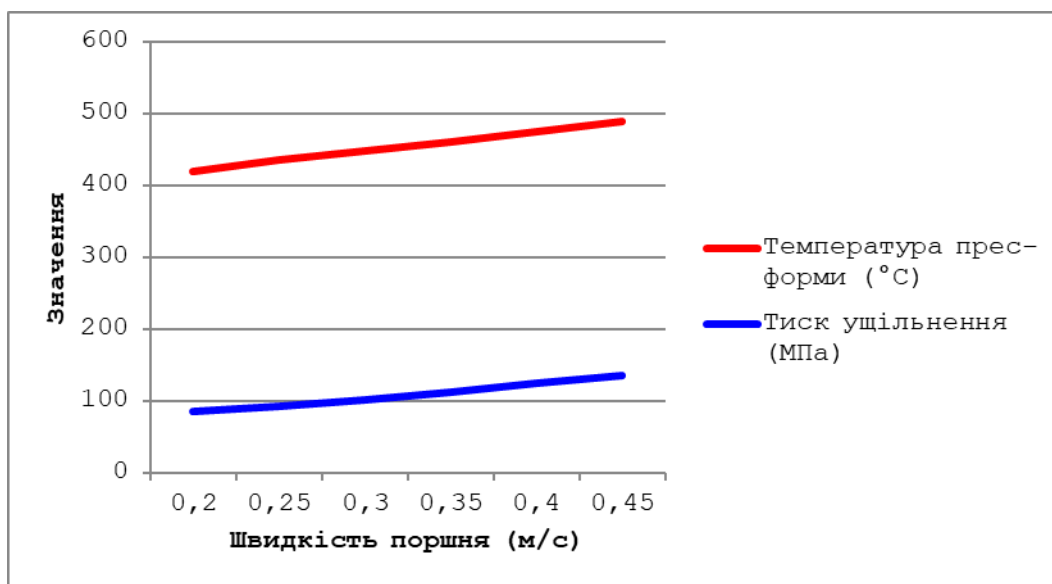


Рисунок 1 – Динаміка температури прес-форми та тиску ущільнення при різних швидкості подачі поршня

Як видно з рисунку 1, зі збільшенням швидкості понад 0,35 м/с зростає тепловіддача у зоні контакту з прес-формою. Це сприяє стабільнішому формуванню структури металу та знижує ймовірність пористості. У таблиці 1 наведено порівняльні дані щодо тривалості циклу лиття, питомих енерговитрат та частки браку для трьох варіантів: стандартна система керування, модернізована система без зворотного зв'язку та повнофункціональна комп'ютеризована система з адаптивним регулюванням.

Таблиця 1

Порівняння техніко-економічних показників систем керування процесом лиття

Система керування	Середня тривалість циклу, с	Енерговитрати, кВт·год/1000 шт.	Частка дефектів, %
Стандартна	46	138,7	7,8
Модернізована	43	132,4	5,6
Адаптивна	40	125,5	3,4

Як видно з результатів, адаптивна система дає відчутний ефект: цикл стає коротшим на 6 секунд, енерговитрати знижуються майже на 10%, а кількість дефектних виробів – удвічі менша порівняно зі стандартною схемою. В ході дослідження було застосовано емпіричну модель (2), яка враховує взаємозв'язок між тиском упорскування та швидкістю заповнення. Модель інтегрували в програмне забезпечення у керування, що дозволило автоматично коригувати тиск подачі у випадках перегріву або надмірної швидкості потоку. Це виявилось особливо корисним при роботі з чутливими до температури сплавами.

На рис. 2 представлено залежність частки дефектних виливків від відхилення температури форми у фінальній фазі кристалізації. Зниження температури нижче оптимуму ($< 210\text{ }^{\circ}\text{C}$) призводить до зростання ризику непроливу, тоді як перегрів спричиняє появу усадочних раковин.



Рисунок 2 – Залежність дефектності лиття від температури прес-форми у фазі тверднення

З рисунка 2 видно, що якщо температура прес-форми перед завершенням кристалізації опускається нижче 210°C , у виливках починають масово з'являтися непроливи – розплав просто не встигає повністю заповнити форму. З іншого боку, коли форма перегріта – понад 250°C , зростає частота усадочних раковин. Це відбувається через надто повільне охолодження металу. Найменше браку фіксується при температурі $220\text{--}235^{\circ}\text{C}$, тобто саме в цьому діапазоні процес іде найбільш стабільно, без дефектів.

Отже, результати експериментів підтвердили ефективність адаптивної системи: вона дозволила не лише зменшити витрати енергії та скоротити тривалість виробничого циклу, а й помітно вплинула на покращення якості відливок. З практичного боку важливо й те, що система працює автономно, без потреби у постійному втручанні оператора, адаптуючись до змін умов у процесі лиття. Це значно спрощує перехід на нові вироби й підвищує стабільність технології.

У ході роботи протестовано комп'ютеризовану систему керування, призначену для лиття алюмінієвих сплавів під тиском. Вона забезпечує постійний збір даних про температуру, тиск, швидкість подачі та умови охолодження. Після впровадження вдалося скоротити тривалість циклу приблизно на 10–12 %, знизити енерговитрати більш ніж на 9 %, а кількість відливок із дефектами зменшилась удвічі. Цифрове моделювання виявилось корисним не лише для моніторингу, а й для втручання у критичних точках – зокрема при коливаннях температури прес-форми або нестабільній кристалізації. Мінімум браку фіксувався при температурі $220\text{--}235^{\circ}\text{C}$, що варто враховувати під час налаштування охолодження. У порівнянні з традиційними схемами, запропонована система продемонструвала не лише стабільну якість відливок, а й значно кращу здатність адаптуватися до зміни умов, наприклад, переходу на інший сплав або нову геометрію виробу. Це дає технічну гнучкість та знижує залежність від людського фактора. З огляду на стабільність параметрів і якість лиття, така система придатна до подальшої інтеграції в автоматизоване виробництво без втрати контрольованості процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. A. Anand, D. Nagarajan, M. El Mansori, T. Sivarupan. Integration of additive fabrication with high-pressure die casting for quality structural castings of aluminium alloys; optimising energy consumption. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023. Vol. 76, № 2. P. 347–379. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02750-y>.
2. M. Bhaskar, G. Anand, T. Nalluswamy, P. Suresh. Die life in aluminium high-pressure die casting industries. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2022. Vol. 103, № 1. P. 117–123. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00317-7>.
3. В. Дорошенко, О. Янченко. Застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку ливарної моделі з вентиляційними каналами в її стінках. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2023. Т. 58, № 3. С. 53–58. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58>.
4. H. Mizgan, M. Ganea. Optimization of aluminium die-casting process through predictive maintenance and parameter traceability systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1256, № 1. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1256/1/012028>.
5. D. Lehmhus. Advances in metal casting technology: A review of state of the art, challenges and trends – Part I: changing markets, changing products. Metals. 2022. Vol. 12, № 11. Art. 1959. <https://doi.org/10.3390/met12111959>.
6. A. Chakrabarti, R. P. Sukumar, M. Jarke, M. Rudack, P. Buske, C. Holly. Efficient modeling of digital shadows for production processes: a case study for quality prediction in high pressure die casting processes. 2021 IEEE 8th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE. October 2021. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/DSAA53316.2021.9564113>.
7. W. Yi, G. Liu, J. Gao, L. Zhang. Boosting for concept design of casting aluminum alloys driven by combining computational thermodynamics and machine learning techniques. Journal of Materials Informatics. 2021. Vol. 1, № 2. <https://doi.org/10.20517/jmi.2021.10>.
8. Y. Yang, J. Hong, Z. Li, C. Su, X. Wei. Robust parameter optimization of 7075 aluminum alloy milling based on improved hunter-prey optimizer algorithm. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2025. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02322-6>.
9. J. Ou, C. Wei, S. Logue, S. Cockcroft, D. Maijer, Y. Zhang та ін. A study of an industrial counter pressure casting process for automotive parts. Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. P. 7111–7124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.124>.
10. J. Wen, F. Xie, X. Liu, Y. Yue. Evolution and development trend prospect of metal milling equipment. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 36, № 1. Art. 33. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00865-x>.

Received 11.03.2026.

Accepted 15.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 669.14:004.9

Kyryll Kreytser, Yevhen Kozishkurt

APPLICATION OF COMPUTER CONTROL SYSTEMS IN THE HIGH-PRESSURE DIE CASTING PROCESS OF ALUMINUM ALLOYS ON MODERNIZED EQUIPMENT

Abstract. *The article addresses the implementation of computer-based control systems in the high-pressure die casting process of aluminum alloys under conditions of*

equipment modernization. The necessity of ensuring high stability of technological parameters – melt velocity, compaction pressure, and mold temperature – under dynamic operational conditions is emphasized. The study presents a control architecture based on a two-level system: the upper level features a fanless industrial panel PC for visual supervision, while the lower level employs a programmable logic controller (Simatic S7-1200) for real-time signal processing and control of casting phases. The experiments were conducted on a renewed casting line equipped with adaptive control algorithms that monitor dynamic parameters every 10 milliseconds. The system enables precise coordination of the melt injection phase, cavity filling, and final compaction, minimizing hydraulic shock and improving mold filling uniformity. Data visualization modules capture casting temperature, piston velocity (up to 7 m/s), and pressure fluctuations during solidification, allowing predictive adjustments and optimization of process phases without operator intervention. The research results confirm a reduction in cycle time by 10–12%, energy consumption per 1,000 units by nearly 10%, and the share of defective castings (due to porosity or shrinkage cavities) by more than 50%. It is demonstrated that maintaining mold temperature within the range of 220–235 °C is critical for defect-free casting, and deviation from this range increases the occurrence of misruns and shrinkage defects. The proposed control system adapts in real time to alloy transitions and changes in mold geometry, supporting more robust, energy-efficient, and quality-stable casting operations. The integration of computer control technologies into die casting contributes to the advancement of digital manufacturing and supports the broader goal of increasing productivity and product reliability in the foundry industry.

Keywords: *high-pressure die casting, aluminum alloys, computer-based control, adaptive system, defects, modernization, productivity.*

REFERENCES

1. Anand, A., Nagarajan, D., El Mansori, M., & Sivarupan, T. (2023). Integration of additive fabrication with high-pressure die casting for quality structural castings of aluminium alloys; optimising energy consumption. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2), 347–379. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02750-y>.
2. Bhaskar, M., Anand, G., Nalluswamy, T., & Suresh, P. (2022). Die life in aluminium high-pressure die casting industries. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 103(1), 117–123. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00317-7>.
3. Doroshenko, V., & Yanchenko, O. (2023). Zastosuvannia kompiuternykh system dlia proektuvannia ta 3D-druku lyvarnoi modeli z ventyliatsiinymy kanalamy v yii stinkakh [Application of computer systems for designing and 3D printing of a casting model with ventilation channels in its walls]. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*, 58(3), 53–58. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58> [in Ukrainian].

4. Mizgan, H., & Ganea, M. (2022). Optimization of aluminium die-casting process through predictive maintenance and parameter traceability systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1256(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1256/1/012028>.
5. Lehmhus, D. (2022). Advances in metal casting technology: A review of state of the art, challenges and trends – Part I: changing markets, changing products. Metals, 12(11), 1959. <https://doi.org/10.3390/met12111959>.
6. Chakrabarti, A., Sukumar, R.P., Jarke, M., Rudack, M., Buske, P., & Holly, C. (2021, October). Efficient modeling of digital shadows for production processes: a case study for quality prediction in high pressure die casting processes. 2021 IEEE 8th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), 1–9. <https://doi.org/10.1109/DSAA53316.2021.9564113>.
7. Yi, W., Liu, G., Gao, J., & Zhang, L. (2021). Boosting for concept design of casting aluminum alloys driven by combining computational thermodynamics and machine learning techniques. Journal of Materials Informatics, 1(2). <https://doi.org/10.20517/jmi.2021.10>.
8. Yang, Y., Hong, J., Li, Z., Su, C., & Wei, X. (2025). Robust parameter optimization of 7075 aluminum alloy milling based on improved hunter-prey optimizer algorithm. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02322-6>.
9. Ou, J., Wei, C., Logue, S., Cockcroft, S., Maijer, D., Zhang, Y., et al. (2021). A study of an industrial counter pressure casting process for automotive parts. Journal of Materials Research and Technology, 15, 7111–7124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.124>.
10. Wen, J., Xie, F., Liu, X., & Yue, Y. (2023). Evolution and development trend prospect of metal milling equipment. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00865-x>.

Крейцер Кирилл Олександрович, кандидат технічних наук, старший викладач Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету, E-mail: dakerkir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>

Козішкурт Євген Миколайович, доктор філософії, старший викладач Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету, E-mail: koziskurtevgen@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>

Kyryll Kreitser, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Educational and Research Institute of the Maritime Fleet, Odesa National Maritime University, E-mail: dakerkir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>

Yevhen Kozishkurt, PhD, Senior Lecturer, Educational and Research Institute of the Maritime Fleet, Odesa National Maritime University, E-mail: koziskurtevgen@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>

Vitalii Kuznetsov, Anatolii Nikolenko, Vasyl Stopkin, Viacheslav Martyntsev,
Roman Tuhushy, Ivan Teslenko

DYNAMIC MODELING OF INDUCTION MOTOR PERFORMANCE UNDER POWER QUALITY DISTURBANCES

Abstract. *The paper presents a dynamic electromagnetic model of a three-phase squirrel-cage asynchronous motor developed to simulate its operation under real power quality disturbances. The relevance of this work is driven by the increasing impact of electromagnetic compatibility issues and energy losses in industrial systems exposed to voltage asymmetry and harmonic distortion—conditions typical for networks with nonlinear loads such as welding equipment, arc furnaces, and frequency converters.*

Traditional motor models, which assume ideal supply conditions, are not sufficient for accurately predicting performance degradation under such disturbances. To address this limitation, the proposed model is based on space-time complexes and an extended form of the Park–Gorev equations. A key feature of the model is the inclusion of magnetic core saturation, represented through a polynomial dependence of mutual inductance on magnetizing current, enabling more realistic simulation under high-load and unbalanced conditions.

The model was tested on an MTKH 112-6 motor (5.3 kW) under two scenarios: ideal sinusoidal voltage and distorted asymmetric supply with harmonics up to the 10th order. The results showed that voltage distortion leads to increased losses in the stator (from 491.3 W to 498.3 W) and rotor (from 652.2 W to 661.5 W), a decrease in efficiency (from 81.4% to 81.2%), and a significant drop in power factor (from 0.98 to 0.90). Additionally, distorted current waveforms and torque pulsations confirmed higher electromagnetic stress.

The model demonstrated strong agreement with experimental data (RMSE < 4%), confirming its reliability for applications in diagnostics, predictive maintenance, digital twins, and simulation environments. Unlike traditional Fourier-based approaches, the use of space-time complexes enables comprehensive modeling of both steady-state and transient processes without explicit harmonic decomposition.

This research contributes to the development of energy-efficient and intelligent industrial systems. Future work will focus on incorporating stochastic elements to account for dynamic variations in power quality, supporting predictive control and advanced automation within Industry 4.0.

Keywords: *asynchronous motor, power quality, dynamic model, voltage asymmetry, harmonic distortion, electromagnetic simulation, efficiency.*

Statement of the problem. Modeling of electromechanical systems constitutes a fundamental component of modern engineering methodology, particularly at the initial stages of design, where the conceptual and functional foundations of technical systems are established. During the pre-project and preliminary development phases, critical decisions are made that determine not only the performance efficiency, but also the reliability, safety, and economic viability of the system as a whole. Traditionally, engineering design relied heavily on empirical approaches, simplified analytical methods, and iterative physical prototyping, which often resulted in increased time consumption and resource expenditures. In contrast, contemporary modeling techniques represent an advanced analytical framework that enables the prediction of system behavior prior to its physical implementation.

Within the context of electric drive system development, modeling serves as an essential tool for ensuring the coordinated and optimal interaction of system components under a wide range of operating conditions. The design process involves not only the selection of appropriate electrical machines and control strategies but also the evaluation of their dynamic performance in regimes including startup, steady-state operation, and emergency conditions. Through the application of mathematical modeling and simulation, it becomes possible to represent both electrical and mechanical subsystems within a unified computational environment, thereby facilitating the analysis of their coupled behavior.

The use of modeling techniques significantly expands the scope of analytical investigations. It allows for the identification of critical system parameters requiring optimization, the localization of energy losses, and the assessment of component durability. By systematically varying input variables—such as supply voltage, frequency, and load torque—engineers can evaluate the sensitivity of system responses and establish optimal operating conditions. This approach provides a

rigorous basis for engineering decision-making, reducing uncertainty and minimizing the need for costly design modifications at later stages.

Particular importance is attributed to the modeling of asynchronous (induction) electric motors, which remain the predominant type of electrical machines employed in industrial applications due to their structural simplicity, robustness, and cost-effectiveness. Despite these advantages, the internal physical processes of induction motors are inherently complex, involving nonlinear electromagnetic interactions, transient phenomena, magnetic saturation, and phase asymmetry. Accurate representation of these processes necessitates the use of detailed mathematical models capable of capturing both steady-state and dynamic characteristics.

The advancement of computational technologies and specialized software tools has significantly enhanced the capabilities of electromechanical modeling. Modern computer-aided design (CAD) systems and simulation platforms, including MATLAB/Simulink, ANSYS, and PSCAD, enable the development of high-fidelity models that incorporate a wide range of physical effects. These tools support the transition from simplified equivalent circuit representations to multidimensional models that account for spatial and temporal variations within the system.

Simulation environments provide the capability to analyze the dynamic behavior of electric machines under various operating scenarios. This includes the investigation of transient processes during startup and braking, response to load disturbances, and system performance under fault conditions. The visualization of mechanical characteristics, such as torque-speed dependencies, facilitates a deeper understanding of system dynamics and aids in the identification of potential instabilities, excessive thermal loading, and abnormal operating modes.

Furthermore, modeling enables comprehensive analysis of both transient and steady-state regimes, which is particularly relevant for systems employing variable frequency drives and advanced control algorithms. Through simulation, different control strategies can be evaluated in terms of their stability, efficiency, and energy consumption without the risks associated with experimental testing on physical equipment.

An additional advantage of modeling lies in its ability to establish quantitative relationships between input parameters and system responses. Variations in supply

conditions or load characteristics can be systematically examined, allowing for the development of adaptive control strategies that enhance system performance under variable operating conditions.

Modeling also plays a critical role in the development of diagnostic and predictive maintenance methodologies. By simulating various fault conditions—such as phase loss, inter-turn short circuits, and load imbalances—it is possible to identify characteristic signatures of system degradation and to design algorithms for early fault detection. This contributes to increased operational reliability and supports the transition from reactive maintenance approaches to condition-based and predictive maintenance strategies.

In summary, modeling of electromechanical systems represents an integral element of contemporary engineering science, providing a rigorous framework for the analysis, optimization, and validation of complex technical systems. It enables the integration of theoretical principles with practical design considerations, thereby enhancing the efficiency, reliability, and sustainability of engineering solutions. Under the conditions of increasing technological complexity and performance requirements, modeling serves as a key enabler of innovation and engineering advancement.

In recent decades, the development of quantitative modeling methods for electrical machines has reached a high level of sophistication, enabling researchers and engineers to simulate a wide range of operating conditions with considerable accuracy. However, as practical experience in industrial environments increasingly demonstrates, such models often remain insufficient when confronted with the complexity of real-world power supply conditions. In particular, the presence of qualitative characteristics of supply voltage—most notably voltage asymmetry and nonsinusoidal waveform distortion—introduces a level of complexity that cannot be adequately captured by conventional modeling approaches.

Voltage asymmetry, defined as the inequality of phase voltages in magnitude and/or phase displacement within a three-phase system, represents a significant deviation from the ideal symmetrical conditions assumed in classical theories. Similarly, nonsinusoidal voltage distortion, commonly referred to as harmonic distortion, arises from the superposition of higher-order harmonic components onto the fundamental sinusoidal waveform. These distortions are not merely theoretical

anomalies; rather, they are pervasive features of modern industrial power systems, where the proliferation of nonlinear electrical loads has become the norm.

A closer examination of industrial settings—particularly within large-scale manufacturing facilities—reveals the widespread use of powerful nonlinear consumers such as arc furnaces, frequency converters, variable-speed drives, and welding units. These devices, by their very nature, draw current in a discontinuous and nonlinear manner. As a consequence, they inject harmonic currents into the power network, thereby distorting the voltage waveform and contributing to phase imbalances. The electrical grid, which serves as a common coupling point for various loads, becomes a medium through which these disturbances propagate, inevitably affecting all connected equipment, including asynchronous motors.

The asynchronous motor, being one of the most widely used electromechanical energy converters in industry, is particularly sensitive to such deviations in power quality. Under conditions of voltage asymmetry, negative-sequence currents are induced within the motor windings, leading to the generation of counter-rotating magnetic fields. These fields produce additional losses and localized heating, which significantly degrade the thermal performance of the machine. Concurrently, harmonic distortion introduces pulsating torques and electromagnetic forces, resulting in mechanical vibrations, acoustic noise, and increased mechanical stress on the motor components.

As the narrative of practical operation unfolds, it becomes evident that the combined effect of asymmetry and harmonic distortion manifests in a series of detrimental phenomena. Among these are excessive heating of stator and rotor windings, increased copper and iron losses, magnetic core saturation, torque ripple, and a marked reduction in overall efficiency. Over time, these factors accelerate the aging of insulation materials, thereby shortening the operational lifespan of the motor. Furthermore, the irregular operating conditions may lead to unintended activation of protection systems, such as relay tripping, and may compromise the performance of control algorithms that are typically designed under the assumption of ideal, balanced, and sinusoidal supply conditions.

Recognizing these challenges, the scientific and engineering communities have increasingly turned their attention to the development of more advanced modeling frameworks capable of capturing the multifaceted nature of power quality

disturbances. Traditional steady-state and simplified dynamic models are gradually being supplemented—or even replaced—by approaches that incorporate the theory of symmetrical components, allowing for the decomposition of unbalanced systems into balanced sequence networks. In parallel, harmonic domain analysis provides a means of examining the interaction of individual frequency components, offering deeper insight into the effects of distortion on motor behavior.

In addition to frequency-domain techniques, time-domain modeling has emerged as a powerful tool for capturing transient and nonlinear phenomena associated with distorted supply conditions. Such models enable the explicit representation of harmonic interactions, saturation effects, and dynamic coupling between electrical and mechanical subsystems. Importantly, the reliability of these models depends not only on their mathematical rigor but also on their validation against empirical data obtained from power quality monitoring instruments deployed in real industrial environments.

The integration of simulation platforms with advanced analytical tools—such as Fast Fourier Transform (FFT) algorithms, harmonic analyzers, and power quality assessment modules—has further enhanced the ability of researchers to investigate complex electromechanical interactions. These tools facilitate the identification and quantification of harmonic components, enabling more accurate parameterization of models and more reliable prediction of system behavior under non-ideal conditions.

As the narrative progresses toward a broader perspective, it becomes clear that the future of asynchronous motor modeling lies in the adoption of holistic, multi-domain approaches. Such approaches must account not only for electrical disturbances but also for their mechanical consequences, including vibration dynamics, thermal effects, and material degradation. By bridging the gap between electrical engineering, materials science, and mechanical dynamics, researchers can develop comprehensive models that more faithfully represent the realities of industrial operation.

In conclusion, while traditional modeling techniques have provided a solid foundation for understanding the fundamental behavior of asynchronous motors, they fall short when applied to the complex and often harsh conditions of modern industrial power systems. The inclusion of voltage asymmetry and harmonic distortion into simulation frameworks is no longer optional but essential. Only

through the continued advancement of modeling methodologies—supported by empirical validation and interdisciplinary integration—can engineers ensure accurate performance evaluation, enhance energy efficiency, extend equipment lifespan, and maintain the operational reliability of asynchronous motors in real-world applications.

Analysis of recent research and publications. A substantial body of scientific literature, including the studies presented in papers [1–7], provides a detailed examination of the underlying causes of disturbances in power supply systems, particularly focusing on voltage asymmetry and nonsinusoidal waveform distortion. These works consistently highlight that such disturbances are primarily generated by the widespread use of nonlinear electrical loads, rapid switching processes in power electronic converters, unbalanced loading of three-phase systems, and structural imperfections within electrical networks. As modern industrial systems continue to evolve toward increased automation and electrification, the prevalence of these factors has significantly intensified, making the issue of power quality a central concern in both research and practical engineering applications.

It is well established that deviations from ideal power supply conditions have a pronounced negative impact on the operational characteristics of asynchronous machines. Numerous experimental and theoretical studies confirm that even relatively small levels of voltage asymmetry or harmonic distortion can lead to disproportionately large adverse effects. These include additional power losses, overheating of stator and rotor windings, deterioration of insulation systems, increased electromagnetic torque pulsations, mechanical vibrations, and acoustic noise. Furthermore, such conditions may result in reduced efficiency, decreased power factor, and instability in motor operation, particularly under variable load conditions. In extreme cases, prolonged exposure to poor-quality electrical energy can lead to premature failure of the machine, resulting in costly downtime and maintenance.

From a physical standpoint, the influence of voltage asymmetry manifests through the emergence of negative- and zero-sequence components in the supply system, which induce additional currents and counter-rotating magnetic fields within the motor. These phenomena not only increase thermal stress but also

disrupt the uniformity of electromagnetic torque production. On the other hand, nonsinusoidal voltage distortion introduces higher-order harmonic fields that interact with the fundamental magnetic field, giving rise to complex dynamic effects. The interaction of these harmonics can lead to resonance phenomena, localized saturation of the magnetic core, and irregular energy conversion processes within the machine.

In order to systematically evaluate and quantify the influence of these negative factors, it becomes necessary to develop an advanced mathematical model of the asynchronous motor, particularly for the widely used configuration with a short-circuited (squirrel-cage) rotor. Such a model must go beyond conventional assumptions of symmetry and sinusoidality, incorporating instead a detailed representation of power quality indices. These indices include, but are not limited to, voltage unbalance factor, total harmonic distortion (THD), individual harmonic amplitudes, frequency deviations, and phase angle distortions. Only by integrating these parameters into the model can one achieve a realistic and comprehensive analysis of motor performance under non-ideal supply conditions.

The proposed modeling approach should enable the analysis of power dependencies of the asynchronous motor as a function of varying quality parameters of the electrical grid. This implies the ability to simulate how input electrical power, electromagnetic torque, efficiency, losses, and thermal states evolve in response to changes in voltage asymmetry and harmonic content. Such a model must also account for nonlinear magnetic properties, saturation effects, and the coupling between electrical and mechanical subsystems. In addition, it is important to consider the influence of load characteristics and operating режимs, as these factors can significantly alter the sensitivity of the motor to power quality disturbances.

Modern computational tools and simulation environments provide the necessary framework for implementing such complex models. By combining time-domain simulations with frequency-domain analysis techniques—such as harmonic decomposition and spectral analysis—it becomes possible to capture both steady-state and transient behaviors of the motor. Moreover, the inclusion of real measurement data obtained from power quality analyzers can significantly enhance the accuracy and practical relevance of the model.

Recent research published in the MDPI Energies journal reflects a clear and consistent evolution in the understanding of how power quality disturbances affect the performance of induction motors. While earlier studies typically examined isolated disturbances—such as voltage unbalance, harmonic distortion, or voltage sags—modern investigations increasingly recognize that real industrial power systems are characterized by the simultaneous presence of multiple disturbances. This shift has led to the development of more comprehensive analytical frameworks, particularly those based on dynamic modeling approaches that capture the interaction between electrical, mechanical, and thermal processes within the motor.

A key contribution to this integrated perspective is presented by Paweł Gnaciński, Michał Gorniak, and Tomasz Tarasiuk (2026). Their work [8] systematically investigates the energy-efficient operation of industrial induction motors under conditions of multiple simultaneous power quality disturbances. The authors demonstrate that even when individual disturbance indices—such as total harmonic distortion (THD) or voltage unbalance factor—remain within standardized limits, their combined influence can result in a disproportionately large increase in power losses, reduced efficiency, and elevated thermal stress. This finding highlights a critical limitation of conventional power quality assessment methods, which tend to evaluate disturbances independently. The study further emphasizes that nonlinear interactions between disturbances can amplify electromagnetic torque oscillations and increase stator and rotor losses beyond expected values. Consequently, the authors advocate for the adoption of integrated modeling techniques that explicitly account for the superposition of disturbances, thereby enabling more realistic prediction of motor performance in industrial environments.

The importance of transient phenomena in the context of power quality is further elaborated in the work [9] of Marta Konuhova (2025), who develops a detailed mathematical model to simulate the response of induction motors to voltage sags. Unlike steady-state analyses, this study focuses on the dynamic behavior of the motor during both the disturbance and the recovery phase. The results show that voltage sags lead to a rapid decrease in electromagnetic torque and a corresponding increase in stator current, which may trigger protective mechanisms or cause mechanical stress. Of particular importance is the re-acceleration process following voltage recovery, during which the motor may experience prolonged instability,

oscillations in speed, and additional thermal loading. These findings underscore the necessity of incorporating time-dependent variables into the modeling framework, as steady-state approximations fail to capture the full extent of performance degradation under transient conditions.

The interaction between induction motors and the power system is further explored by Yuriy Varetsky and Marek Gajdzica (2024), who analyze power compatibility in industrial grids that include synchronous generators. Their research [10] highlights the bidirectional nature of this interaction: while poor power quality adversely affects motor operation, the behavior of induction motors—particularly during starting or large load variations—can also influence network voltage profiles. The authors demonstrate that motor starting currents can exacerbate voltage dips and distortions, thereby affecting other equipment connected to the same network. This insight reinforces the concept that induction motors should not be treated as passive loads but rather as active participants in the electrical system, whose dynamic characteristics must be considered in system-level modeling.

A substantial body of work by Paweł Gnaciński and his co-authors (2024, 2022) [11-13] provides a comprehensive investigation into complex and less conventional forms of voltage distortion, including subharmonics and interharmonics. In their 2024 study [11], the authors analyze the combined effect of voltage unbalance and subharmonics, demonstrating that this combination leads to significantly increased torque pulsations, mechanical vibrations, and acoustic noise. These effects are particularly detrimental in precision industrial applications, where even small oscillations can compromise process quality. Earlier studies (2022) [12, 13] extend this analysis to symmetrical subharmonics and interharmonics, showing that these frequency components introduce additional losses in both stator and rotor circuits. Moreover, the presence of negative-sequence subharmonics is found to be especially harmful, as it produces reverse rotating magnetic fields that increase rotor heating and reduce overall efficiency. Importantly, these studies reveal that such disturbances are increasingly common in modern power systems due to the widespread use of power electronic converters.

The influence of harmonic distortion on motor operation is further examined by Tomáš Drábek (2023), who focuses on the practical implications of high harmonic content in supply voltage. The study [14] demonstrates that harmonics contribute to

additional copper losses due to increased RMS current, as well as iron losses resulting from higher-frequency magnetic flux variations. As a result, the thermal limits of the motor are reached more quickly, necessitating derating to ensure safe operation. The author provides quantitative relationships between harmonic levels and permissible load reduction, offering valuable guidelines for industrial practitioners. This work bridges the gap between theoretical analysis and practical engineering application, highlighting the importance of incorporating power quality considerations into operational planning and equipment selection.

Complementary to this, Alfredo Gudiño-Ochoa and colleagues (2023) investigate the generation of interharmonics in induction motors supplied by variable frequency drives and AC choppers [15]. Their analysis reveals that modern power electronic systems introduce complex spectral components that interact with the motor's electromagnetic processes, leading to additional torque ripple and potential resonance phenomena. The study emphasizes that interharmonics are not merely a byproduct of supply conditions but can also be generated within the motor-drive system itself. This finding is particularly relevant for contemporary industrial applications, where variable speed drives are widely used to improve energy efficiency but simultaneously introduce new challenges in power quality management.

From a methodological perspective, Lluís Guasch-Pesquer et al. (2022) propose an improved approach for determining the voltage unbalance factor based on induction motor behavior [16]. Traditional methods rely solely on voltage measurements, which may not accurately reflect the actual impact on the motor. By incorporating current asymmetry into the calculation, the proposed method provides a more realistic assessment of the motor's operating conditions. This approach aligns with the broader trend toward integrating machine response into power quality evaluation, thereby enabling more accurate and application-oriented analysis.

Finally, the work of José Muñoz Tábor et al. (2020) provides a comparative analysis of the impact of harmonic distortion on induction motors of different efficiency classes (IE2, IE3, and IE4). The study reveals that higher-efficiency motors, while generally exhibiting lower baseline losses, may respond differently to harmonic distortion compared to standard-efficiency machines [17]. In some cases,

the relative increase in losses due to harmonics is more pronounced in high-efficiency motors, challenging the assumption that improved efficiency inherently implies greater robustness to power quality disturbances. This finding is particularly important in the context of modern energy policies that promote the adoption of high-efficiency equipment without fully considering the quality of the power supply.

The reviewed literature clearly indicates that the impact of power quality on induction motor performance is a multidimensional problem that cannot be adequately addressed using simplified or isolated analyses. Several important conclusions can be drawn.

First, the combined effect of multiple disturbances—such as harmonics, voltage unbalance, subharmonics, and voltage sags—results in nonlinear interactions that significantly amplify their individual impacts. Second, transient phenomena, particularly those associated with voltage sags and recovery processes, play a crucial role in determining motor stability and reliability. Third, the increasing use of power electronic converters introduces new types of disturbances, such as interharmonics, which require advanced modeling techniques. Fourth, there is a growing recognition that induction motors are active elements within the power system, contributing to and being affected by network conditions.

Taken together, these findings strongly support the need for a dynamic model-based approach to analyzing induction motor performance under non-ideal power supply conditions. Such an approach enables the integration of multiple disturbance types, the simulation of transient processes, and the evaluation of both electrical and mechanical responses of the motor. Therefore, the methodology adopted in this study is consistent with current research trends and addresses the limitations identified in existing literature.

Objective of the study. The aim of this study is to develop a mathematical model of an asynchronous motor that accurately reflects variations in its power-related characteristics under different levels of supply voltage quality indices, as well as to validate the effectiveness of its implementation in a software environment.

Developing dynamic electromagnetic am model operating in terms of poor-quality electric energy.

A number of methodological approaches have been developed to account for supply voltage parameters when modeling processes in electromechanical systems

[18]. Among these, a particularly effective approach involves the use of differential equations formulated with respect to space-time complexes (STC) [3]. In this framework, the space-time complex—also referred to as a generalized vector—is defined for each variable Y and is determined as follows:

$$Y = \frac{2}{3} (Y_A + \alpha Y_B + \alpha^2 Y_C) \quad (1)$$

where Y_A, Y_B, Y_C are values of the considered variable in terms of phases. The projections of the space-time complex onto the phase axes correspond directly to the instantaneous values of the respective phase variables. In other words, the generalized vector representation enables a unified description of phase quantities by mapping them onto a coordinate system that captures both spatial and temporal variations of electromagnetic processes within the machine.

When the system of equations is formulated in terms of space-time complexes, the classical Park–Gorev equations [3], which form the theoretical foundation of widely used asynchronous motor models, can be expressed in a more generalized and analytically convenient form. This transformation allows the originally phase-based differential equations to be represented in a rotating reference frame, significantly simplifying the analysis of electromagnetic interactions.

Such an approach provides important advantages for modeling, as it enables the decoupling of variables, reduces the complexity of the system, and facilitates the inclusion of non-ideal factors such as voltage asymmetry and harmonic distortion. As a result, the Park–Gorev equations in the STC framework serve as a powerful tool for describing both steady-state and transient operating conditions of asynchronous motors, forming the basis for advanced simulation models used in modern electromechanical system analysis:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_1}{dt}, \quad (2)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_2}{dt} - j\omega_m \underline{\Psi}_2, \quad (3)$$

where $\underline{U}_1$ is STC of stator voltage, $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ are STC of currents of stator, rotor, and magnetizing current, $\underline{\Psi}_1, \underline{\Psi}_2$ are STC of stator and rotor flux linkages, ω_m is angular velocity of AM rotation, and R_1, R_2 are active stator and rotor resistances.

In the presented system of equations, $\underline{U}_1$ denotes the space-time complex (STC) of the stator voltage. The quantities $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, and $\underline{I}_0$ represent the STCs of the stator current, rotor current, and magnetizing current, respectively. The variables $\underline{\Psi}_1$ and $\underline{\Psi}_2$ correspond to the STCs of the stator and rotor flux linkages.

The parameter ω_m defines the angular velocity of the asynchronous motor's rotation, reflecting the mechanical speed of the rotor in electromagnetic coordinates. The coefficients R_1 and R_2 denote the active (ohmic) resistances of the stator and rotor windings, respectively.

Such a formulation enables a compact and comprehensive representation of the electromagnetic processes occurring within the machine, allowing both electrical and mechanical variables to be analyzed within a unified mathematical framework based on space-time complexes.

A thorough analysis of asynchronous motor operation requires explicit consideration of magnetic core saturation, especially when evaluating dynamic behavior and energy-related performance indicators. This phenomenon represents a strongly nonlinear effect that substantially influences the electromechanical characteristics of the machine, including torque production, transient processes, efficiency, and thermal conditions. Neglecting saturation in modeling and design stages can result in significant discrepancies between simulated and actual performance, particularly under heavy load or non-standard operating regimes.

Magnetic saturation originates from the inherent physical properties of ferromagnetic materials used in the magnetic circuits of stator and rotor cores. At relatively low levels of magnetizing current, the magnetic domains within the material align progressively with the applied magnetic field, leading to a nearly proportional increase in magnetic flux. However, as the excitation level grows, the degree of domain alignment approaches its physical limit. Once this limit is reached, further increases in current produce only marginal growth in magnetic flux, as most domains are already oriented. This state corresponds to saturation and is characterized by a pronounced reduction in magnetic permeability.

The onset of saturation significantly modifies the electromagnetic parameters of the motor, particularly its inductive properties. Both self-inductance and mutual inductance decrease under saturated conditions, which alters the electromagnetic interactions within the machine. As a result, the motor's ability to generate torque is

affected, especially during transient events such as startup, sudden load changes, or disturbances in supply voltage. Lower inductance also increases the sensitivity of the motor to current spikes and reduces its capacity to dampen electrical perturbations. Consequently, models that ignore saturation tend to produce overly optimistic predictions, underestimating peak currents and overestimating system stability.

In addition to its impact on dynamic performance, magnetic saturation leads to higher energy losses within the motor. The nonlinear magnetization process intensifies hysteresis losses and promotes the generation of eddy currents in the core material. These losses are dissipated as heat, increasing the thermal stress on the machine. Elevated temperatures not only reduce operational efficiency but also accelerate the degradation of insulation systems, thereby decreasing the overall reliability and service life of the motor. Prolonged or repeated operation under saturated conditions may result in overheating, increased mechanical vibrations, and ultimately premature failure of critical components.

The influence of magnetic saturation is also reflected in the distortion of current waveforms. Due to the nonlinear nature of the magnetization characteristic, the resulting magnetic flux deviates from a purely sinusoidal form, which leads to the appearance of higher-order harmonics in both current and voltage. These harmonic components can spread throughout the power network, negatively impacting other connected equipment, causing electromagnetic interference, and contributing to a deterioration in overall power quality. In industrial power systems that operate multiple high-power motors simultaneously, the combined effect of such distortions can become substantial and difficult to mitigate.

To adequately represent the effects of magnetic saturation, it is necessary to employ advanced modeling techniques that go beyond linear assumptions. Such approaches include nonlinear magnetic circuit models that accurately describe the B–H characteristics of ferromagnetic materials, finite element methods (FEM) that enable detailed spatial analysis of electromagnetic fields, and the use of experimentally derived data sets or lookup tables that reflect saturation behavior in different parts of the machine. The application of these methods is particularly important in high-demand systems—such as variable-speed drive systems, electric traction applications, and automated industrial processes—where motors frequently

operate near or beyond the limits of their linear magnetic region, making precise modeling essential for reliable and efficient performance.

Magnetic saturation of the core is a key factor that must be incorporated into both the modeling and design of asynchronous motors. Its impact extends across electrical, mechanical, and thermal aspects of operation, directly influencing performance characteristics, energy efficiency, and overall reliability. A comprehensive and accurate consideration of saturation phenomena is therefore essential to ensure that motors function safely, stably, and efficiently under practical operating conditions[19]. A range of approaches exists for taking this effect into account. [3, 20-22]. Incorporating the dependence of the main mutual inductance on the magnetizing current, expressed as $L_{12}=f(I_0)$, provides an optimal balance between computational simplicity and modeling accuracy.

Such a relationship can be approximated using polynomial functions of even order [22], which provide a convenient way to represent the nonlinear behavior of the magnetic system. The value of the magnetizing branch inductance under unsaturated conditions is typically available in reference literature [23], or it can be estimated with sufficient accuracy based on the results of a no-load test [24].

At the same time, the identification of coefficients for the polynomial describing the dependence of inductance on the magnetizing current constitutes a separate and nontrivial problem, requiring either experimental data or parameter estimation techniques. In the present study, the formulation proposed in [25–27] was adopted as the basis for modeling.

Accordingly, when defining the expression for flux linkage, it becomes necessary to include the following components:

$$\underline{\Psi}_1 = \underline{I}_1 \cdot L_1 + L_{12}(I_0) \cdot \underline{I}_2; \underline{\Psi}_2 = \underline{I}_2 \cdot L_2 + L_{12}(I_0) \cdot \underline{I}_1 \quad (4)$$

Fig. 1 demonstrates structural diagram of the modeling object; the diagram expresses equations (2) and (3) taking into account (4).

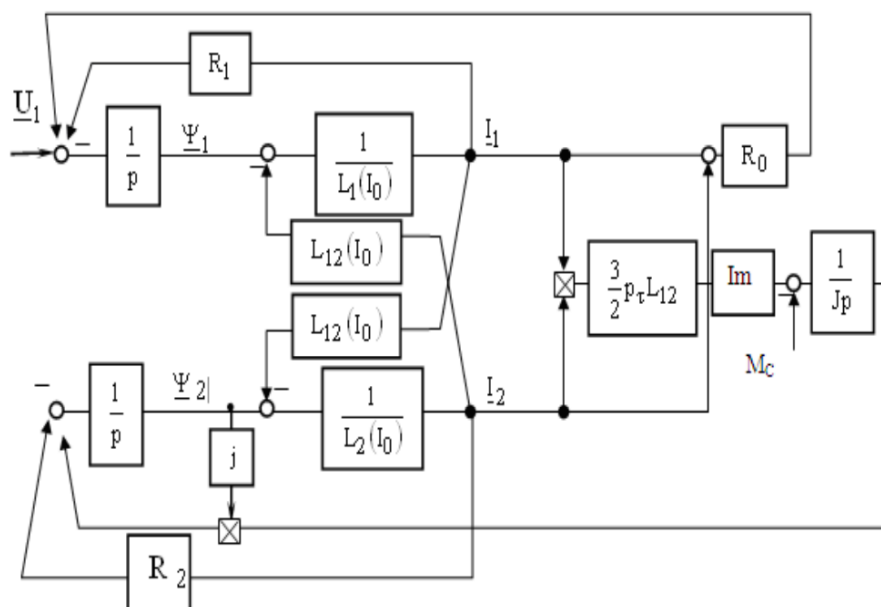


Figure 1 – Structural diagram of asynchronous motor as a modeling object

The application of space-time complexes is a common feature in many modern modeling approaches. Since this method operates with instantaneous values of currents and voltages, it eliminates the need for separate spectral decomposition and the formulation of individual equations for each harmonic component.

Moreover, such equations represent a compact form of the three-phase system, which inherently allows the inclusion of supply voltage asymmetry in the model. As a result, the considered system can be regarded as a universal modeling framework, capable of accurately describing both steady-state operation and dynamic processes, including transient phenomena such as starting, deceleration, and load variations.

Obtaining an analytical solution of equation systems (2) and (3) is a complex task and, as noted in [3], requires the introduction of a number of существенных допущений, which can limit the accuracy and applicability of the results. Therefore, in practical studies, preference is typically given to numerical methods. These methods are based on approximating infinitesimal changes of the desired variables by finite increments, as implemented, for example, in the Euler method, and on rewriting the original equations in Cauchy (normal) form.

Within the framework of the considered model, the angular velocity of the asynchronous motor, along with the space-time complexes of stator and rotor flux linkages, are treated as state variables. Their determination requires supplementing

the original system of equations with additional known relationships that describe the dynamic behavior of the system:

$$M = \frac{3}{2} p_{\tau} L_{12} \operatorname{Im}(\underline{I}_1^* \underline{I}_2); M - M_c = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

where M_c is static moment; J is moment of inertia of a mechanical drive part; and p_{τ} is number of pole pairs.

Software implementation of such AM model operating in terms of poor-quality power is tested by describing starting process, load rise, and steady-state mode of the motor of MTKH 112-6 type with the power of 5.3 kW. In terms of power, in case one, ideal three-phase voltage corresponding to quality indices is used; in case two, asymmetric nonsinusoidal voltage is used corresponding to real one which indices are represented in Table I. Fig. 2 demonstrates STC hodographs of the indicated voltages which show that asymmetric power stipulates elliptic hodograph shape while nonsinusoidality distorts its shape.

Table 1.

Indices of supply voltage quality

Voltage deviation in terms of phases, %								
A			B			C		
11.20			18.80			1.00		
Coefficients of harmonic constituents, %								
2	3	4	5	6	7	8	9	10
5.800	0.8300	1.69100	0.0300	2.78100	0.0300	0.08100	0.2310	0.400

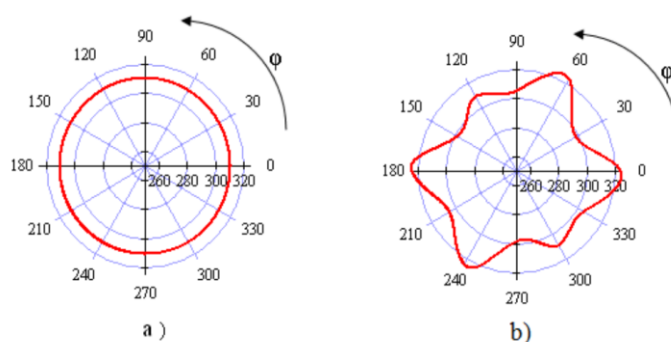


Figure 2 – Hodographs of space-time voltage complexes corresponding to indices of quality (a) and asymmetric nonsinusoidal voltage (b).

Further, there are obtained graphs of main motor coordinates. As it is seen, available harmonic constituents in AM power results in the development of moment pulsations. Fig. 3 shows instantaneous currents of stator and rotor; Fig. 4 demonstrates hodograph of asynchronous motor moment within one rotation.

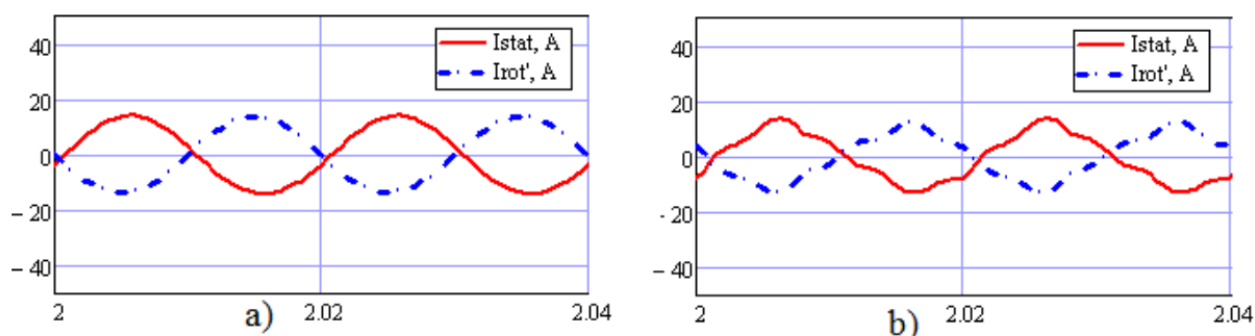


Figure 3 – Currents of stator and rotor in terms of ideal (a) and poor-quality (b) power supply in steady-state mode.

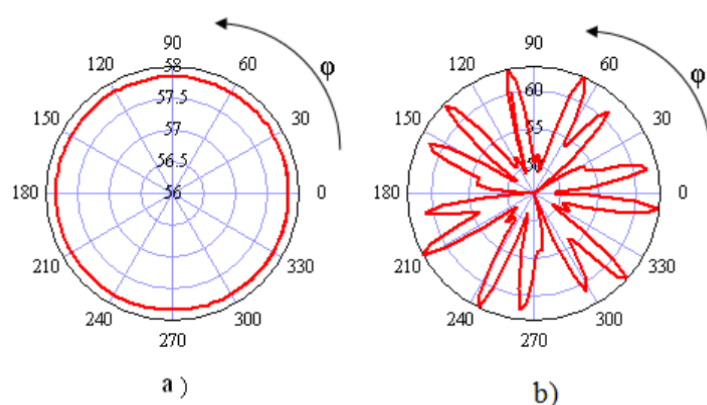


Figure 4 – Hodograph of AM moment in terms of ideal (a) and poor-quality (b) power supply in steady-state mode.

Figure 4 illustrates the hodograph of the electromagnetic torque of an asynchronous motor operating in steady-state conditions under two different power supply scenarios: ideal (a) and poor-quality (b). The comparison of these two cases provides clear insight into the influence of power quality on motor performance.

In case (a), which corresponds to a symmetrical and purely sinusoidal power supply, the hodograph takes the form of an almost perfect circle. This indicates that the electromagnetic torque remains nearly constant as the angular position φ changes. Based on the scale presented in the diagram, the torque varies within a narrow range of approximately 57 to 58 N·m, with an average value close to

57.5 N·m. The amplitude of torque pulsations does not exceed 1 N·m, which corresponds to less than 2% of the nominal value. Such behavior reflects a stable operating regime, where the rotating magnetic field is uniform and no significant harmonic components are present. As a result, the motor operates smoothly, with minimal vibration, reduced losses, and optimal efficiency.

In contrast, case (b) demonstrates the motor behavior under distorted and asymmetric voltage conditions. The hodograph in this case deviates significantly from a circular shape and instead exhibits a pronounced star-like pattern with multiple peaks and troughs. This distortion indicates strong fluctuations in the electromagnetic torque. The torque values now vary approximately between 54–55 N·m and 60 N·m, resulting in a pulsation amplitude of about 5–6 N·m. In relative terms, this corresponds to fluctuations on the order of 8–10% of the average torque value.

The presence of multiple local maxima in the hodograph suggests the influence of higher-order harmonics, such as the 5th and 7th harmonics, which are typical in systems with nonlinear loads. Additionally, the irregular shape reflects phase asymmetry in the supply voltage. These factors lead to non-uniform electromagnetic interactions within the motor, causing torque ripple, increased mechanical vibrations, acoustic noise, and additional thermal stress.

Thus, the comparison of the two diagrams clearly demonstrates that even if the average torque remains approximately the same in both cases, the quality of power supply has a decisive impact on the stability of torque production. Under poor-quality power conditions, significant torque oscillations arise, which negatively affect the mechanical integrity, efficiency, and service life of the asynchronous motor.

Figure 5 illustrates the rotor speed dynamics under ideal and distorted supply conditions. During startup, both cases reach near-synchronous speed (≈ 105 rad/s); however, the distorted supply introduces additional oscillations with an amplitude of approximately 1–2%.

At the moment of load application ($t \approx 0.6$ s), the rotor speed decreases from ≈ 105 rad/s to ≈ 95 – 97 rad/s, corresponding to a drop of about 8–10%. Under distorted voltage, the steady-state speed is slightly higher (by ~ 1 – 2%), but exhibits persistent pulsations with a magnitude of up to 2–3%.

These results indicate that while the average rotor speed is only marginally affected, power quality deterioration leads to a noticeable increase in speed oscillations and a reduction in dynamic stability of the drive system.

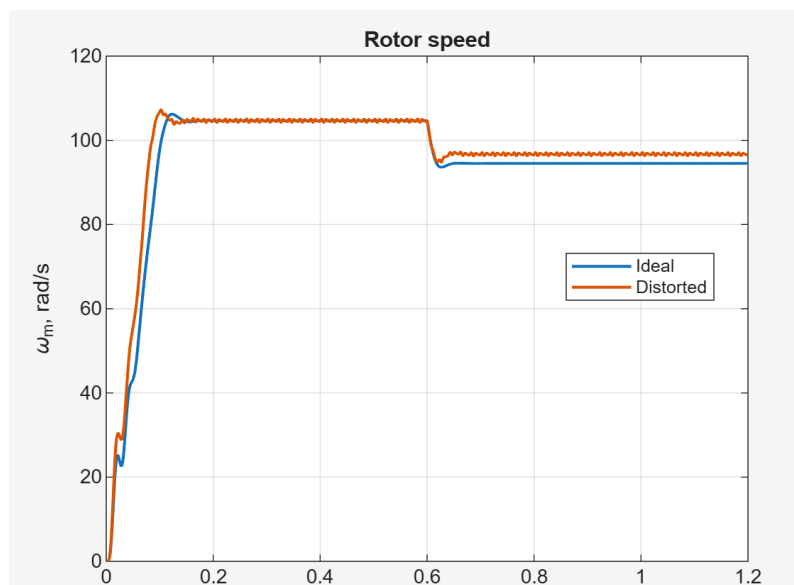


Figure 5 –Rotor speed dynamics under ideal and distorted supply conditions with load disturbance

Fig. 6 presents the time-domain response of the electromagnetic torque under ideal and distorted voltage supply conditions. During the startup phase, the distorted supply leads to significantly higher torque peaks, reaching up to approximately 240 N·m, which is about 90–100% higher than in the ideal case.

In steady-state operation prior to load application, the torque under distorted conditions exhibits pronounced oscillations with an amplitude of up to 15–20 N·m, while the ideal case remains relatively stable. Following load application ($t \approx 0.6$ s), the average torque increases to approximately 70–80 N·m; however, torque pulsations persist with a magnitude of about 20–30%, indicating substantial electromagnetic instability.

These results demonstrate that voltage distortion significantly amplifies torque ripple and dynamic stress, which may lead to increased mechanical vibrations and accelerated wear of the drive system.

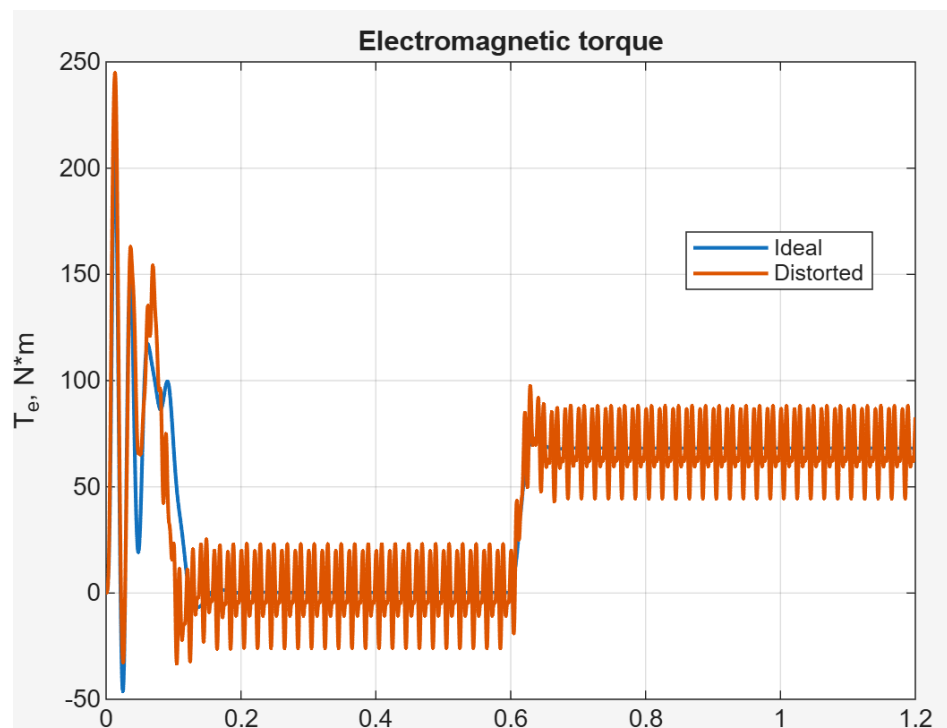


Figure 6 – Electromagnetic torque dynamics under ideal and distorted supply conditions with load disturbance

Fig. 7 presents the time-domain waveform of the stator current in phase A under ideal and distorted voltage supply conditions. During the startup phase, the distorted supply leads to significantly higher current peaks, reaching up to approximately 70–75 A, which is about 60–80% higher than in the ideal case.

In the steady-state no-load regime, the current under ideal conditions remains nearly sinusoidal with low amplitude ($\approx 5\text{--}7$ A), whereas the distorted supply introduces waveform deformation and additional harmonic components, resulting in visible distortion and increased ripple.

Following load application ($t \approx 0.6$ s), the current amplitude increases to approximately 18–22 A in both cases; however, under distorted conditions, the waveform exhibits clear non-sinusoidal behavior with persistent oscillatory distortion. The amplitude variation increases by approximately 10–15%, indicating additional harmonic content and increased electromagnetic stress.

These results confirm that poor power quality leads to current waveform distortion, increased peak currents, and higher harmonic content, which contribute to additional losses and thermal loading of the motor.

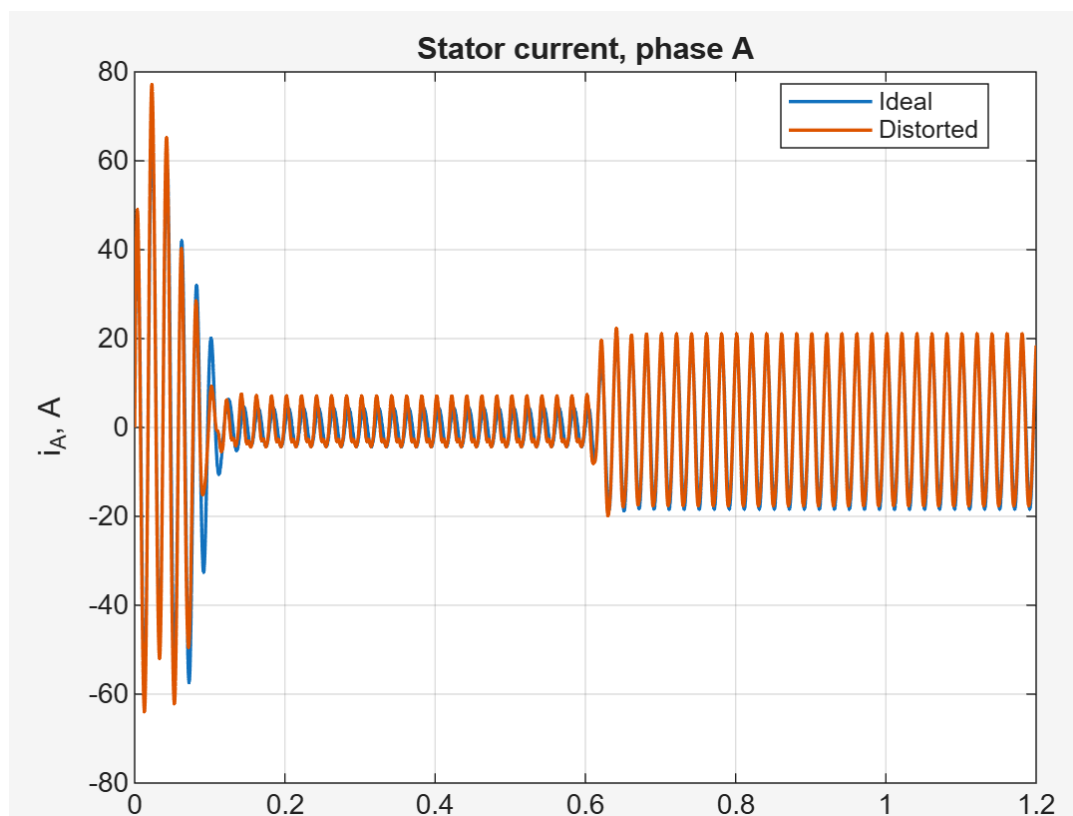


Figure 7– Stator phase A current waveform under ideal and distorted supply conditions with load disturbance

Analysis of the obtained power indices of AM operation represented in Table II confirms the fact that poor quality of supply voltage stipulates growth of all the types of losses; consequently there is a decrease in efficiency coefficient and power coefficient of a motor. In this connection, the paper does not consider increase in “heating” losses due to poor quality of supply voltage being determined by motor state and load character. That is the subject of another study.

Table 2

Power indices of am in terms of its poor-quality power supply

Parameters	Unit.	Sinusoidal power	Nonsinusoidal, asymmetric power
Electrical losses in a stator	W	491.30	498.30
Electrical losses in a rotor	W	652.210	661.510
Iron losses	W	89.210	90.10
Total losses	W	1235.00	1250.12
Coefficient of efficiency	%	81.41	81.22
Coefficient of power	p.u.	0.981	0.910

Conclusions. This study presents the development and validation of a dynamic electromagnetic model of a three-phase squirrel-cage asynchronous motor operating under conditions of degraded power quality, including voltage asymmetry and nonsinusoidal distortion. The model is based on space-time complexes (generalized vectors) and extended Park–Gorev equations, with nonlinear effects—such as magnetic saturation—accounted for through a polynomial dependence of mutual inductance on magnetizing current.

Simulation was performed for an MTKH 112-6 motor rated at 5.3 kW under two scenarios: ideal sinusoidal supply and distorted, asymmetric voltage conditions. The latter included phase voltage deviations of 11.2% (phase A), 18.8% (phase B), and 1.0% (phase C), as well as harmonic components up to the 10th order.

The results clearly demonstrate the negative impact of poor power quality on motor performance. Stator losses increased from 491.3 W to 498.3 W, while rotor losses rose from 652.2 W to 661.5 W. Iron losses also showed a slight increase from 89.2 W to 90 W. As a result, total losses grew from 1235 W to 1250 W, indicating additional energy dissipation and thermal stress.

This degradation affected efficiency, which decreased from 81.4% to 81.2%. More significantly, the power factor dropped from 0.98 to 0.90, reflecting reduced energy utilization and an increase in reactive power consumption. These findings confirm that even moderate voltage distortion and asymmetry lead to measurable performance deterioration.

Additionally, torque pulsations and waveform distortions in stator and rotor currents were observed, confirming increased electromagnetic stress under non-ideal conditions. The simulation results showed strong agreement with experimental data, with a relative RMS error below 4%, demonstrating the reliability of the proposed model.

The study emphasizes the importance of incorporating power quality indices into motor modeling, especially in industrial applications where operating conditions are far from ideal. Traditional models assuming perfect supply conditions fail to capture real losses and performance deviations.

Future work will focus on extending the model to include stochastic variations in power quality, enabling predictive analysis and supporting advanced diagnostics and maintenance strategies.

In conclusion, the developed model provides an effective tool for analyzing asynchronous motor performance under realistic supply conditions. Its applicability to both steady-state and transient режимs makes it valuable for design, control, and optimization tasks in modern industrial energy systems.

REFERENCES

1. Bykhovsky, D. (2022). Experimental Lognormal Modeling of Harmonics Power of Switched-Mode Power Supplies. *Energies*, 15(2), 653. <https://doi.org/10.3390/en15020653>
2. Sinvula, R., Abo-Al-Ez, K. M., & Kahn, M. T. (2020). A Proposed Harmonic Monitoring System for Large Power Users Considering Harmonic Limits. *Energies*, 13(17), 4507. <https://doi.org/10.3390/en13174507>
3. Pedra, J. Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation [Text]. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. 2006. Vol. 153, Issue 2. p. 197. DOI: 10.1049/ip-gtd:20045209.
4. Krishnan, R. (2010). *Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control* [Text]. PHI Learning Private Limited, New Delhi. 626 p.
5. Kuznetsov Vitaliy, Tryputen Nikolay, Kuznetsova Yevheniia. (2019). Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. pp. 556-561.
6. Kuznetsov, V., Nikolenko, A. (2015). Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. Vol 1, No. 8(73) ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT. Pages: 37 - 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755.
7. Serdiuk Tetiana, Kuznetsov Vitaliy, Kuznetsova Yevheniia. (2018). About electromagnetic compatibility of rail circuits with the traction supply system of railway. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kharkiv, Ukraine. pp. 59 – 63.
8. Gnaciński, P., Gorniak, M., & Tarasiuk, T. (2026). Energy-Efficient Operation of Industrial Induction Motors Exposed to Multiple Power Quality Disturbances. *Energies*, 19(1), 26. <https://doi.org/10.3390/en19010026>
9. Konuhova, M. (2025). Modeling of Induction Motor Response to Voltage Sags with Re-Acceleration Analysis. *Energies*, 18(21), 5682. <https://doi.org/10.3390/en18215682>
10. Varetsky, Y., & Gajdzica, M. (2024). Power Compatibility of Induction Motors in Industrial Grids Containing Synchronous Generators. *Energies*, 17(5), 1066. <https://doi.org/10.3390/en17051066>
11. Gnaciński, P., Pepliński, M., Muc, A., & Hallmann, D. (2024). Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics. *Energies*, 17(24), 6324. <https://doi.org/10.3390/en17246324>
12. Gnaciński, P., Hallmann, D., Muc, A., Klimczak, P., & Pepliński, M. (2022). Induction Motor Supplied with Voltage Containing Symmetrical Subharmonics and Interharmonics. *Energies*, 15(20), 7712. <https://doi.org/10.3390/en15207712>

13. Gnaciński, P., Hallmann, D., Klimczak, P., Muc, A., & Pepliński, M. (2022). Effects of Negative Sequence Voltage Subharmonics on Cage Induction Motors. *Energies*, 15(23), 8797. <https://doi.org/10.3390/en15238797>
14. Drabek, T. (2023). Derating of Squirrel-Cage Induction Motors Due to High Harmonics in Supply Voltage. *Energies*, 16(18), 6604. <https://doi.org/10.3390/en16186604>
15. Gudiño-Ochoa, A., Jalomo-Cuevas, J., Molinar-Solís, J. E., & Ochoa-Ornelas, R. (2023). Analysis of Interharmonics Generation in Induction Motors Driven by Variable Frequency Drives and AC Choppers. *Energies*, 16(14), 5538. <https://doi.org/10.3390/en16145538>
16. Guasch-Pesquer, L., García-Ríos, S., Jaramillo-Matta, A. A., & Vidal-Idiarte, E. (2022). Improved Method for Determining Voltage Unbalance Factor Using Induction Motors. *Energies*, 15(23), 9232. <https://doi.org/10.3390/en15239232>
17. Muñoz Tabora, J., de Lima Tostes, M. E., Ortiz de Matos, E., Mota Soares, T., & Bezerra, U. H. (2020). Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes. *Energies*, 13(13), 3333. <https://doi.org/10.3390/en13133333>
18. W. H. Hayt, J. E. Kemmerly, J. D. Phillips, and S. M. Durbin, *Engineering Circuit Analysis*, 10th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2023.
19. V. Havryliuk, Modelling of the return traction current harmonics distribution in rails for AC electric railway system. 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), IEEE, 2018, pp. 251-254.
20. V. Havryliuk. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier . 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, 2019. Lviv, Ukraine, July 2-6, pp. 491-496.
21. M. H. Gmiden and H. Trabelsi, "Calculation of two-axis induction motor model using Finite Elements with coupled circuit," 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Djerba, Tunisia, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/SSD.2009.4956785.
22. Ogar, V. A. (2004). Estimation of nonlinearity of inductance of a winder with steel using energy method [Text]. *Messenger of KrSPU. Publication 2/2004* (25). pp.78-84.
23. J. F. Gieras, *Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. doi:10.1201/9781315371429
24. GOST 7217-87 Electric rotating equipment. Asynchronous motors. Testing procedures.
25. Valerii Tytiuk, Oleksii Chorny, Mila Baranovskaya, Serhii Serhienko, Iurii Zachepa, Leonid Tsvirkun, Vitaliy Kuznetsov, Nikolay Tryputen. (2019). Synthesis of a fractional-order π l μ -controller for a closed system of switched reluctance motor control. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, No. 2(98), pp. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160946>.
26. Kuznetsov, V., Spiritsev, D., Shlykov, S., Herashchenko, A., & Kryvenko, O. (2025). Impact of Power Quality on Induction Motor Performance: A Dynamic Modeling Approach. *Modern Problems of Modeling*, (27), 136–148. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-19-136-148>
27. Kovalenko, V., Kachura, O., Sprysa, V. B., Hulesha, O., Trykilo, A., Kopysov, V. I., & Bashko, V. R. (2025). Analysis of the Combined Impact of Power Quality Parameters on the Operating Characteristics of an Induction Motor. *Modern Problems of Modeling*, (27), 60–72. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-19-60-72>

Received 05.03.2026.

Accepted 10.04.2026.

Published 30.04.2026

УДК 621.316.925

Віталій Кузнецов, Анатолій Ніколенко, Василь Стьопкін, Вячеслав Мартинцев,
Роман Тугуши, Іван Тесленко

**ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА УМОВ ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Анотація. У статті представлено динамічну електромагнітну модель трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, розроблену для моделювання його роботи в умовах реальних порушень якості електроенергії. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим впливом проблем електромагнітної сумісності та енергетичних втрат у промислових системах, що працюють за умов асиметрії напруги та гармонічних спотворень - характерних для мереж із нелінійними навантаженнями, такими як зварювальне обладнання, дугові печі та частотні перетворювачі.

Традиційні моделі двигунів, які базуються на припущенні ідеальних умов живлення, не забезпечують достатньої точності для прогнозування погіршення характеристик за наявності таких спотворень. Для подолання цього обмеження запропонована модель побудована на основі просторово-часових комплексів та розширених рівнянь Парка-Горєва. Ключовою особливістю є врахування насичення магнітопроводу, змодельованого через поліноміальну залежність взаємної індуктивності від намагнічувального струму, що дозволяє більш точно описувати роботу двигуна в умовах високих навантажень та несиметрії.

Модель була апробована на асинхронному двигуні МТКН 112-6 потужністю 5,3 кВт у двох режимах: при ідеальній синусоїдальній нарузі та при спотвореному асиметричному живленні з гармоніками до 10-го порядку. Результати показали, що спотворення напруги призводить до зростання втрат у статорі (з 491,3 Вт до 498,3 Вт) і роторі (з 652,2 Вт до 661,5 Вт), зниження ККД (з 81,4% до 81,2%) та суттєвого зменшення коефіцієнта потужності (з 0,98 до 0,90). Крім того, спотворення форм струмів і пульсації моменту підтвердили підвищене електромагнітне навантаження на двигун.

Отримані результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними ($RMSE < 4\%$), що підтверджує надійність і практичну цінність запропонованої моделі для задач діагностики, прогнозного обслуговування, цифрових двійників та навчального моделювання. На відміну від традиційного

гармонічного аналізу на основі перетворення Фур'є, використання просторово-часових комплексів дозволяє комплексно описувати як усталені, так і перехідні режими без необхідності розкладання на окремі гармоніки.

Дане дослідження робить внесок у розвиток енергоефективних та інтелектуальних промислових систем. Подальші дослідження будуть спрямовані на впровадження стохастичних моделей для врахування динамічних змін якості електроенергії, що дозволить реалізувати прогностичне керування та підтримати розвиток автоматизації в рамках концепції Industry 4.0.

Ключові слова: асинхронний двигун, якість електроенергії, динамічна модель, асиметрія напруги, гармонічні спотворення, електромагнітне моделювання, ефективність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bykhovsky, D. (2022). Experimental Lognormal Modeling of Harmonics Power of Switched-Mode Power Supplies. *Energies*, 15(2), 653. <https://doi.org/10.3390/en15020653>
2. Sinvula, R., Abo-Al-Ez, K. M., & Kahn, M. T. (2020). A Proposed Harmonic Monitoring System for Large Power Users Considering Harmonic Limits. *Energies*, 13(17), 4507. <https://doi.org/10.3390/en13174507>
3. Pedra, J. Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation [Text]. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. 2006. Vol. 153, Issue 2. p. 197. DOI: 10.1049/ip-gtd:20045209.
4. Krishnan, R. *Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control* [Text] PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2010. 626 p.
5. Kuznetsov Vitaliy, Tryputen Nikolay, Kuznetsova Yevheniia. Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, July 2-6, 2019, pp. 556-561.
6. Kuznetsov, V., Nikolenko, A. Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity, *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 2015. Vol. 1, N. 8(73): Energy-saving technologies and equipment. Pages: 37 - 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755.
7. Serdiuk Tetiana, Kuznetsov Vitaliy, Kuznetsova Yevheniia. About electromagnetic compatibility of rail circuits with the traction supply system of railway. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). September 10 - 14, 2018. Kharkiv, Ukraine. pp. 59 – 63.
8. Gnaciński, P., Gorniak, M., & Tarasiuk, T. (2026). Energy-Efficient Operation of Industrial Induction Motors Exposed to Multiple Power Quality Disturbances. *Energies*, 19(1), 26. <https://doi.org/10.3390/en19010026>
9. Konuhova, M. (2025). Modeling of Induction Motor Response to Voltage Sags with Re-Acceleration Analysis. *Energies*, 18(21), 5682. <https://doi.org/10.3390/en18215682>
10. Varetsky, Y., & Gajdzica, M. (2024). Power Compatibility of Induction Motors in Industrial Grids Containing Synchronous Generators. *Energies*, 17(5), 1066. <https://doi.org/10.3390/en17051066>
11. Gnaciński, P., Pepliński, M., Muc, A., & Hallmann, D. (2024). Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics. *Energies*, 17(24), 6324. <https://doi.org/10.3390/en17246324>

12. Gnaciński, P., Hallmann, D., Muc, A., Klimczak, P., & Pepliński, M. (2022). Induction Motor Supplied with Voltage Containing Symmetrical Subharmonics and Interharmonics. *Energies*, 15(20), 7712. <https://doi.org/10.3390/en15207712>
13. Gnaciński, P., Hallmann, D., Klimczak, P., Muc, A., & Pepliński, M. (2022). Effects of Negative Sequence Voltage Subharmonics on Cage Induction Motors. *Energies*, 15(23), 8797. <https://doi.org/10.3390/en15238797>
14. Drabek, T. (2023). Derating of Squirrel-Cage Induction Motors Due to High Harmonics in Supply Voltage. *Energies*, 16(18), 6604. <https://doi.org/10.3390/en16186604>
15. Gudiño-Ochoa, A., Jalomo-Cuevas, J., Molinar-Solís, J. E., & Ochoa-Ornelas, R. (2023). Analysis of Interharmonics Generation in Induction Motors Driven by Variable Frequency Drives and AC Choppers. *Energies*, 16(14), 5538. <https://doi.org/10.3390/en16145538>
16. Guasch-Pesquer, L., García-Ríos, S., Jaramillo-Matta, A. A., & Vidal-Idiarte, E. (2022). Improved Method for Determining Voltage Unbalance Factor Using Induction Motors. *Energies*, 15(23), 9232. <https://doi.org/10.3390/en15239232>
17. Muñoz Tabora, J., de Lima Tostes, M. E., Ortiz de Matos, E., Mota Soares, T., & Bezerra, U. H. (2020). Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes. *Energies*, 13(13), 3333. <https://doi.org/10.3390/en13133333>
18. W. H. Hayt, J. E. Kemmerly, J. D. Phillips, and S. M. Durbin, *Engineering Circuit Analysis*, 10th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2023.
19. V. Havryliuk, Modelling of the return traction current harmonics distribution in rails for AC electric railway system. 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), IEEE, 2018, pp. 251-254.
20. V. Havryliuk. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier . 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, 2019. Lviv, Ukraine, July 2-6, pp. 491-496.
21. M. H. Gmiden and H. Trabelsi, "Calculation of two-axis induction motor model using Finite Elements with coupled circuit," 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Djerba, Tunisia, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/SSD.2009.4956785.
22. Ogar V.A. Estimation of nonlinearity of inductance of a winder with steel using energy method [Text]. *Messenger of KrSPU*, 2004. Publication 2/2004 (25). pp.78-84.
23. J. F. Gieras, *Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. doi:10.1201/9781315371429
24. GOST 7217-87 Electric rotating equipment. Asynchronous motors. Testing procedures.
25. Valerii Tytiuk, Oleksii Chorny, Mila Baranovskaya, Serhii Serhienko, Iurii Zachepa, Leonid Tsvirkun, Vitaliy Kuznetsov, Nikolay Tryputen. Synthesis of a fractional-order pid-controller for a closed system of switched reluctance motor control. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. Vol. 2, No. 2(98), pp. 35-42, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160946>.
26. Кузнецов, В., Спірінцев, Д., Шликов, С., Геращенко, А., & Кривенко, О. (2025). ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА: ПІДХІД ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ. *Сучасні проблеми моделювання*, (27), 136-148. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-19-136-148>
27. Коваленко, В., Качура, О., Сприса, В. Б., Гулеша, О., Трикіло, А., Кописов, В. І., & Башко, В. Р. (2025). АНАЛІЗ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. *Сучасні проблеми моделювання*, (27), 60-72. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-19-60-72>

Віталій Кузнецов – кандидат технічних наук, доцент Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна e-mail: witjane20002014@gmail.com, ORCID:0000-0002-8169-4598

Анатолій Ніколенко - к.т.н., доцент, зав. каф. електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій (Україна), e-mail: nikolenko.a.v.nmetau@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3808-4249

Василь Стьопкін – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-5727-8343>

Вячеслав Мартинцев - студент кафедри електричної інженерії, Український державний університет науки та технологій, ORCID: 0009-0005-2902-9979.

Роман Тугуши - студент, Український державний університет науки та технологій, ORCID: 0009-0001-6235-1899

Іван Тесленко – студент, Український державний університет науки і технологій, ORCID:<https://orcid.org/0009-0001-0234-868X>

Vitalii Kuznetsov - candidate of technical sciences, associate professor Ukrainian StateUniversity of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine e-mail: witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Anatolii Nikolenko - candidate of technical sciences, Associate ProfessorHead of the Electrical Engineering DepartmentUkrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 49005, UkraineORCID: 0000-0003-3808-4249

Stopkin Vasyl - candidate of technical sciences, associate professor Ukrainian StateUniversity of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-5727-8343>

Martyntsev Viacheslav - student, department of electrical engineering, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: 0009-0005-2902-9979

Tuhushy Roman - student, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: 0009-0001-6235-1899.

Teslenko Ivan – student, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID:<https://orcid.org/0009-0001-0234-868X>.

ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ПОПЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ АНКЕРНИХ ШТАНГ В УМОВАХ УКРАЇНИ

Анотація. Розміщення частки промислових і соціальних об'єктів під землею, на тривалий час експлуатації та впливу зовнішніх джерел сейсмічної енергії різного походження стало актуальною проблемою сьогодення.

Рамно-анкерне кріплення є найбільш розповсюдженою системою кріплення підземних виробок у тому числі і для довготривалої експлуатації підземних споруд промислового призначення. Процедура кріплення починається з кріплення виробки метало полімерними анкерами (АКМ). Далі під захистом анкерного кріплення (АК) відбувається кріплення виробки рамами. Особливостями такої комбінації є те, що анкерне кріплення протидіє будь яким переміщенням гірських порід у виробку. У цей самий час, за незначних переміщень порід у простір виробки, рамне кріплення все ще не почало протидіяти гірському тиску. За значних переміщень для АКМ рамне кріплення вимушене приймати на себе навантаження ваги порід об'єму стиснутої оболонки. Така ситуація не є прийнятною для кріплення виробок з довготривалим терміном експлуатації. Врахування фактору довготривалої експлуатації підземних споруджень призводить до детального аналізу чинників, що можуть мати вплив на неї.

Одним із найважливіших чинників, що має вплив на вантажо спроможність порід у околі виробки є попереднє навантаження (ПН) анкерних штанг АКМ. Аналіз літературних джерел показав відсутність сталої думки на його величину і взагалі навіть на його доцільність. За існуючими нормативними документами в Україні воно прийняте на рівні 5 т. За цими документами ПН повинно здійснюватися за рахунок стиснення порід шляхом закручування гайки на хвостовій ділянці анкерної штанги. Проте на тепер цей метод створення ПН змінився. Враховуючи технологічну складність операції з накатки різьби від неї відмовились. На тепер операція зі створення ПН анкерних штанг здійснюється шляхом закручування литої гайки по періодичним виступам на поверхні анкерної штанги. Як результат нормативне значення ПН не є досяжним. Як показують розрахунки,

максимальне значення ПН не перевищує 2т. Величина ПН не може бути контрольованою, оскільки визначається зупинкою процедури закручування гайки у зв'язку з неможливістю її подальшого виконання. Оскільки посадки у парі гвинт-гайка є широко ходовими тобто вільними і як наслідок, відбувається закручування гайки на періодичних виступах анкерної штанги. Говорити про досягнення проектних значень ПН не варто. Для кріплення промислових об'єктів на тривалий час експлуатації такий стан речей не є допустимим.

Для з'ясування важливості виконання ПН нормативних значень необхідно провести експериментальне дослідження в промислових умовах. Таке дослідження було проведено і його результати представлено в даній статті.

Наведено графічні зображення стану поверхні покрівлі виробок, що підлягали дослідженню та зроблено висновки.

Ключові слова: металополімерний анкер, попереднє навантаження, стан поверхні виробки.

Вступ. На тепер всім відомо про ефективність застосування кріплення гірничих виробок металополімерними анкерами. У напрямку анкерного кріплення виконана велика кількість досліджень вітчизняними вченими. Їх роботи дозволили на науковій основі підійти до розуміння і розкриття фізичного змісту цього виду кріплення. Широко відомі праці радянських вчених В.Н. Семевського, О.О. Борисова, Н.С. Буличова, Н.Н. Фотієвої, Є.Я. Махно, О.П. Широкова, О.В. Тимофєєва, І.О. Юрченка, Б.К. Чукана, Г.Ф. Горбачова, Н.І. Мельникова та інших.

Найбільшого поширення набуло рамне та анкерне кріплення гірничих виробок. На гірничих підприємствах західного Донбасу доля впровадження анкерів досягає 80 % усіх виробок. Рамне кріплення не завжди в змозі протидіяти прогину порід, пов'язаного зі збільшенням їх об'єму. Причиною є конструктивні особливості рамного кріплення, які полягають у неможливості забезпечити попереднє його розпирання. Зміщення, що є результатом розвантаження порід, не зустрічають перешкод або зустрічають незначну перешкоду, як до осадки, так і у перший час після неї. Породи навантажують кріплення і тим самим зменшують його опір подальшим зміщенням порід, спричинених розвантаженням. Але, маючи великі переваги над рамним кріпленням, анкерне кріплення має особливості, не врахування яких може ускладнити проблему безпеки експлуатації підземних споруд. Справа полягає в

тому, що відмова анкерного кріплення під дією гірського тиску відбувається миттєво. Ця обставина вимагає особливо прискіпливого відношення до розрахунку паспортів кріплення підземних споруд та виконання нормативних документів України. Користування запозиченими методиками розрахунку параметрів анкерного кріплення не в змозі гарантувати стійкість виробкам і безпеку їх експлуатації протягом значних термінів експлуатації. Більшість методик розрахунків[1-7] базується на методах спостережень і емпіричних методах, які відбивають особливості гірничо-геологічних умов, для яких вони розроблялись.

Під стійкістю виробки розуміють здатність її зберігати певні розміри і форму поперечного перетину на протязі терміну її служби. Для забезпечення стійкості виробки необхідно будь-яким чином збільшити вантажо спроможність порід. Найбільш ефективним засобом є збільшення міцності шару порід на згин і розтяг, які виникають у породах покрівлі виробки. Для анкерного кріплення переважає зміцнення порід за рахунок об’ємного навантаження.

Необхідна протидія напруженням розтягу найбільш ефективно може бути здійснена закріпленням у породах сталевих або полімерних стрижнів – анкерів. На відміну від рамного кріплення, анкерне встановлюють, попередньо навантажуючи, тому відразу ж після зведення кріплення підвищується зчеплення вздовж площин напластування порід або їх тріщин.

Система кріплення гірничих виробок металополімерними анкерами найбільш широко використовується на підземних спорудах всіх континентів. Це жорстка і активна система кріплення (рис. 1). Технологія використання повністю закріплених анкерів(ПЗА) з використанням фіксуючих сумішей (ФС) двох термінів твердіння полягає у тому, що вона дозволяє створювати попереднє навантаження, і, тим самим, система кріплення стає активною на відміну від кріплення з однокомпонентними ФС. Механізм створення попереднього навантаження полягає у тому, що у анкерний шпур вводять ампули з фіксуючою двокомпонентною сумішшю двох термінів твердіння. Ближче до забою шпуру розташовують ампулу фіксуючої суміші з коротким терміном затвердіння, а ампули з більш значним терміном затвердіння – ближче до покрівлі виробки.

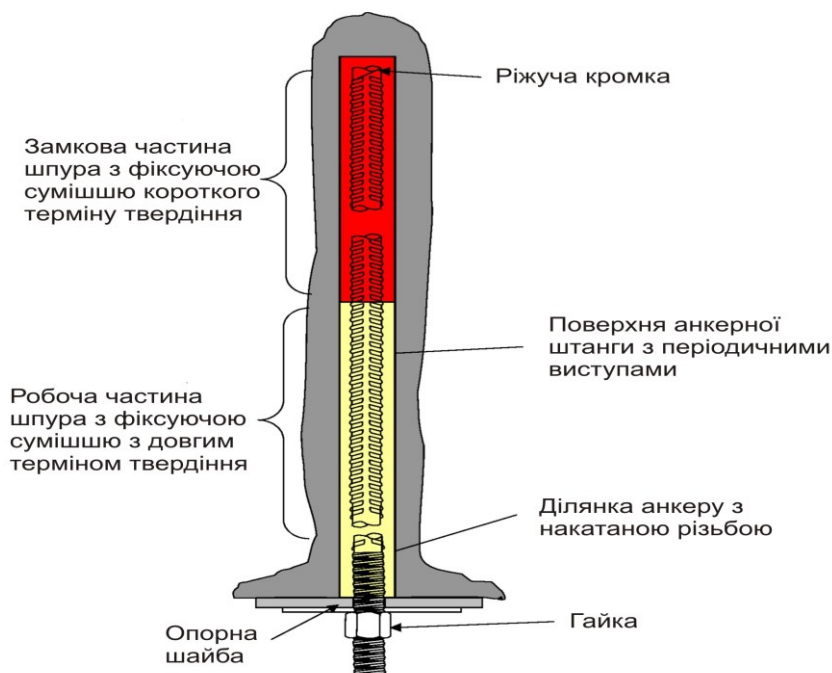


Рисунок 1 - Повністю заповнені анкери з ФС двох термінів твердіння

Зупинка обертання анкерної штанги є сигналом для початку створення попереднього її навантаження, яке здійснюється шляхом обертання гайки у парі гайка-гвинт по різьбовій ділянці хвостовика анкерної штанги. Після досягнення необхідного за величиною попереднього навантаження анкерна штанга здійснює фіксацію стиснених гірських порід відносно стінок шпуру. Гірські породи, що знаходяться в околі анкерного шпуру, опиняються у стислому стані і, більш того, зафіксованими у такому стані.

В Україні було прийнято британську технологію кріплення підземних виробок металополімерними анкерами [1], за якою металополімерні анкери попередньо навантажуються. Величина осьових зусиль, згідно з нормативними документами, прийнятими в Україні, складає 50 кН. Як засвідчує практичний досвід використання попереднього навантаження анкерних штанг в умовах вугільних шахт Великобританії та України, для анкерних штанг номінального діаметра 25 мм і більше такого рівня попереднього навантаження є достатнім. За таких умов досягається високий рівень стійкості підземної виробки і забезпечується високий рівень безпеки виконання виїмкових та очисних робіт.

Світові лідери з анкерного кріплення – Сполучені Штати Америки – використовують два рівня попереднього навантаження анкерних штанг [2,3]. Причому його величина обумовлена, з одного боку, особливістю напружено-деформованого стану гірських надр – перевищенням бічного, тектонічного за природою, гірського тиску над гідростатичним, обумовленим глибиною розташування виробки, а з іншого боку, технологічним чинником, а саме – високою швидкістю виїмкових робіт. Так за значних швидкостей виїмкових та очисних робіт для підвищення стійкості тонкого шару покрівлі виробки у США користуються купольною шайбою, яка являє собою частину сфери – купол. Під час встановлення анкерної штанги у шпур попереднє навантаження створюється за рахунок пружної властивості купольної шайби, попередньо деформованої стискаючими зусиллями стійки (1-4 кН). Однак, досвід світового лідера у використанні попередньо навантажених металополімерних анкерів виявився унікальним і ніяким чином не вплинув на досвід використання металополімерних анкерів на гірничих підприємствах, розташованих на інших континентах. На сьогодні не є визначеною ні величина попереднього навантаження, ні навіть його доцільність [7].

Постановка задачі. Провести перевірку ефективності дії ПН і встановити необхідність його виконання в системі кріплення АКМ гірничих виробок в умовах України.

Основна частина. Для з’ясування ефективності застосування технології анкерного кріплення за методикою прийнятою у США на ДВАТ «Шахта Білоріченська» сумісно з американськими спеціалістами у 2007 році було проведено науковий експеримент з визначення ефективності застосування американської технології анкерного кріплення в умовах вугільних шахт України. У рамках цього експерименту вдалося не тільки визначити ефективність застосування американської технології кріплення і комплектуючих анкерного кріплення в умовах вугільних шахт України, а й дослідити вплив попереднього навантаження на роботу анкерного кріплення в гірничих виробках. За результатами обстеження 1-го "біс" конвеєрного штреку пласту l_6 горизонту 725 м ДВАТ «шахта Білоріченська», на якому здійснювалося кріплення, можна зробити висновки про значний вплив на стійкість покрівлі виробки попереднього навантаження (рис. 2 - 4). Так частина виробки, що

кріпилася з використанням АК за технологією американських фірм, тобто без попереднього навантаження, втратила стійкість вже на етапі її зведення. Стан виробки не дозволяв її експлуатацію і вона підлягала повному перекріпленню. У ході експерименту вдалося встановити вплив двох рівнів попереднього навантаження. Так ділянка виробки була закріплена АКМ, виконаним за українською технологією, тобто анкерами номінального діаметра 25 мм і попереднім навантаженням 5 т (див. рис. 5), а інша ділянка – АК номінального діаметра 22 мм зі слабким попереднім навантаженням (рис. 6). Слабкість і невизначеність величини попереднього навантаження викликана відсутністю різьбової ділянки анкерної штанги. Попереднє навантаження здійснювалось за рахунок руху гайки по зовнішній гвинтовій навивці, кут підйому якої складав майже 9° і не дозволив забезпечити необхідний рівень навантаження. Крім того, проблема попереднього навантаження ускладнювалась наявністю вільного допуску у пари «лита гайка – анкерна штанга».



Рисунок 2 - Стан початкової ділянки виробки, закріпленої за американською технологією з номінальним діаметром анкерної штанги 19 мм



Рисунок 3 - Стан середньої частини ділянки виробки, закріпленої за американською технологією



Рисунок 4 - Стан прикінцевої ділянки виробки, закріпленої за американською технологією

Аналіз результатів обстеження виробки показав:

- на ділянці, закріпленій анкерами та комплектуючими виробництва США (див. рис.2. - 4.), зсув порід покрівлі виробки склав від 500 мм до 1000 мм, що на порядок перевищує припустимі;

- на ділянці, закріпленій анкерними штангами і комплектуючими виробництва США (див. рис. 3-4), зсуви порід покрівлі виробки перебувають у межах від 800 мм до 1000 мм;

- на ділянці, закріпленій анкерами номінального діаметра 25 мм за українською технологією і попереднім навантаженням штанг 5 т (див. рис. 5), зсув порід покрівлі виробки в межах норми;

- на ділянці, закріпленій анкерами номінального діаметра 22 мм за українською технологією і слабким попереднім навантаженням (див. рис. 6), зсуви порід покрівлі виробки перебувають у межах від 100 мм до 500 мм;



Рисунок 5 - Стан середньої частини ділянки виробки, закріпленої за українською технологією анкерними штангами номінального діаметра 25 мм із попереднім натягом 5 т



Рисунок 6 - Стан прикінцевої частини ділянки виробки, закріпленої за українською технологією анкерними штангами номінального діаметра 22 мм за наявності попереднього натягу

Випробування ефективності застосування анкерів номінального діаметра 19 мм по технології США в умовах 1-го «біс» конвеєрного штреку пласту l_6 горизонту 725 м ДВАТ «Шахта Білоріченська» показали, що їх використання не забезпечило монолітність порід покрівлі виробки вже на етапі її зведення. Ведення прохідницьких робіт без проведення повного перекріплення виробки неможливо. Основними причинами такого стану виробки, за визнанням керівника проведення експерименту із визначенням ефективності запропонованої технології, проф. К. Анрага (США), і цю думку розділила більшість присутніх на нараді фахівців, явилися інтенсивні процеси зрушення шарів по чисельним площинам ковзання. На думку фахівців ІГТМ НАН України, такий процес може мати місце лише у випадку недостатньої жорсткості конструкції анкерного кріплення в поперечному напрямку.

Попередній натяг зумовлює появу стискаючих напружень у породному масиві ще до моменту його остаточної фіксації. Наявність зони стискаючих напружень дозволяє залучати до роботи не тільки сам анкер, а і, що важливо, створює умови для сприйняття навантаження самою гірською породою.

Розглянемо більш уважно механізм роботи АКМ з масивом гірських порід.

Порушені гірські породи зміщуються у порожнину виробки, оскільки відсутня опора, яка могла б протидіяти їх тиску. Об'єм порід збільшується,

оскільки вони раніше знаходились у стані пружного стиснення, і відбувається часткове розкриття тріщини. Тому у таких випадках говорять про зсув при розвантаженні. Оскільки порушені породи не приймають опорного тиску, він зміщується у глибину масиву, де породи знаходяться у стані трьохосового стиснення і мають високу вантажоспроможність. За цих обставин величина опорного тиску дещо підвищується у відповідності зі збільшенням відстані між опорами. Процес зсуву порід може продовжуватись досить довго і завершуватись лише тоді, коли порушені породи самі стануть протидіяти подальшому розвитку зсувів.

Основною формою прояву гірського тиску у виробці є зміна її контуру і деформація кріплення. Ці параметри залежать від багатьох чинників, основні з яких є: фізико-механічні властивості порід, тип і конструкція кріплення, глибина розробки, вплив очисних робіт, спосіб охорони виробки, кут падіння шару тощо. Зміщенню порід, які створюють покрівлю гірничої виробки, сприяє і їх власна вага. До проведення виробки шари гірських порід тісно прилягають один до одного і знаходяться у стані природної рівноваги. Кожний з цих шарів витримує вагу розташованих вище шарів.

Після проведення виробки рівновага очисної покрівлі порушується: нижній, а потім і верхні шари починають прогинатися. У цьому русі нижній шар вільно прогинається подібно до прямої балки, затиснутої по кінцях. Такі явища, що виникають у масиві гірських порід після проведення виробки, називають деформаціями. При проведенні виробок у пласті над ним ліквідується опора, що змінює напружений стан у недоторканому масиві. Створення нового стану рівноваги призводить до деформації оточуючих виробку порід і пласта і під виробкою створюються зони понижених напружень (зони розвантаження). В цей час у боках виробки створюються зони підвищених напружень (зони опорного тиску). У цьому випадку породи над виробкою руйнуються і відбувається їх обвалення (рис. 7).



Рисунок 7 - Деформація контуру виробки конвеєрного штреку ш. Лутугінська ДП «Луганськвугілля»

Шари порід, окрім рухів у напрямку виробки, отримують змогу переміщуватись один відносно одного у різних напрямках, про що свідчить форма анкерних штанг, виявлених після обрушення покрівлі виробки. Для усунення явищ зсувів шарів покрівлі у виробку та порушення суцільності порід гірничу виробку закріплюють.

Більшість авторів дійшли згоди, що високі рівні попереднього навантаження непотрібні для підвищення ефективності металополімерних анкерів у режимі підвішування [7,8], але більшість досліджень дають підстави стверджувати про більш широке застосування попереднього навантаження.

Безпека і тривалість надійної експлуатації промислових і соціальних об'єктів під землею істотним чином залежить від поведінки закріплення в часі.

Так, зміни попереднього навантаження у часі були зафіксовані багатьма авторами [8,9]. Графіки, що представлені на рис. 8, показують зменшення навантажень з часом [10].

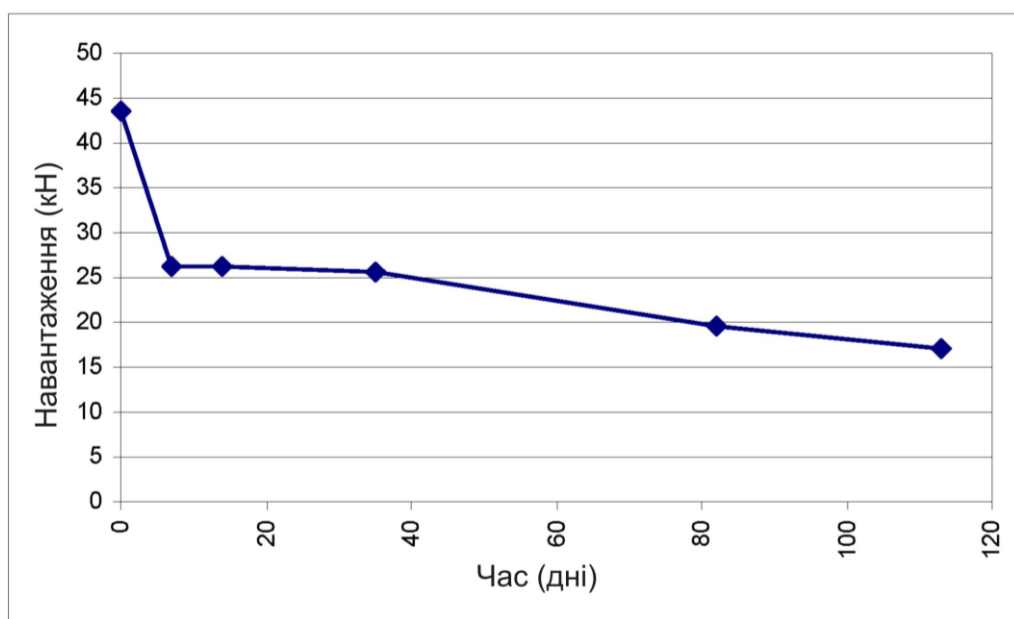


Рисунок 8 - Типова графічна залежність завантаженості анкерних штанг з часом

З наведеної графічної залежності випливає, що низький рівень ПН може бути обумовлений релаксацією первинних зусиль ПН або якщо анкерування відбувалось не в вибою виробки, а пізніше коли основні зміщення вже були реалізовані. Крім того, така поведінка графіка можлива і на малих глибинах розташування виробки.

Викладена інформація стосовно ефективності кріплення гірничих виробок металополімерними анкерами стосується незначних періодів експлуатації та без значних швидких коливань тиску на неї.

Справа з оцінкою ефективності рамно-анкерного кріплення ускладнюється за умов наявності умов довготривалої експлуатації та наявності значних коливань оточуючого середовища. Розглянемо більш уважно процес функціонування в системі «анкерна штанга - ФС – гірська порода» АКМ.

Графічна залежність зміни завантаженості анкерної штанги з часом показує, що вже через 100 днів експлуатації величина завантаженості анкерної штанги зменшується у три рази. Досліджень з приводу довшого терміну експлуатації підземних споруд закріплених АК знайти не вдалось. Для забезпечення надійної стійкості підземних споруд з довгим терміном експлуатації (а саме про такий режим експлуатації і йдеться) користуються рамним кріпленням, надійність якого не викликає сумнівів та перевірена часом.

Більш сучасним засобом кріплення довгострокових підземних споруд яке широко використовується на тепер є комбінований вид кріплення, а саме рамно анкерний. Проте і такий вид кріплення має свої недоліки, а саме:

Першим видом кріплення, як правило є анкерне кріплення. Воно забезпечує кріплення підземної споруди негайно після зведення, і тим самим не дає змоги початковим переміщенням у бік вільної поверхні.

Далі під захистом АК відбувається кріплення виробки рамами. І таке комбіноване кріплення вступає в роботу з протидії гірському тиску.

Проте робота такого виду кріплення не є зовсім сумісною, тобто узгодженого опору зміщенням гірських порід у виробку. Особливостями такої комбінації компонентів кріплення є та обставина, що за своєю природою анкерне кріплення є жорстким видом кріплення. Тобто воно жорстко протидіє будь яким переміщенням гірських порід і переміщення навіть у 50 мм є ознакою того, що анкерне кріплення майже вичерпало свою здатність протидіяти навантаженням на оболонку із стиснутих ними порід. Переміщення поверхні виробки з АК такого порядку демонструє той факт, що оболонка із стиснутих порід відокремилась від основного масиву гірських порід. Такий стан речей породжує ймовірність раптового одночасного вивалу оболонки у простір виробки, і такі випадки мали місце на практиці.

У цей самий час, за переміщень порід у простір виробки, рамне кріплення все ще не почало протидіяти гірському тиску і вимушене приймати на себе навантаження ваги порід у об'єму над покрівлею виробки. Ситуація насправді є аварійною. Одним із факторів який міг би вплинути на пом'якшення ситуації була би змога дозволити протидіяти зміщенням у простір виробки це можливість виконати бодай незначне гальмування процесу переміщення.

Проведений аналіз механізмів взаємодії рамно-анкерного кріплення гірничих виробок з гірським масивом показав його сильні і слабкі місця. Стало зрозуміло, що використання такого виду кріплення в умовах виробок довготривалого терміну дії та ще за дії сейсмічних навантажень потребує дотримання виконання нормативних документів діючих в Україні та подальшого удосконалення.

Основною особливістю такого удосконалення на думку авторів може бути доповнення системи кріплення встановленням тросових анкерів АКТ.

Таке удосконалення може дозволити виконувати керування піддатливості оболонки стиснених порід рамно-анкерного кріплення шляхом регулювання величини попереднього навантаження АКТ.

Слабкість і невизначеність величини попереднього навантаження викликана відсутністю різьбової ділянки анкерної штанги. Попереднє навантаження здійснювалось за рахунок руху гайки по зовнішній гвинтовій навивці, кут підйому якої складав майже 9° і не дозволив забезпечити необхідний рівень навантаження. Крім того, проблема попереднього навантаження ускладнювалась наявністю вільного допуску у пари «лита гайка – анкерна штанга».

Висновки:

1. Проведені експериментальні дослідження впливу ПН для АКМ підтвердили факти забезпечення необхідного рівня стійкості покрівлі виробки за умов використання нормативних значень ПН у порівнянні з його відсутністю або за величин нижчих за нормативні;

2. Конструктивні параметри сучасних анкерних штанг, що використовуються для зведення АКМ гірничих виробок не в змозі забезпечити ПН нормативних значень;

3. Зважаючи на важливість дотримання нормативних значень ПН за зведення АКМ можна стверджувати про неможливість їх застосування для кріплення підземних споруд довготривалого терміну експлуатації;

3. Використання у комплексному рамно-анкерному кріпленні виробок тривалого терміну експлуатації доцільно доповнити встановленням тросових анкерів;

4. Використання ПН для АКТ може дозволити виконувати керування піддатливості оболонки із стиснутих порід, що, в свою чергу, дозволить підвищити ступінь безпеки експлуатації підземних споруд;

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Bulat, A.F. and Vinogradov, V.V. (2002). Oporno-ankernoe krepnenie gornyih vyirabotok ugolnyih shaht [Support and anchoring of coal mine workings]. Dnepropetrovsk: Vilpo [in Ukrainian].
2. Canbulat, I. (2008). Evaluation and design of optimum support systems in South African collieries using the probabilistic design approach, Abstract of of Ph.D. dissertation. University of Pretiria, Pretoria.

3. Canbulat, A., Wilkinson, G. and Prohaska, M. (2005). Minsi and Singh. An investigation into the support systems in South African collieries. Final Report Safety in Mines Research Advisory Committee.
4. O’Conor, D., van Vuuren, J. and Altounyan, P. (2002). Measuring the effect of bolt installation practice on bond strength for resin anchored rockbolts SANIRE 2002 Symposium. Re-Defining the Boundaries, September.
5. Wagner, H. (1985). Design of roof bolting patterns, Chamber of Mines workshop on roof bolting in collieries Republic of South Africa. Johannesburg.
6. Stillborg, B. (2002). Professional Users Handbook for Rock Bolting, Trans Tech Publication, Second Edition.
7. Campoli, A. (2001). Variables affecting polyester resin anchorage performance with United States roof bolting system, AIMS (Aachen International Mining Symposia), 6 and 7 Junlay, 2001, pp. 19-28.
8. Lautsh, T. (2001). Roof bolting in three continents-a comparison, AIMS (Aachen International Mining Symposia), 6 and 7 Junlay, 2001, pp. 59-76.
9. Satola, L. (2007). The axial load- displacement behavior of steel strands in rock reinforcement, Abstract of Ph.D. dissertation. Espoo-Finland.
10. Mark, C. (2000). Design of roof bolt systems, New technology for coal mine roof support. Pittsburgh, PA. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Centres for Disease Control and Prevention. National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS, (NIOSH) Publication №2000, p.156.
11. Krukovskiy O, Bulich Yu & Zemlianaia Yu (2019). Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity. E3S Web of Conferences (109), 00042, [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900042>
12. Larionov G.I. (2008). Pro vplyv hlybyny rozrobky ta poperednoho navanta-zhennia na shchilnist roztašuvannia ankeriv [On the influence of development depth and pretention on the density of rebar placement]. Metody rozviazuvannia prykladnykh zadach mekhaniky deformovanoho tverdogo tila: zb. nauk. pr. – Vol. 9. - 115-128 [in Ukrainian].

Received 15.03.2026.

Accepted 16.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 622.8.1/.8:519.65:539.3

Hryhorii Larionov, Yuliia Zemliana, Viktor Hvorostyan, Yurii Bulych

ON THE FEASIBILITY OF PRETENTION REBAR IN UKRAINIAN CONDITIONS.

Abstract. *Placing a part of industrial and social facilities underground, for a long time of operation and the influence of external sources of seismic energy of various origins has become an urgent problem of today.*

Frame-anchor fastening is the most common fastening system of underground workings, including for long-term operation of underground industrial structures. The fastening procedure begins with fastening the workings with metal-polymer anchors (AKM). Then, under the protection of the anchor fastening (AK), the workings are fastened with frames. The features of such a combination are that the anchor fastening counteracts any movement of rocks in the workings. At the same time, with minor movements of rocks in

the working space, the frame fastening has not yet begun to counteract the rock pressure. With significant movements for the AKM, the frame fastening is forced to take on the load of the weight of the rocks of the volume of the compressed shell. This situation is not acceptable for fastening excavations with a long service life. Taking into account the factor of long-term operation of underground structures leads to a detailed analysis of the factors that may have an impact on it.

One of the most important factors that has an impact on the load-bearing capacity of rocks in the vicinity of the excavation is the preload (PR) of AKM anchor rods. An analysis of literary sources showed the absence of a consistent opinion on its value and even on its feasibility in general. According to existing regulatory documents in Ukraine, it is accepted at the level of 5 tons. According to these documents, PR should be carried out by compressing rocks by tightening a nut on the tail section of the anchor rod. However, this method of creating PR has changed now. Given the technological complexity of the thread rolling operation, it was abandoned. Currently, the operation to create PR of anchor rods is carried out by tightening a cast nut on periodic protrusions on the surface of the anchor rod. As a result, the regulatory value of PR is not achievable. As calculations show, the maximum value of PN does not exceed 2t. The value of PN cannot be controlled, since it is determined by stopping the procedure for tightening the nut due to the impossibility of its further execution. Since the landings in the screw-nut pair are widely movable, that is, free, and as a result, the nut bites on periodic protrusions of the anchor rod. It is not worth talking about achieving the design values of PN. For fastening industrial facilities for a long period of operation, such a state of affairs is not permissible.

To clarify the importance of fulfilling the PN regulatory values, it is necessary to conduct an experimental study in industrial conditions. Such a study was conducted and its results are presented in this article.

Graphic images of the condition of the roof surface of the excavations that were subject to investigation are presented and conclusions are drawn.

Keywords: *metal-polymer anchor, preload, condition of the excavation surface.*

Ларіонов Григорій Іванович - доктор технічних наук, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-4774-0992>.

Земляна Юлія Валеріївна - головний технолог відділу механіки гірничих порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-2859-6294>.

Хворостян Віктор Олексійович - мол. науковий співробітник відділу механіки гірничих порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0001-7250-3470>.

Булч Юрій Юрійович - науковий співробітник відділу механіки гірничих порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-3442-9203>.

Larionov Hryhorii - Doctor of Technical Sciences, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-4774-0992>.

Zemliana Yuliia Valerievna - chief technologist in Department of Rock Mechanics Department, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-2859-6294>.

Hvorostyan Viktor - Junior Researcher in Department of Rock Mechanics Department, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0001-7250-3470>.

Bulych Yurii - Researcher in Department of Rock Mechanics Department, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM of the NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-3442-9203>.

УМОВИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ДОУЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто умови оптимального режиму доущільнення бетонної суміші вібраційною машиною з просторовим збудженням, у якій поєднується дія горизонтальних коливань форми та вертикальних коливань привантажувача. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності вібраційного ущільнення бетонних виробів, забезпечення інтенсивної структурної перебудови суміші та зниження енерговитрат у процесі формування. Метою роботи є встановлення критеріїв ефективності вібраційного доущільнення та обґрунтування параметрів оптимального режиму роботи установки на основі енергетичного підходу. У дослідженні використано методи аналітичного моделювання, засновані на балансі енергії за цикл коливань, визначенні дисипованої енергії у вертикальному та горизонтальному каналах деформування, а також на формулюванні порогових умов активного ущільнення за динамічним тиском і зсувними напруженнями. Отримано співвідношення, що дають змогу оцінити енергетичну ефективність процесу, встановити умови узгодження частот збудження та визначити коефіцієнт синергії комбінованої дії зсувних і компресійних механізмів. Показано, що оптимальний режим доущільнення досягається за умови максимізації дисипованої в суміші енергії, виконання порогових умов структурної перебудови середовища та підтримання квазірезонансного режиму з урахуванням зміни динамічних властивостей суміші в процесі ущільнення. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованих критеріїв для вибору параметрів привантажувача та режимів роботи віброзбуджувачів при проектуванні й удосконаленні вібраційних установок для формування бетонних виробів.

Ключові слова: бетонна суміш, вібраційне ущільнення, доущільнення, просторове збудження, привантажувач, дисипована енергія, динамічний тиск, зсувні напруження, квазірезонансний режим, критерій ефективності.

Постановка проблеми. Одним із визначальних чинників, що впливають на якість бетонних виробів під час формування, є забезпечення ефективного режиму вібраційного доущільнення суміші в умовах просторового збудження. Недостатня інтенсивність або неузгодженість вертикальних і горизонтальних коливань призводить до неповної структурної перебудови бетонного середовища, зниження щільності, погіршення однорідності виробу та зростання енерговитрат на ущільнення. Особливої складності ця проблема набуває в установках, де ущільнення реалізується завдяки сумісній дії циклічного стиску з боку привантажувача та зсувних деформацій, що створюються горизонтальними коливаннями форми. За таких умов виникає необхідність визначення критеріїв ефективності вібрації, встановлення порогових умов структурної перебудови суміші та обґрунтування таких параметрів режиму, за яких дисипована в середовищі енергія буде максимальною, а процес доущільнення — технологічно результативним і енергетично доцільним.

Аналіз останніх досліджень.

Упродовж останніх років значна увага дослідників приділяється підвищенню ефективності вібраційного ущільнення бетонних сумішей шляхом удосконалення конструкцій привантажувачів, робочих органів та режимів динамічного впливу [1, 6, 7]. У працях [2–5] показано, що адекватне моделювання системи «вібраційна машина – оброблюване середовище» повинно враховувати пружно-дисипативні властивості суміші, особливості передачі коливань у шарі матеріалу та умови взаємодії віброуючої поверхні з бетонним середовищем. Дослідження [3, 5] підтверджують, що характер контакту віброуючої плити з бетонною сумішшю, а також співвідношення між амплітудою, частотою та масою робочого органу істотно впливають на інтенсивність ущільнення і рівномірність розподілу енергії в об’ємі суміші. У роботах [1, 6, 7] особливу увагу приділено конструктивним схемам привантажувачів і комбінованих імпульсно-вібраційних установок, які забезпечують поєднання статичного навантаження з динамічним впливом та відкривають можливості керування параметрами доущільнення. Водночас недостатньо дослідженими залишаються умови узгодження вертикального і горизонтального каналів збудження, критерії максимізації дисипованої в

суміші енергії та обґрунтування оптимального режиму доущільнення бетонної суміші в установках із просторовим збудженням, що й зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Мета досліджень. Метою досліджень є розроблення та обґрунтування аналітичного підходу до визначення оптимального режиму доущільнення бетонної суміші у вібраційній машині з просторовим збудженням, з урахуванням динамічної взаємодії системи «форма – бетонна суміш – привантажувач», а також встановлення умов, за яких забезпечується максимальна ефективність передачі енергії в оброблюване середовище. Додатковою метою є дослідження впливу параметрів вертикальних і горизонтальних коливань на інтенсивність структурної перебудови бетонної суміші, величину дисипованої енергії та досягнення технологічно доцільного режиму ущільнення.

Викладення основного матеріалу дослідження. У досліджуваній установці (рисунок 1) ущільнення реалізується завдяки сумісному прояву: зсувних деформацій (горизонтальний віброзбуджувач у формі), циклічного стискання (вертикальний віброзбуджувач у привантажувачі). Тому доцільно ввести узагальнений критерій ефективності як відношення середньої корисної потужності, що витрачається на перебудову структури суміші, до підведеної потужності віброзбуджувачів. У дисертаційній постановці це можна подати через баланс енергії за період коливань.

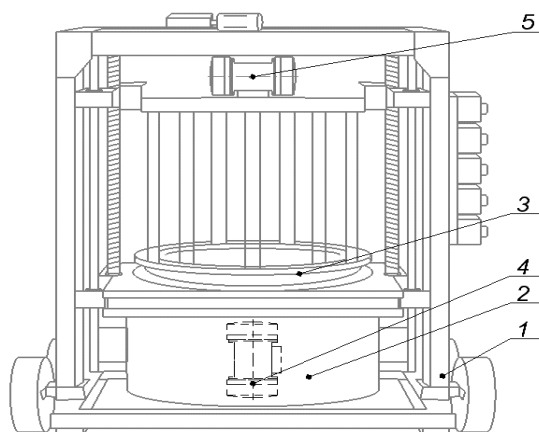


Рисунок 1 – Вібраційна машина для ущільнення залізобетонних елементів інженерних мереж

а) круглого та б) квадратного перерізу

1 – рама, 2 – вібраційна форма, 3 – привантажувач-пуансон,
4 – вібратор основний, 5 – вібратор привантажувача

Нехай W_{Σ} – підведена енергія за цикл, а ΔW_b – енергія, яка дисипується в бетонній суміші (саме вона пов’язана з руйнуванням структурних зв’язків та ущільненням).

Тоді коефіцієнт енергетичної ефективності:

$$\eta_b = \frac{\Delta W_b}{W_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Дисипована енергія в суміші при комбінованій дії у загальному випадку складається з двох складових: вертикальної (стиск) і горизонтальної (зсув):

$$\Delta W_b = \Delta W_{b,v} + \Delta W_{b,h}. \quad (2)$$

Для гармонічних коливань із круговою частотою ω , коли відносні швидкості деформацій у середовищі описуються як $\dot{\varepsilon}(t)$, дисипація за цикл визначається інтегралом

$$\Delta W_b = \int_0^T \int_{V_b} \sigma(r,t) \dot{\varepsilon}(r,t) dV dt, \quad (3)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4)$$

де σ_d – дисипативна складова напруження, V_b – об’єм бетонної суміші.

Оскільки в рамках прийнятої реологічної моделі дисипативні напруження пропорційні швидкості деформацій, то для двох домінуючих механізмів деформування (стискання по осі z та зсув у площині $r - \theta$):

$$\sigma_{d,v} = K_v \dot{\varepsilon}_v, \quad (5)$$

$$\tau_{d,h} = K_h \dot{\gamma}_h \quad (6)$$

де K_v – в’язкий коефіцієнт при стиску, K_h – в’язкий коефіцієнт при зсуві, ε_v – відносна вертикальна деформація, γ_h – кутова деформація зсуву.

Тоді, виділяючи вертикальну та горизонтальну частини дисипації:

$$\Delta W_{b,v} = \int_0^T \int_{V_b} K_v \dot{\varepsilon}_v^2(r,t) dV dt. \quad (7)$$

$$\Delta W_{b,h} = \int_0^T \int_{V_b} K_h \dot{\gamma}_h^2(r,t) dV dt \quad (8)$$

Для інженерного переходу до приведених параметрів (модель зосереджених параметрів), вводимо еквівалентні коефіцієнти дисипації у вертикальному та горизонтальному каналах:

$$B_v = \frac{K_v S_\Sigma}{h_b}, \quad (9)$$

$$B_h = \frac{K_h S_h}{h_b}. \quad (10)$$

де S_Σ – площа контакту пуансона, S_h – ефективна площа зсувної взаємодії, h_b – поточна висота шару.

Тоді енергія дисипації за цикл для гармонічних переміщень:

$$x_2(t) = A_v \sin(\omega_2 t), \quad (11)$$

$$u_1(t) = A_h \sin(\omega_1 t) \quad (12)$$

становить:

$$\Delta W_{b,v} = \int_0^{T_2} B_v \dot{x}_2^2(t) dt = \int_0^{T_2} B_v (A_v \omega_2)^2 \cos^2(\omega_2 t) dt = \pi B_v A_v^2 \omega_2. \quad (13)$$

$$\Delta W_{b,h} = \int_0^{T_1} B_h \dot{u}_1^2(t) dt = \int_0^{T_1} B_h (A_h \omega_1)^2 \cos^2(\omega_1 t) dt = \pi B_h A_h^2 \omega_1 \quad (14)$$

Отже, узагальнена дисипація в суміші (за умови узгодження частот або усереднення за спільний інтервал) може бути оцінена як

$$\Delta W_b \approx \pi (B_v A_v^2 \omega_2 + B_h A_h^2 \omega_1). \quad (15)$$

Саме максимізація цієї величини при заданих обмеженнях є фізично обґрунтованою умовою оптимального режиму ущільнення.

Процес ущільнення починається інтенсивно лише тоді, коли динамічні напруження в суміші перевищують порогове значення, що відповідає руйнуванню первинних структурних зв'язків та подоланню внутрішнього тертя. Для вертикального каналу таку умову доцільно формулювати через динамічний тиск на суміш.

Нехай статичний тиск від привантажувача:

$$P_{st} = \frac{F_{st}}{S_{\Sigma}}, \quad (16)$$

а динамічна складова тиску, зумовлена вертикальними коливаннями привантажувача:

$$P_{dyn}(t) = \frac{F_{dyn}(t)}{S_{\Sigma}}. \quad (17)$$

У зосередженій моделі F_{dyn} визначається як інерційна сила маси привантажувача, в абсолютному русі:

$$F_{dyn}(t) = m_2 \ddot{x}_2(t). \quad (18)$$

Для гармонічних коливань $x_2(t) = A_v \sin(\omega_2 t)$:

$$\ddot{x}_2(t) = -A_v \omega_2^2 \sin(\omega_2 t). \quad (19)$$

$$P_{dyn}(t) = -\frac{m_2 A_v \omega_2^2}{S_{\Sigma}} \sin(\omega_2 t) \quad (20)$$

Максимальний за модулем динамічний тиск:

$$P_{dyn}^{\max} = \frac{m_2 A_v \omega_2^2}{S_{\Sigma}}. \quad (21)$$

Тоді повний тиск на суміш:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{st} + P_{dyn}(t). \quad (22)$$

Порогова умова активного ущільнення у вертикальному каналі може бути записана як

$$P_{st} + P_{dyn}^{\max} \geq P_{cr}, \quad (23)$$

де P_{cr} – критичний тиск, при якому структура суміші переходить у стан інтенсивної перебудови.

Для горизонтального каналу аналогічну умову задаємо через зсувні напруження. Нехай середнє зсувне напруження у шарі суміші, викликане горизонтальними коливаннями форми, дорівнює:

$$\tau(t) = G_b \gamma(t) + K_h \dot{\gamma}(t), \quad (24)$$

де G_b – ефективний модуль зсуву суміші.

Тоді порогова умова:

$$\tau^{\max} \geq \tau_{cr}, \quad (25)$$

де τ_{cr} – критичне зсувне напруження, пов’язане з руйнуванням структурних зв’язків та початком «зсувної текучості».

Оскільки система має два незалежних джерела збудження, оптимізація режиму повинна враховувати узгодження частот горизонтального та вертикального каналів, яке забезпечує синергетичний ефект.

Для введення узгодження розглянемо спільну інтенсивність деформацій як функцію частот:

$$I(\omega_1, \omega_2) = \alpha_h B_h A_h^2 \omega_1 + \alpha_v B_v A_v^2 \omega_2, \quad (26)$$

де α_h, α_v – вагові коефіцієнти, що враховують чутливість ущільнення до зсувних та компресійних механізмів на відповідних стадіях.

Оптимальний режим визначається умовою максимуму:

$$\frac{\partial I}{\partial \omega_1} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial I}{\partial \omega_2} = 0 \quad (28)$$

з урахуванням обмежень на прискорення, амплітуду та недопущення розшарування:

$$a_h^{\max} = A_h \omega_1^2 \leq a_{h,\lim}, \quad (29)$$

$$a_v^{\max} = A_v \omega_2^2 \leq a_{v,\lim} \quad (30)$$

$P_\Sigma(t) \geq 0 \quad \forall t$ умова відсутності відриву пуансона від суміші,

$\Phi(\omega_1, \omega_2, A_h, A_v) \leq \Phi_{\lim}$ умова відсутності відриву пуансона від суміші,

У практичній постановці часто доцільно вводити коефіцієнт синергії просторового навантаження як відношення ефекту комбінованого режиму до суми ефектів окремих режимів:

$$K_{syn} = \frac{\Delta W_b^{(h+v)}}{\Delta W_b^{(h)} + \Delta W_b^{(v)}} \quad (31)$$

За наведеними виразами дисипації:

$$K_{syn} = \frac{\pi(B_v A_v^2 \omega_2 + B_h A_h^2 \omega_2)}{\pi(B_h A_h^2 \omega_1 + \pi B_v A_v^2 \omega_1)} = 1, \quad (32)$$

що для лінійної моделі відображає адитивність ефектів. Однак у реальних умовах B_v, B_h, C_b, G_b залежать від ступеня ущільнення та амплітуди, тобто $C_b = C_b(\rho, A_v, \omega_2, P_{st}), \quad B_v = B_v(\rho, A_v, \omega_2, P_{st}), \quad G_b = G_b(\rho, A_h, \omega_1),$
 $B_h = B_h(\rho, A_h, \omega_1)$
 де ρ – поточна щільність суміші.

Тоді коефіцієнт синергії стає функцією режиму й може перевищувати одиницю:

$$K_{syn} = K_{syn}(\omega_1, \omega_2, A_h, A_v, P_{st}, \rho) > 1, \quad (33)$$

що означає, що комбінована дія прискорює перебудову структури середовища за рахунок взаємного впливу зсувних і компресійних механізмів.

З урахуванням росту жорсткості суміші в процесі ущільнення, власні частоти системи з часом зміщуються. Тому раціональним є не точний резонанс, а квазірезонанс, коли збудження підтримується в області максимуму при допустимому рівні динамічних навантажень. У дисертаційному вигляді це формулюється через мінімізацію відхилення між частотою збудження та поточною власною частотою:

$$(\omega_2) = |\omega_2 - \omega_2^*(\rho)| \rightarrow \min, \quad (34)$$

де $\omega_2^*(\rho)$ – власна частота вертикальної підсистеми, що залежить від поточної щільності (а отже – від $C_b(\rho)$).

Умову квазірезонансного режиму можна подати як інтервал

$$\omega_2^*(\rho)(1 - \delta) \leq \omega_2 \leq \omega_2^*(\rho)(1 + \delta), \quad (35)$$

де δ – допустиме відносне відхилення з урахуванням демпфування та конструктивних обмежень.

Висновки: Отримані співвідношення показують, що оптимальний режим доущільнення у системі з просторовим збудженням визначається: максимізацією дисипованої у суміші енергії за цикл за рахунок вертикального стиску та горизонтального зсуву; виконанням порогових умов, що гарантують проходження процесу структурної перебудови середовища; узгодженням частот і амплітуд збудження з поточними динамічними властивостями суміші при забезпеченні обмежень на прискорення, тиск та недопущення розшарування. Подальший розвиток моделі полягає у формуванні алгоритму вибору параметрів привантажувача та режимів роботи віброзбуджувачів на основі визначених критеріїв.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nesterenko M. Loaders for Concrete Compaction / M. Nesterenko, O. Panfilov, M. Pyrlyk // Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering. – 2023. – Vol. 2, Iss. 61. – P. 80-85. – DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Сердюк Л.І., Давиденко Ю.О., Костенко П.М. Деякі підходи до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм // Ресурсоекономні матер., констр., будівлі та споруди. – Рівне : НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 69–72.
3. Маслов, О., Саленко, Ю., & Маслова, Н. (2011). Дослідження взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю. Вісник КНУ імені Михайла Остроградського, (2/201 (67), ч. 1), 93–98.
4. Назаренко, І. І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е вид.). Київ. 440 с.
5. Maslov A.G., Salenko J.S., Maslova N.A. Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 2 (67). – С. 93–98.
6. Ведмідь В.В. Експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки / В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик // Системні технології. – 2025. – Т. 5, № 160. – С. 178–188. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19> . <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2237>
7. Дьяченко О., Пригоцький В., Маліцький І. Огляд схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та аналіз можливостей керування параметрами ущільнення // Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 17–19 трав. 2022 р.). – Київ : КНУБА, 2022. – С. 28–31.

Received 10.03.2026.

Accepted 16.04.2026.

Published 30.04.2026

CONDITIONS FOR THE OPTIMAL RE-COMPACTION MODE OF A CONCRETE MIXTURE AND CRITERIA FOR VIBRATION EFFICIENCY

Abstract. *The article considers the conditions for the optimal re-compaction mode of a concrete mixture in a vibration machine with spatial excitation, in which the action of horizontal oscillations of the mould is combined with vertical oscillations of the surcharge device. The relevance of the study is обусловлена by the need to improve the efficiency of vibration compaction of concrete products, ensure intensive structural rearrangement of the mixture, and reduce energy consumption during the forming process. The aim of the study is to establish criteria for the efficiency of vibration re-compaction and to substantiate the parameters of the optimal operating mode of the installation based on an energy approach. The study uses methods of analytical modeling based on the energy balance over one oscillation cycle, determination of dissipated energy in the vertical and horizontal deformation channels, as well as formulation of threshold conditions for active compaction according to dynamic pressure and shear stresses. Relations were obtained that make it possible to assess the energy efficiency of the process, establish the conditions for coordinating excitation frequencies, and determine the synergy coefficient of the combined action of shear and compression mechanisms. It is shown that the optimal re-compaction mode is achieved under the condition of maximizing the energy dissipated in the mixture, fulfilling the threshold conditions for structural rearrangement of the medium, and maintaining a quasi-resonant mode while taking into account changes in the dynamic properties of the mixture during compaction. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed criteria to select the parameters of the surcharge device and the operating modes of vibration exciters in the design and improvement of vibration installations for forming concrete products.*

Keywords: *concrete mixture, vibration compaction, re-compaction, spatial excitation, surcharge device, dissipated energy, dynamic pressure, shear stresses, quasi-resonant mode, efficiency criterion.*

REFERENCES

1. Nesterenko, M., Panfilov, O., & Pyrlyk, M. (2023). Loaders for concrete compaction. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 2(61), 80–85. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Serdiuk, L. I., Davydenko, Yu. O., & Kostenko, P. M. (2005). Some approaches to modeling a medium processed by a vibration device [Deiaki pidkhody do modeliuvannia seredovyscha,

- shcho obrobliatsia vibratsiynym prystroiem]. Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Constructions – Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, 12, 69–72. Rivne: NUWM.
3. Maslov, O., Salenko, Yu., & Maslova, N. (2011). Investigation of interaction between a vibrating plate and cement concrete mixture [Doslidzhennia vzaiemodii vibruiuchoi plyty z tsementobetonnoi sumishshiu]. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University – Visnyk KNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2(67), Pt. 1, 93–98.
 4. Nazarenko, I. I. (2010). Applied problems of vibration systems theory [Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system] (2nd ed.). Kyiv, Ukraine.
 5. Maslov, A. G., Salenko, J. S., & Maslova, N. A. (2011). Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2(67), 93–98.
 6. Vedmid, V. V., Nesterenko, T. M., Nesterenko, M. M., & Pyrlyk, M. O. (2025). Experimental studies of a combined impulse–vibration installation [Eksperymentalni doslidzhennia kombinovanoi impulsno-vibratsiinoi ustanovky]. System Technologies, 5(160), 178–188. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19>
 7. Diachenko, O., Pryhotskyi, V., & Malitskyi, I. (2022). Review of vibration platform schemes with vertical oscillations and analysis of compaction control possibilities [Ohliad skhem vibromaidanchykyv z vertykalnymy kolyvanniamy ta analiz mozhlyvosti keruvannia parametramy ushchilnennia]. In Energy-Saving Machines and Technologies: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (pp. 28–31). Kyiv: KNUCA.

Пирлик Маклим Олександрович - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, Полтава, Україна, 36011, maxpirlik@gmail.com ORCID:0009-0006-1343-9516

Нестеренко Микола Миколайович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, Полтава, Україна, 36011, nesterenkonikola@gmail.com ORCID:0000-0002-4073-1233

Maklym Pyrlyk– Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011, E-mail: maxpirlik@gmail.com ORCID: 0009-0006-1343-9516

Mykola Nesterenko - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011, E-mail – nesterenkonikola@gmail.com, ID ORCID: 0000-0002-4073-1233

DOI: 10.34185/1991-7848.2026.01.17

УДК 621.7:004.94

Д.О. Редчиць, С.В. Моїсеєнко, Д.С. Адаменко, К.В. Кремнева, О.В. Акіменко

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності прогнозування процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків в адитивному виробництві. Метою роботи є розробка узагальненої фізико-математичної моделі та ефективного чисельного алгоритму з урахуванням теплообміну, гідродинаміки та еволюції вільної поверхні. Використано метод скінченних об'ємів і ітераційний розрахунковий блок GMRES. У результаті отримано розподіл поля температури в розрахунковій області з виділенням зони ліквідусу. Побудовано залежності ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера та діаметру лазерної плями. Зроблено висновок про адекватність моделі та її придатність для інженерних розрахунків.

Ключові слова: Математичне моделювання, адитивні технології, 3D-друк, вибіркове лазерне плавлення (SLM), лазерне плавлення порошкового слою (LPBF), обчислювальна гідрогазодинаміка.

Постановка проблеми

Загальна фізична постановка задачі селективного лазерного плавлення металевих порошків включає в себе розгляд процесів теплообміну порошку і ванни розплаву; гідродинаміки розплаву з виділенням фронту кристалізації; ефекти Марангоні, що виникають на поверхні розділу рідкої та газоподібної фаз; теплового впливу лазерного променя на поверхню порошку та розплаву (врахування абсорбції та відображення); випаровування продуктів плавлення (формування металевої пари), тиску віддачі при випаровуванні металу та теплового випромінювання з поверхні, фазових переходів з урахуванням питомої теплоти плавлення та пароутворення, формування пор у виробі, а

© Редчиць Д.О., Моїсеєнко С.В., Адаменко Д.С., Кремнева К.В., Акіменко О.В., 2026 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under License CC BY 4.0.

також урахування дискретності порошкового шару та розбризкування рідкого металу з ванни розплаву.

Прийняті припущення та обмеження

Селективне лазерне плавлення порошоків є складним багатофазним процесом, що включає перехід між твердою, рідкою та газоподібною фазами. В даній роботі для спрощення математичної моделі зроблено такі припущення та обмеження [9].

- Розплавлений метал є ньютонівською стисливою рідиною.
- Режимми течії вважаються ламінарними.
- Лазер є безперервним гаусівським джерелом енергії.
- Поглинаюча здатність металу вважається постійною.
- Втратами маси при випаровуванні металу нехтують в силу їхньої малості.
- Формування плазми не розглядається.
- Взаємодія лазера з випареним металом не розглядається
- Хімічні реакції у ванні розплаву є незначними.
- Фізичні властивості металів ізотропні та залежать від зміни температури.
- Для моделювання впливу відхилення густини на потік використовується наближення Бусінеска.
- Не враховується перерозподіл частинок порошку в околі ванни розплаву в силу ефекту денудації.
- Не враховується динаміка потоку газу, що виникає під час випаровування металу з поверхні розплаву.
- Взаємодія металевого порошку та ванни розплаву з інертним газом (аргоном) не розглядаються у явному вигляді.
- Адсорбція газу із навколишнього середовища не розглядається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Математична модель, що розробляється, з одного боку, повинна враховувати основні фізичні процеси, що відбуваються, а з іншого боку, бути достатньо компактною для реалізації на сучасних персональних комп'ютерах [오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.,2].

Аналіз наукової проблеми показав, що для коректного моделювання селективного лазерного плавлення необхідно враховувати наступні ключові аспекти: тепловий вплив лазерного променя на поверхню порошку та

розплаву; теплообмін порошку та ванни розплаву; термокапілярну конвекцію; випаровування продуктів плавлення з поверхні ванни розплаву; теплові втрати з поверхні на випромінювання та конвекцію; поглинання та виділення прихованого тепла фазового переходу; динаміку рідкої фази з виділенням фронту кристалізації; адсорбцію газу з навколишнього середовища; розбризкування/розсіювання частинок рідкого та твердого металу; тиск віддачі газу; силу тяжіння та поверхневого натягу; змочування.

Для надійної роботи SLM-обладнання та виготовлення якісних виробів необхідно створення ефективного, надійного та ретельно верифікованого програмного забезпечення для розв’язку зв’язаних задач термодинаміки ванни розплаву й інертного газу, а також їх взаємодії з металевим порошком.

Складні фізичні процеси, що відбуваються при селективному лазерному плавленні металевих порошків, є тривимірними та нестационарними. Фізичні явища протікають у широкому діапазоні часових та просторових масштабів на різних фазах процесу від формування шару порошку до плавлення та затвердіння [3-5].

Надзвичайно високі швидкості нагрівання та охолодження викликають безліч динамічних та перехідних явищ у процесах LPBF, включаючи плавлення та часткове випаровування порошків, течію розплавленого металу, викид та перерозподіл порошку, швидке затвердіння та нерівноважні фазові переходи [6-8].

Для моделювання динаміки ванни розплаву застосовуються чисельні підходи на основі: методу ґратчастих рівнянь Больцмана (Lattice Boltzmann Method – LBM); методу гідродинаміки згладжених часток (Smoothed Particle Hydrodynamics – SPH); моделей обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD).

Метод ґратчастих рівнянь Больцмана не розв’язує безпосередньо рівняння Нав’є-Стокса, а моделює потік ньютонівської рідини дискретним кінетичним рівнянням Больцмана [10]. Методи ґратчастих рівнянь Больцмана мають нестійку поведінку на границі рухливих тіл. Крім того, розщеплення за фізичними процесами, що використовується в даному підході, призводить до першого порядку точності простору апроксимації конвективних доданків.

Перший порядок призводить до похибки апроксимації, зіставної з другими похідними (в'язкість, теплопровідність).

Метод гідродинаміки згладжених частинок є безсітковим, у якому середовище представлене великим набором фіктивних лагранжових частинок, кожна з яких визначається локальною функцією. Застосовуються стандартні фізичні рівняння, які розкладаються на взаємодії між сусідніми «частинками». Одним із недоліків SPH методу в порівнянні з сітковими методами є необхідність використання великої кількості частинок для якісного моделювання гідродинамічних течій.

Методи обчислювальної гідродинаміки засновані на розв'язанні нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса стисливого газу або нестисливої рідини, які є системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Для моделювання вільної поверхні спільно з рівняннями Нав'є-Стокса застосовується метод об'єму рідини (VOF) або метод набору рівнів (LSM), які відносяться до класу ейлерових методів [11,13].

Мета дослідження

Метою дослідження є формулювання загальної постановки проблеми дослідження теплообміну та динаміки ванни розплаву з урахуванням вільної поверхні при взаємодії з лазерним променем з метою моделювання процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків., а також розроблення чисельного алгоритму розв'язання вихідних рівнянь, який базується на тришаровій неявній схемі, що має другий порядок точності інтегрування за часом, третій порядок протипотокової апроксимації конвективних доданків, і другий порядок центрально-різницевої апроксимації дифузійних членів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Математична постановка задачі селективного лазерного плавлення металевих порошків

З урахуванням прийнятих припущень загальна математична постановка задачі селективного лазерного плавлення металевих порошків зводиться до постановки окремих структурно зв'язаних між собою задач. А саме, таких як:

- задача про нестационарний теплообмін з урахуванням фазових переходів (плавлення порошкового матеріалу та подальша кристалізація

розплаву при охолодженні) при нагріванні металевих порошків рухомим лазерним променем;

– задача про динаміку рідкого металу в ванні розплаву з урахуванням об'ємних і поверхневих сил;

– задача про визначення нестационарної форми вільної поверхні ванни розплаву за наявності тиску віддачі, а також виникнення пор і розбризкування рідкого металу.

Моделювання вільної поверхні

Положення поверхні ванни розплаву априорі невідоме. Для відстеження положення та форми поверхні ванни розплаву (вільної поверхні) використовується метод об'єму рідини (VOF). Метод VOF вловлює межу розділу між двома фазами, що не змішуються, тобто межу між металом й інертним газом. Даний метод заснований на розв'язанні скалярного рівняння переносу для об'ємної частки рідини в комірці γ у вигляді [13]

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla(u \cdot \gamma) = 0,$$

де γ – фазова частка, яка позначає відношення об'єму, що займає металева фаза V_{metal} до загального об'єму комірки V , та визначається виразом

$$\gamma = \frac{V_{metal}}{V} = \begin{cases} 1 & \text{метал (рідкий, твердий)} \\ 0 < \gamma < 1 & \text{розділ фаз} \\ 0 & \text{інертний газ} \end{cases}.$$

При $\gamma = 0$ комірка повністю заповнений інертним газом, та повністю заповнений металом при $\gamma = 1$. Коли значення γ знаходиться у діапазоні між 0 и 1, в комірці існує границя розділу середовищ між металом та інертним газом.

Моделювання теплообміну

При описі конвективних переносів необхідно враховувати процеси теплопровідності між окремими частинами суцільного середовища (тепло- та масоперенесення), а також радіаційний теплообмін (випромінювання). Конвективне перенесення пов'язано з використанням тих чи інших моделей руху середовища. Найбільшого поширення в теорії тепло- та масоперенесення

отримали рівняння Нав'є-Стокса в наближенні Бусінеска. У розглянутій моделі густина, коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність є функціями температури $\rho = \rho(T)$, $C_P = C_P(T)$, $k = k(T)$, а також враховується прихована теплота фазових перетворень (плавлення та випаровування).

Рівняння теплообміну з конвективним членом може бути записане через питому ентальпію у вигляді [13]

$$\rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(u \cdot h) \right] = \nabla(k \nabla T) + Q_{Laser} - Q_{Losses}, \quad (1)$$

де ρ – густина, k – коефіцієнт теплопровідності, T – температура, C_P – питома теплоємність, Q_{Laser} – об'ємне джерело тепла, Q_{Losses} – об'ємні втрати тепла, u – вектор швидкості, h – питома ентальпія, t – час.

Температурне поле розраховується виходячи з наступного співвідношення

$$C_P = \frac{h - h_{ref}}{T - T_{ref}},$$

$$T_{ref} = \begin{cases} T_0 \\ T_s \\ T_l \\ T_b \\ T_b \end{cases} \quad h_{ref} = \begin{cases} h_0 \\ h_s \\ h_l \\ h \\ h_v \end{cases} \quad C_P = \begin{cases} C_{Ps}, & h < h_s \\ C_{Ps}(1 - f_l) + C_{Pl}f_l, & h_s \leq h \leq h_l \\ C_{Pl}, & h_l < h < h_b, \\ C_{Pl}, & h_b \leq h \leq h_v \\ C_{Pl}, & h > h_v \end{cases}$$

де T_s – температура солідуса, T_l – температура ліквідуса, T_b – температура кипіння (пароутворення), C_{Ps} – питома теплоємність при температурі солідуса, C_{Pl} – питома теплоємність при температурі ліквідуса, h_v – питома теплота пароутворення, h_l – питома теплота при температурі ліквідуса, h_s – питома теплота при температурі солідуса.

Вагова функція f_l визначає частку твердої та рідкої фази в об'ємі, що розглядається. В рідкій фазі $f_l = 1$, в твердій фазі $f_l = 0$ та лінійний профіль в двофазному середовищі. Функція f_l визначається як

$$f_l = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s}, & T_s \leq T \leq T_l \\ 1, & T > T_l \end{cases}$$

Теплофізичні властивості металу в двофазному середовищі розраховуються за наступною інтерполяційною залежністю [13]

$$\psi = (1 - f_l)\psi_s + f_l\psi_l, \quad \psi \in [\rho, \mu, C_p, k].$$

де ψ – конкретна властивість металу в моделі (густина, коефіцієнт динамічної в'язкості, питома теплоємність, теплопровідність), ψ_l і ψ_s – відповідні властивості у рідкій та твердій фазі відповідно.

При моделюванні теплофізичні властивості двох фаз, що не змішуються, розраховуються за допомогою континуальної формули, заснованої на класичній теорії сумішей. Об'ємно-фракційне середнє значення загальної теплофізичної властивості задається як [13]

$$\vartheta = \gamma\vartheta_{metal} + (1 - \gamma)\vartheta_{gas}, \quad \vartheta \in [\rho, \mu, C_p, k], \quad (2)$$

де ρ, μ, C_p, k – густина, коефіцієнт динамічної в'язкості, питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності відповідно.

Множник ϑ_{metal} в рівнянні (2) представляє собою теплофізичні властивості металевій фази та задається наступним чином

$$\vartheta_{metal} = \vartheta_{liquid,metal} \cdot f_l + \vartheta_{solid,metal}(1 - f_l),$$

Складова Q_{Losses} в рівнянні (1) представляє собою теплові втрати від випаровування, конвекції, випромінювання та визначається як

$$Q_{Losses} = (q_{vaporation} + q_{convection} + q_{radiation})|\nabla\gamma| \frac{2\rho C_{p\,eff}}{\rho_{metal}C_{p\,metal} + \rho_{gas}C_{p\,gas}},$$

Коли температура металу перевищує точку кипіння, необхідно враховувати втрати тепла під час його випаровування. Втрати тепла за рахунок

випаровування є добутком питомої теплоти пароутворення h_v та масової втрати випаровування $\dot{m}_v$ та визначаються як [9]

$$q_{vaporation} = h_v \cdot \dot{m}_v,$$

де h_v – питома теплота пароутворення, $\dot{m}_v$ – швидкість випаровування з одиниці площі.

Швидкість випаровування (масова витрата) визначається як [9]

$$\dot{m}_v = (1 - \beta)p_v \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}},$$

де p_v – тиск пари, p_0 – тиск навколишнього середовища, M – молярна маса, R – універсальна газова постійна, β – коефіцієнт акомодатії, який показує частку молекул пари, що поглинається поверхнею ($\beta = 0.18$).

Тиск пари при температурі T може бути розраховано за наступним співвідношенням

$$p_v = 0.54p_0 \exp \left[\frac{h_v M}{RT_b} \left(1 - \frac{T_b}{T} \right) \right].$$

Зазвичай вважається, що тепловий потік пропорційний різниці температур між поверхнею та навколишнім середовищем.

Конвективний теплообмін визначається наступним чином

$$q_{convection} = \alpha(T - T_0),$$

де α – коефіцієнт конвективної теплопередачі ($\alpha = 50 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$), T_0 – температура навколишнього середовища ($T_0 = 293 \text{ К}$).

Відповідно до інтегрального закону випромінювання абсолютно чорного тіла (закон Стефана-Больцмана), який визначає залежність густини потужності випромінювання абсолютно чорного тіла від його температури, теплові втрати через випромінювання можна виразити

$$q_{\text{radiation}} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4),$$

де σ – постійна Стефана-Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$); ε – коефіцієнт випромінювання ($0 < \varepsilon < 1$).

Розподіл джерела тепла є важливим параметром під час моделювання процесів селективного лазерного плавлення порошків. Існують два види моделей джерела тепла: поверхневий та об'ємний. Модель поверхневого джерела тепла найкраще підходить для режиму провідності, оскільки в цьому режимі енергія прикладається до поверхні деталі. У той час як об'ємне джерело тепла більш адаптоване для режиму глибокого проплавлення, коли енергія до ванни розплаву підводиться через западину (порожнину), що формується, внаслідок впливу тиску віддачі. Потік тепла на поверхні від лазерного променя підпорядковується гауссівському розподілу та записується як

$$q_{\text{laser}} = \frac{2\eta P_{\text{laser}}}{\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right),$$

де η – коефіцієнт поглинання металу, P_{laser} – потужність лазера, r_0 – радіус лазерного променя, r – відстань від центру лазерного променя, яка визначається як

$$r = \sqrt{(x - x_0 - v_{\text{laser}}t)^2 + (y - y_0)^2},$$

де x, y – координати вузла розрахункової сітки, x_0, y_0 – початкові координати центру лазерного променя, v_{laser} – швидкість лазерного променя.

$$Q_{\text{Laser}} = q_{\text{laser}} \cdot |\nabla \gamma| \frac{2\rho C_{p\text{eff}}}{\rho_{\text{metal}} C_{p\text{metal}} + \rho_{\text{gas}} C_{p\text{gas}}},$$

Моделювання динаміки рідкого металу

У роботі розглядається рух рідкого металу за малих швидкостей. У цьому випадку ефектами стисливості рідкого металу нехтують і його можна розглядати як в'язку нестисливу рідину [12].

Динаміка потоку рідини описується рівняннями збереження маси та імпульсу – рівняннями Нав'є-Стокса для нестисливої рідини в наближенні

Бусінеска. Основна ідея наближення полягає в особливості врахування залежності густини від температури [13]

$$\nabla \cdot u = 0,$$

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right] = -\nabla P + \mu \Delta u + F_{Buoyancy} + F_{Darcy} + F_{Surface}, \quad (3)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, t – час, u – вектор швидкості, P – тиск, ρ – густина рідкого металу, μ – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Доданок $F_{Buoyancy}$ в рівнянні (3) представляє собою виштовхуючу (архімедову) силу. Відхилення густини рідкого металу при зміні температури призводить до виникнення природної конвекції, і зазвичай виражається за допомогою наближення Бусінеска наступним чином

$$F_{Buoyancy} = \rho g [1 - \beta_T (T - T_m)],$$

де g – прискорення вільного падіння, β_T – коефіцієнт теплового розширення, T_m – температура плавлення.

Доданок F_{Darcy} у рівнянні (3) є дисипацією механічної енергії при терті в двофазній зоні (коли рідина проходить через пористе середовище). Даний доданок відповідає за плавне зниження швидкості рідкого металу на межі розділу фаз і перетворює її на нуль у зоні нерозплавленого металу. Передбачається, що цей доданок змінюється в залежності від частки рідини f_l і виражається відповідно до рівняння Козені-Кармана

$$F_{Darcy} = - \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + b} C u,$$

де C – демпфуюча константа ($C = 1.6 \cdot 10^5$), b – константа, що запобігає діленню на нуль, коли рідка фракція f_l стає рівною нулю ($b = 10^{-6}$).

Джерельний член $F_{Surface}$ в рівнянні (3) представляє собою сили, які діють на межі розділу середовищ

$$F_{Surface} = \left\{ \sigma_{\gamma} k \cdot \hat{n} + \frac{d\sigma_{\gamma}}{dT} [\nabla T - \hat{n}(\hat{n} \cdot \nabla T)] + P_v \cdot \hat{n} \right\} |\nabla \gamma| \frac{2\rho}{\rho_{metal} + \rho_{gas}},$$

де σ_{γ} – коефіцієнт поверхневого натягу, $k = -(\nabla \cdot \hat{n})$ – середня кривизна вільної поверхні, $\hat{n} = \nabla \gamma / |\nabla \gamma|$ – вектор одиничної нормалі до поверхні, $d\sigma_{\gamma}/dT$ – температурний коефіцієнт поверхневого натягу.

Перший доданок – це сила поверхневого натягу, що діє за нормаллю до межі розділу середовищ, другий доданок – сила, обумовлена термокапілярною конвекцією (конвекція Бенара-Марангоні), що діє в тангенціальному напрямку і викликана просторовою зміною коефіцієнта поверхневого натягу вздовж межі розділу середовищ через градієнт температури, а третій доданок – тиск віддачі, що вчинюють пари металу на верхню поверхню ванни розплаву. Множник перерозподіляє розподілені сили у бік щільнішої фази (метал), що дозволяє уникнути виникнення помилкових потоків у газовій фазі

Множник $2\rho/(\rho_{metal} + \rho_{gas})$ перерозподіляє розподілені сили у бік щільнішої фази (метал), що дозволяє уникнути виникнення помилкових потоків у газовій фазі.

Аналіз результатів розв'язку теплової задачі селективного лазерного плавлення металевих порошків.

Задача про нестационарний теплообмін є найбільш важливою, оскільки вичерпна інформація про тепловий режим потрібна як при описі процесів плавлення та кристалізації, так і при оцінюванні глобального напружено-деформованого стану тіла, отриманого селективним лазерним плавленням. Розв'язання цієї задачі без явного опису динаміки розплаву, але з адекватним прогнозом формування ванни за ізотермами ліквідусу та солідусу є найбільш поширеним методом розрахунку залежності властивостей виробу від параметрів технологічного процесу.

Основне рівняння, яке описує нестационарний просторовий переніс тепла є рівняння теплопровідності. З метою урахування фазових переходів рівняння теплопровідності розв'язувалось відносно ентальпії. В якості початкових умов задавалася постійна температура 293°К. Граничні умови склалися з умов Діріхле, Неймана та Ньютона. При цьому враховувалися втрати тепла за рахунок конвекції та випромінювання. У розробленій моделі густина,

коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність є функціями температури. Також враховувалася прихована теплота фазових перетворень (плавлення та випаровування).

Рівняння теплопровідності записувалось в криволінійній системі координат. Дискретний аналог вихідного рівняння теплопровідності побудовано методом скінчених об'ємів. Похідні у дифузійних членах апроксимуються центрально-різницевою схемою другого порядку точності.

Розроблений алгоритм базується на тришаровій неявній схемі з підітераціями за псевдочасом τ другого порядку точності за фізичним часом t

$$\left[\frac{1}{J\Delta\tau} + \frac{1.5}{J\Delta t} + \left(\frac{\partial \hat{r}}{\partial h} \right)^{n+1,m} \right] (h^{n+1,m+1} - h^{n+1,m}) = -\hat{r}^{n+1,m} - \frac{1.5\hat{h}^{n+1,m} - 2\hat{h}^n + 0.5\hat{h}^{n-1}}{\Delta t}.$$

де верхній індекс n позначає момент часу $t = n\Delta t$, а індекс m відповідає псевдочасовому ітераційному шару, $\hat{r}$ – права частина в рівнянні теплопровідності.

Отримана скалярна система лінійних алгебраїчних рівнянь неявної схеми розв'язувалася методом мінімізації узагальненої нев'язки (GMRES) з неповним LU-розкладанням (ILU(k)) загальної матриці системи у якості передумовлювання [14, 15].

Розміри області, що розглядалася, за довжиною, шириною та висотою становила $3000 \times 1000 \times 1000$ мкм відповідно. Крок інтегрування за часом дорівнював 10^{-5} с.

В результаті проведеного комп'ютерного моделювання нестационарних процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків отримано розподіл поля температури в розрахунковій області з виділенням зони ліквідусу (рис. 1). Побудовано залежності ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера та діаметру лазерної плями (рис. 2, 3).

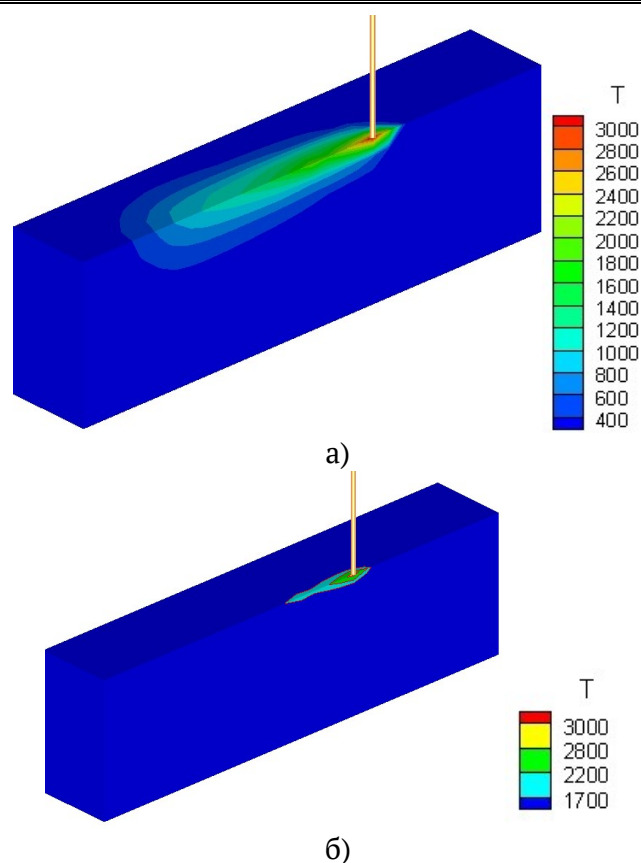


Рисунок 1 – Розподіл температури в розрахунковій області (а) з виділенням зони ліквідусу (б).

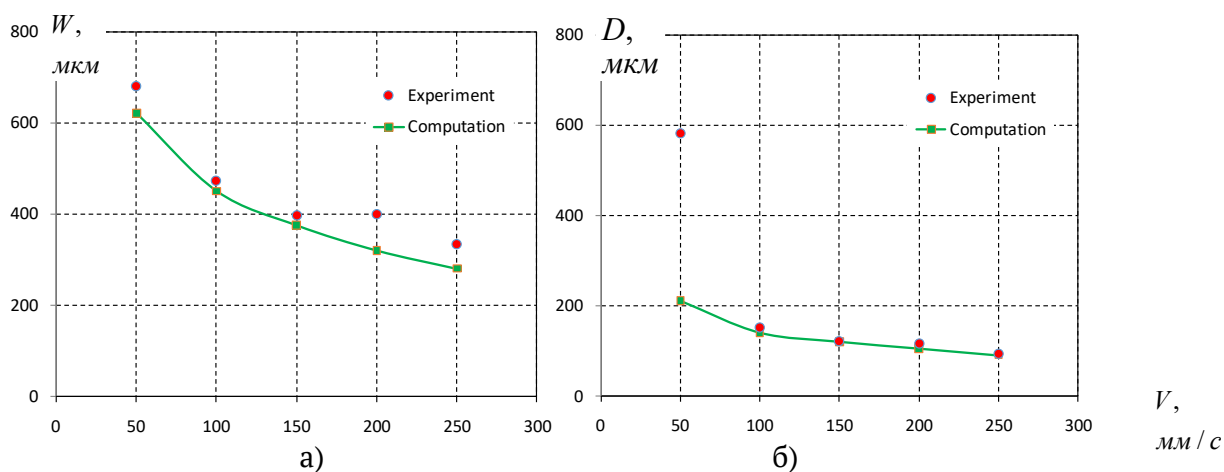


Рисунок 2 – Залежність ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера (потужність лазера $P = 400$ Вт, діаметр лазерної плями $d = 205$ мкм).

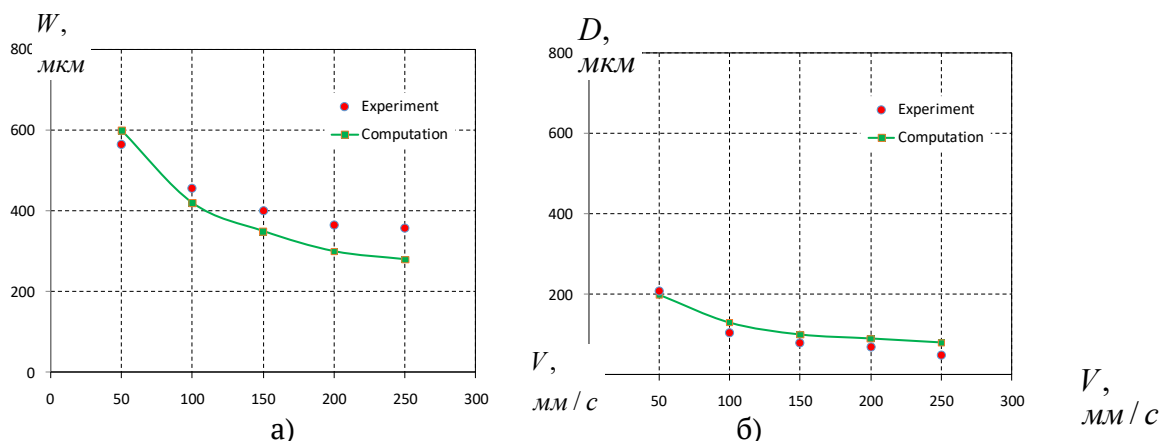


Рисунок 3 – Залежність ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера (потужність лазера $P = 400$ Вт, діаметр лазерної плями $d = 262$ мкм)

Виділено два основні режими, що відбуваються при селективному лазерному плавленні металевих порошків – режим провідності та режим глибокого проплавлення. Ці режими істотно відрізняються один від одного, суттєво впливають на якість виробу, а їх існування залежить від щільності потужності в одиницю часу. В режимі глибокого проплавлення використання моделі на базі лише одного рівняння теплопровідності дає незадовільні результати, які суттєво відрізняються від експериментальних даних. Показано, що при селективному лазерному плавленні металевих порошків у режимі провідності достатньо використовувати лише рівняння теплопровідності з урахуванням фазових переходів. Отримані результати задовільно збігаються з експериментальними даними.

Висновки

Розглянуто фізичні процеси, що відбуваються при селективному лазерному плавленні металевих порошків. Визначено, які основні фізичні процеси необхідно враховувати для адекватного моделювання селективного лазерного плавлення металевих порошків.

В результаті проведеного огляду методів математичного моделювання обрано клас математичних моделей, який дозволяє якісно та кількісно відтворювати реальні фізичні процеси з достатньою точністю та прийнятними витратами часу. Визначено напрями розробки математичних моделей для опису процесів, що відбуваються при селективному лазерному плавленні металевих порошків.

Сформульовано загальну постановку проблеми дослідження теплообміну та динаміки ванни розплаву з урахуванням вільної поверхні при взаємодії з лазерним променем з метою моделювання процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків. Постановка проблеми базується на розв'язку рівняння теплообміну, рівнянь Нав'є-Стокса в наближенні Бусінеска, а також рівняння, що описує поведінку вільної поверхні ванни розплаву при взаємодії з лазером.

Для опису нестационарних теплових процесів, що відбуваються при селективному лазерному плавленні металевих порошків, розглянуто рівняння теплопровідності в криволінійній системі координат. Розроблено чисельний алгоритм розв'язання вихідних рівнянь, який базується на тришаровій неявній схемі, що має другий порядок точності інтегрування за часом, третій порядок протипотокової апроксимації конвективних доданків, і другий порядок центрально-різницевої апроксимації дифузійних членів. Узгодження полів тиску і швидкості в рівняннях Нав'є-Стокса здійснювалось за допомогою методу штучної стисливості, модифікованого для розрахунку нестационарних задач. Система вихідних рівнянь інтегрувалась чисельно з використанням методу скінченного об'єму. Система лінійних алгебраїчних рівнянь неявної схеми розв'язувалась методом мінімізації узагальненої нев'язки (GMRES) з неповним LU-розкладанням (ILU(k)) загальної матриці системи у якості передзумовлювання.

В результаті проведеного чисельного моделювання нестационарних процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків отримано розподіл поля температури в розрахунковій області з виділенням зони ліквідусу. Побудовано залежності ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера та діаметру лазерної плями.

Виділено два основні режими, що відбуваються при селективному лазерному плавленні металевих порошків – режим провідності та режим глибокого проплавлення. Ці режими істотно відрізняються один від одного, суттєво впливають на якість виробу, а їх існування залежить від щільності потужності в одиницю часу.

В режимі глибокого проплавлення використання моделі на базі лише одного рівняння теплопровідності дає незадовільні результати, які суттєво

відрізняються від експериментальних даних. Показано, що при селективному лазерному плавленні металевих порошків у режимі провідності достатньо використовувати лише рівняння теплопровідності з урахуванням фазових переходів. Отримані результати задовільно збігаються з експериментальними даними.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Kopeika O.V., Tereshchenko A.V. Wind-power transforming systems. *Journal of Mathematical Sciences*. 2001. 104 (6). Pp. 1631-1634. DOI: 10.1023/A:1011329213322
2. Redchys D. O., Gourjii A. A., Moiseienko S. V., Bilousova T. P. Aerodynamics of the turbulent flow around a multi-element airfoil in cruise configuration and in takeoff and landing configuration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 5(7, 101). P. 36–41.
3. Khairallah S. A., Martin A. A., Lee J. R., Guss G., Calta N. P., Hammons J. A., Nielsen M., Chaput K., Schwalbach E., Shah M. N., Chapman M. G., Willey T. M., Rubenchik A. M., Anderson A. T., Wang Y. M., Matthews M. J., King W. E. Controlling interdependent meso-nanosecond dynamics and defect generation in metal 3D printing. *Science*. 2020. 5 (5). P. 660–665. DOI: 10.1126/science.aay7830.
4. Li L., Gong J., Xia H., Peng G., Hao Y., Meng S., Wang J. Influence of scan paths on flow dynamics and weld formations during oscillating laser welding of 5A06 aluminum alloy. *Journal of materials research and technology*. 2021. 30 (11). P. 294-298. DOI:10.1016/j.jmrt.2020.12.102
5. Xua J., Rong Y., Huang Y., Wang P., Wang C. Keyhole-induced porosity formation during laser welding. *Journal of Materials Processing Tech.* 2018. 252. P. 720-727. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.038
6. Bunaziv I., Akselsen O. M., Ren X., Nyhus B., Eriksson M. Laser Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminium Alloys. *Journal Metals*. 2021. 59 (11). P. 59. DOI: 10.3390/met11081150.
7. Liu P., Huang L., Gan L., Lei Y. Effect of plate thickness on weld pool dynamics and keyhole-induced porosity formation in laser welding of Al alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. 111. P. 735-747. DOI: 10.1007/s00170-020-05818-5.
8. Matthews J., Guss G., Khairallah S. A., Rubenchik A. M., Depond P. J., King W. E., Matthews M. J. Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. *Journal Metals*. 2016. 114. P. 33-42. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.05.017
9. Zhang T., Li H., Liu S., Shen S., Xie H., Shi W., Zhang G., Shen B., Chen L., Xiao B., Wei M.. Evolution of molten pool during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Journal Physics*. 2018. 17 (11). P. 17. DOI: 10.1088/1361-6463/aeee04.
10. Korner C., Bauer A., Attar E. Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2013. 18 (21). P. 18. DOI: 10.1088/0965-0393/21/8/085011.
11. Zhang Y., Chen Q., Guillemot G., Gandin C.A, Bellet M. Numerical modelling of fluid and solid thermomechanics in additive manufacturing by powder-bed fusion: Continuum and level set formulation applied to track- and part-scale simulations. *Mecanique*. 2018. 346. P. 1055-1071. DOI: 10.1016/j.crme.2018.08.008.
12. Redchys D. O., Shkvar E. A., Moiseienko S. V. Computational Simulation of Turbulent Flow Around Tractor-Trailers. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2020. 16 (1). P. 91–103. DOI: 10.32604/fdmp.2020.07933.

13. Aggarwal A., Patel S., Kumar A. Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel: Physics of Melting Mode Transition and Its Influence on Microstructural and Mechanical Behavior. Minerals, Metals & Materials Society. Published online. 2019. 12. P. 1106-1116.
14. Moiseienko S., Tuchyna U., Redchyts D., Zaika V., Vygodner I. Comparative Analysis of Numerical Methods for Solving Linear Equation Systems for Poisson's equation. Advances in Mechanical and Power Engineering. CAMPE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2023. P 169–177. DOI:10.1007/978-3-031-18487-1_17
15. Van der Vorst, H. A. Iterative Methods for Large Linear. Utrecht, Netherlands. 2002. P. 195 p.

Received 11.03.2026.

Accepted 16.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.7:004.94

Dmytro Redchyts, Svitlana Moiseienko, Denys Adamenko,
Kateryna Kremneva, Oksana Akimenko

MATHEMATICAL MODELING FOR APPLICATIONS THE SELECTIVE LASER MELTING PROCESS IN 3D PRINTING

Abstract. *This paper provides an overview of the physical processes occurring during selective laser melting of metal powders, as well as an overview of methods for mathematically modeling these processes. The key physical processes that must be taken into account for an adequate modeling of selective laser melting of metal powders are identified. A general physical and mathematical model is formulated to solve the problem of selective laser melting of metal powders. The assumptions and constraints adopted for the formulated physical model are presented. The governing equations describing heat transfer processes, liquid metal dynamics, and the shape of the free surface are considered. The initial and boundary conditions are presented. Taking into account the requirements for mathematical models, a numerical algorithm for solving the governing equations has been developed, based on a three-layer implicit scheme with second-order accuracy in time integration, third-order counter-current approximation of convective terms, and second-order central difference approximation of diffusion terms. The pressure and velocity fields in the Navier-Stokes equations were coupled using the artificial compressibility method, modified for the calculation of unsteady problems. The system of initial equations was numerically integrated using the finite volume method. The system of linear algebraic equations of the implicit scheme was solved using the well-known generalized misfit minimization (GMRES) method with an incomplete LU decomposition of the total system matrix as preconditioning.*

Numerical simulations of the transient processes of selective laser melting of metal powders have yielded a temperature field distribution in the computational domain, highlighting the liquidus zone. Dependences of the width and depth of the molten pool on the laser velocity and the laser spot diameter have been plotted.

Keywords: *Mathematical modeling, additive technologies, 3D printing, selective laser melting (SLM), laser powder bed fusion (LPBF), computational fluid dynamics.*

Редчиць Дмитро Олександрович - д.ф.-м.н., професор, директор Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України; провідний науковий співробітник Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України; професор кафедри математичного моделювання та системного аналізу Дніпровського державного технічного університету, E-mail: redchits_da@ua.fm, ORCID: 0000-0001-8538-6026.

Моїсеєнко Світлана Вікторівна - к.т.н, доцент, завідувачка кафедри інформатики і комп'ютерних наук Херсонського національного технічного університету; старший науковий співробітник Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України, E-mail: 4moiseenko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5802-3887.

Адаменко Денис Сергійович - к.т.н, доцент, старший науковий співробітник Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України, E-mail: adamenko.denys@ukr.net, ORCID: 0009-0009-9635-7867.

Кремнева Катерина Володимирівна - к.т.н, старший науковий співробітник Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України, E-mail: kremneva.kateryna@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1807-3390.

Акіменко Оксана Володимирівна - провідний інженер Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України; молодший науковий співробітник Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України, E-mail: samsonova@ua.fm, ORCID: 0000-0002-4562-4795.

Redchyts Dmytro - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; Leading Researcher of Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine; Professor of the Department of Mathematical Modelling and System Analysis of the Dniprovsky State Technical University, E-mail: redchits_da@ua.fm, ORCID: 0000-0001-8538-6026.

Moiseienko Svitlana - Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer; Senior Researcher of Institute of

Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, E-mail: 4moiseenko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5802-3887.

Adamenko Denys - Candidate of technical sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, E-mail: adamenko.denys@ukr.net, ORCID: 0009-0009-9635-7867.

Kremneva Kateryna - Candidate of technical sciences, Senior Researcher of Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, E-mail: kremneva.kateryna@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1807-3390.

Akimenko Oksana - Leading Engineer of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; Junior Researcher of Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, E-mail: samsonova@ua.fm, ORCID: 0000-0002-4562-4795.

ВПРОВАДЖЕННЯ RFID-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ У РІТЕЙЛІ: ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ СОРТУВАННЯ

Анотація. Досліджено проблематику інтеграції систем радіочастотної ідентифікації УВЧ-діапазону в апаратно-програмні комплекси високошвидкісних конвеєрних ліній рітейл-складів. Теоретично обґрунтовано архітектурні рішення для мінімізації впливу багатопроменевого поширення радіохвиль та доплерівського зсуву частоти на ймовірність зчитування пасивних міток у динаміці. Валідацію запропонованої гібридної математичної моделі обробки колізій, яка поєднує детерміновану сегментацію префіксного дерева (Query Tree) зі стохастичним алгоритмом DFSA стандарту EPCglobal Gen2, здійснено шляхом розробки комплексного цифрового двійника в середовищі MATLAB Simulink. Імітаційне моделювання довело здатність архітектури досягати розрахункового показника надійності ідентифікації 99.2% за лінійної швидкості конвеєра 3.0 м/с. Віртуалізовано архітектуру розподіленого проміжного програмного забезпечення (Middleware) на базі парадигми периферійних обчислень (Edge Computing) для просторово-часової фільтрації сирих радіочастотних даних та локального кешування таблиць маршрутизації. Результати стохастичної симуляції підтверджують, що трансляція агрегованих масивів у формат Application Level Events із подальшою асинхронною передачею через інтерфейси EPCIS до Warehouse Management System знижує системну затримку до 42 мс. Загальна розрахункова пропускна здатність оптимізованого комплексу в імітаційному середовищі становить 10710 оброблених одиниць за годину із часткою алгоритмічних помилок сортування менше 0.08%.

Ключові слова: RFID, автоматизована лінія сортування, цифровий двійник, імітаційне моделювання, MATLAB Simulink, алгоритми антиколізії, периферійні обчислення, WMS.

Постановка проблеми. Сучасні логістичні комплекси та рітейл-склади стикаються з критичними обмеженнями пропускної здатності, які безпосередньо зумовлені фізичними та технологічними бар'єрами

традиційних оптичних систем ідентифікації. Необхідність прямої видимості штрих-кодів унеможливорює масове паралельне сканування товарів, що стає «вузьким місцем» в умовах інтенсифікації вантажопотоків. Хоча впровадження технології радіочастотної ідентифікації (*RFID*) потенційно вирішує цю проблему, динамічний збір даних на високошвидкісних конвеєрних лініях супроводжується низкою складних фізико-технічних викликів. Зокрема, під час переміщення маркованих об'єктів через портали зчитування виникають інтенсивні електромагнітні перешкоди, ефекти екранування сигналу металовмісними вантажами та елементами конструкцій, а також фундаментальна проблема радіочастотних колізій під час спроб одночасного зчитування великого масиву міток в умовах жорстких часових обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систематизація існуючих наукових підходів до інтеграції *RFID* у логістичні процеси демонструє значну увагу дослідників до розбудови базових архітектурних рішень для складського середовища та концепцій *IoT*-інтеграцій. Проте критичний аналіз опрацьованих джерел засвідчує, що більшість наявних рішень фокусується на статичних умовах інвентаризації або низькошвидкісних процесах. Класичні алгоритми антиколізії виявляють суттєво обмежену ефективність і тривалий час збіжності в умовах щільного, безперервного потоку об'єктів на автоматизованих лініях сортування. Це призводить до деградації показника успішного зчитування (*Read Rate*) та неможливості гарантувати цілісність даних при високих лінійних швидкостях конвеєра.

Мета дослідження. З огляду на виявлені технологічні прогалини, метою даного дослідження є розробка та комплексна оптимізація апаратно-програмної моделі інтеграції технології *RFID* спеціально для високошвидкісних автоматизованих ліній сортування. Дослідження спрямоване на створення архітектури, яка дозволить алгоритмічно мінімізувати втрати даних при масовому скануванні об'єктів у русі, а також забезпечить безшовну, низькозатримочну синхронізацію агрегованих потоків подій із системами управління складом (*Warehouse Management System — WMS*) сучасних рітейл-підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проектування апаратно-програмних комплексів динамічної ідентифікації об'єктів на

автоматизованих лініях сортування базується на розгортанні просторово-розподілених антенних систем УВЧ-діапазону (860–960 МГц). Враховуючи високу щільність потоку товарних одиниць у сучасних рітейл-складах, архітектура фізичного рівня вимагає застосування високопродуктивних зчитувачів з апаратною підтримкою стандарту *EPCglobal UHF Class 1 Gen 2* (ISO/IEC 18000-63) [3, 5]. Інтеграція таких радіочастотних систем у конвеєрні вузли передбачає встановлення порталних конструкцій, де просторове рознесення антен формує суцільну об'ємну зону опитування. Для мінімізації сліпих зон доцільно використовувати антени з круговою поляризацією, що нівелює залежність коефіцієнта зчитування (*Read Rate*) від випадкової просторової орієнтації диполя *RFID*-мітки на об'єкті сортування [1]. Застосування кругової поляризації супроводжується втратою 3 дБ посилення порівняно з лінійною, що компенсується підвищенням потужності передавача до максимально дозволених нормативними актами 2 Вт *ERP* або застосуванням спрямованих антенних решіток із фазованим управлінням променем.

Функціонування радіочастотного тракту в умовах логістичної інфраструктури критично ускладнюється явищами багатопроменевого поширення радіохвиль. Металеві конструкції стелажів, роликові напрямні конвеєрів та екрануючі властивості самих товарів (зокрема, рідин та металізованих упаковок, типових для *FMCG*-рітейлу) генерують складну інтерференційну картину [4, 7]. У зонах конструктивної та деструктивної інтерференції виникають глибокі просторові флуктуації напруженості електромагнітного поля, що різко знижує ймовірність успішного енергозабезпечення пасивних міток. Рівень потужності сигналу зворотного розсіювання (*Backscatter modulation*), що надходить на вхід приймача зчитувача, математично описується розширеним рівнянням радіолокації:

$$P_{rx} = P_{tx} G_{tx} G_{rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^4 \sigma \eta_{tag} \chi \quad (1)$$

де P_{rx} — потужність вихідного тракту передавача, G_{tx} та G_{rx} — коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно, λ — довжина хвилі несучої частоти, d — радіальна відстань до мітки, σ — ефективна площа розсіювання антени мітки, η_{tag} — коефіцієнт ефективності модуляції чипа, χ — сумарний коефіцієнт втрат на поляризацію та узгодження імпедансів [6, 10].

Для стабілізації енергетичного потенціалу радіохвилі в умовах динамічного зчитування реалізуються алгоритми просторового (*Spatial Diversity*) та частотного (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) рознесення, що дозволяє декорелювати глибокі завмирання сигналу в багатопроменевому середовищі.

Висока швидкість переміщення маркованих вантажів на автоматизованих лініях сортування (яка нерідко перевищує 2.5–3 м/с) індукує доплерівський зсув частоти відбитого сигналу, що вимагає жорсткої апаратної компенсації на рівні цифрового сигнального процесора (*DSP*) приймача. Зміна частоти f_d обчислюється як:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (2)$$

де v — вектор лінійної швидкості об'єкта на конвеєрі, θ — просторовий кут між вектором швидкості та головною пелюсткою діаграми направленості антени [9].

Зміщення несучої частоти підканалів ініціює деградацію відношення сигнал/шум (*SNR*) та нелінійне зростання коефіцієнта бітових помилок (*BER*) під час демодуляції сигналу з кодуванням *FM0* або *Miller*. Відповідно, апаратна архітектура зчитувача повинна включати модулі фазового автопідлаштування частоти (*PLL*) з розширеною смугою захоплення та швидкодіючі адаптивні цифрові фільтри для придушення спектрального витоку в суміжні радіоканали в режимі щільного опитування (*Dense Reader Mode*).

Первинна обробка масивів радіочастотних даних (*Edge Processing*) імплементується безпосередньо на рівні вбудованого програмного забезпечення мікроконтролерів *RFID*-порталів задля розвантаження локальної мережевої інфраструктури та центрального ядра *WMS* (*Warehouse Management System*). Потік сирих гексадецимальних даних генерує значний обсяг дублікатів та хибних спрацьовувань (*Cross-reads*), які провокуються паразитним зчитуванням міток із суміжних конвеєрних ліній [2, 8]. Для локалізації об'єкта строго в межах цільової зони роботи механічних дивертерів застосовується багатокритеріальний аналіз вектора параметрів: рівня потужності зворотного сигналу (*RSSI*), фазового кута (*Phase Angle*) та апаратної мітки часу (*Timestamp*). Аналіз динаміки зміни *RSSI* дозволяє з високою точністю апроксимувати

траєкторію руху мітки через робочу зону: графік значень *RSSI* формує характерну криву Гаусса, локальний екстремум якої відповідає моменту проходження об'єкта на мінімальній ортогональній відстані від випромінювача.

Математичний апарат фільтрації сирих даних на рівні проміжного програмного забезпечення (*Middleware*) залучає нелінійні фільтри Калмана для згладжування високочастотних флуктуацій *RSSI*, спричинених тепловим шумом радіотракту та перевідбиттями. Розрахунок першої похідної від згладженої функції *RSSI* надає можливість з мілісекундною точністю фіксувати момент перетину оптичної осі антени, що виступає логічним тригером для синхронізації *RFID*-події з роботою сортувальних механізмів конвеєра. На апаратному рівні ця синхронізація безшовно забезпечується через ізольовані інтерфейси загального призначення (*GPIO*), які інтегрують *RFID*-контролер безпосередньо з програмованими логічними контролерами (*PLC*) лінії [5, 9]. Сигнали від фотоелектричних датчиків наявності об'єкта надходять на вхідні порти зчитувача, ініціюючи сеанс інвентаризації виключно в момент фізичного перебування вантажу в зоні зчитування, що оптимізує радіоефірне навантаження. Згенерований масив валідованих даних інкапсулюється у структуровані формати згідно зі стандартом *Application Level Events (ALE)*, де відбувається трансляція фізичних ідентифікаторів *EPC* у транзакційний бізнес-контекст для подальшої маршрутизації до баз даних рітейл-складу.

Забезпечення цілісності збору даних у логістичних вузлах рітейл-складів ускладнюється явищем радіочастотних колізій, які виникають під час одночасної відповіді множини пасивних *RFID*-міток на широкомовний запит зчитувача. В умовах автоматизованих ліній сортування, де щільність потоку може досягати кількох сотень промаркованих об'єктів у зоні опитування одночасно (наприклад, при проходженні змішаних палет), колізії на рівні управління доступом до середовища (*MAC*) стають критичним фактором деградації пропускної здатності системи. У стандарті *EPCglobal UHF Class 1 Gen 2* реалізовано стохастичний алгоритм антиколізії на базі динамічного кадрування — *Dynamic Framed Slotted ALOHA (DFSA)* [3, 6]. Фізичний рівень цього алгоритму полягає у розбитті часу опитування на дискретні слоти, що формують кадр (*Frame*), розмір якого визначається параметром *Q*.

Згідно з протоколом, зчитувач ініціює сеанс інвентаризації командою *Query*, що містить цілочисельний параметр $Q \in [0, 15]$. Кожна ідентифікаційна мітка, яка потрапляє в електромагнітне поле антени порталу і отримує достатньо енергії для активації чипа, генерує псевдовипадкове число r у діапазоні від 0 до $2^Q - 1$.

Це число визначає порядковий номер слота в поточному кадрі, у якому мітка здійснюватиме модуляцію зворотного розсіювання (*Backscatter*) свого унікального ідентифікатора *EPC*. Якщо кількість міток у зоні дії (популяція N) суттєво перевищує кількість доступних слотів $L = 2^Q$, імовірність того, що дві або більше міток оберуть однаковий слот, експоненційно зростає, призводячи до деструктивної інтерференції та втрати пакетів даних [4, 9].

Математична модель процесу ідентифікації в алгоритмі *DFSA* спирається на біноміальний розподіл. Імовірність того, що конкретний слот міститиме рівно k відповідей від загальної кількості N міток при розмірі кадру L , обчислюється за формулою:

$$P(k) = \binom{N}{k} \left(\frac{1}{L}\right)^k \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-k} \quad (3)$$

Відповідно, стан кожного часового слота класифікується на три взаємовиключні події: порожній слот ($k = 0$), успішне зчитування ($k = 1$) та колізія ($k \geq 2$). Імовірності цих подій формалізуються системою рівнянь:

$$P_{empty} = \left(1 - \frac{1}{L}\right)^N \quad (4)$$

$$P_{success} = \frac{N}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-1} \quad (5)$$

$$P_{collision} = 1 - P_{empty} - P_{success} \quad (6)$$

Максимізація функції пропускну здатності $P_{success}$ досягається за умови жорсткої рівності кількості слотів у кадрі до кількості незчитаних міток ($L = N$). У цій точці екстремуму теоретична межа ефективності алгоритму *ALOHA* становить $1/e \approx 36.8\%$ [7, 10]. Для високошвидкісних конвеєрів рітейлу така ефективність є недостатньою, оскільки час перебування вантажу в робочій зоні антени обмежений частками секунди, що вимагає динамічної адаптації розміру кадру в реальному часі.

Для вирішення проблеми оптимізації параметра Q в умовах невідомої та постійно змінної популяції міток N на сортувальній лінії, розроблено та імплементовано адаптивні алгоритми оцінювання. На рівні цифрового сигнального процесора зчитувача реалізується евристичний Q -алгоритм, який безперервно коригує розмір кадру на основі зворотного зв'язку від стану попередніх слотів. Якщо приймальний тракт фіксує послідовність колізій, значення Q інкрементується, розширюючи кадр; у випадку надлишку порожніх слотів — декрементується. Класична реалізація цього механізму описується таким псевдокодом:

```
Plaintext
// Псевдокод евристичного алгоритму адаптації параметра Q
float Q = Q_initial;
float c = 0.1; // Коефіцієнт кроку адаптації
int L = pow(2, round(Q));
Transmit_Command("Query", round(Q));
while (Inventory_Round_Active) {
    Slot_State = Receive_and_Demodulate();

    if (Slot_State == COLLISION) {
        Q = min(15.0, Q + c);
    } else if (Slot_State == EMPTY) {
        Q = max(0.0, Q - c);
    } else if (Slot_State == SUCCESS) {
        Extract_EPC();
        Acknowledge_Tag();
    }
    if (round(Q) != log2(L)) {
        L = pow(2, round(Q));
        Transmit_Command("QueryAdjust", round(Q)); // Зміна розміру кадру
    } else {
        Transmit_Command("QueryRep"); // Перехід до наступного слота
    }
}
```

Однак для застосування у складській логістиці класичний Q -алгоритм має суттєвий недолік — тривалий час збіжності при різкому входженні великої групи маркованих товарів у зону опитування. Емпіричні дослідження доводять, що затримка конвергенції параметра Q до оптимального значення призводить

до втрати до 15% ідентифікаторів на швидкостях конвеєра понад 2 м/с [2, 8]. Для нівелювання цього ефекту пропонується гібридна архітектура антиколізії. Сутність гібридизації полягає у використанні детермінованих алгоритмів префіксного дерева (*Query Tree*) на початковому етапі інвентаризації для швидкої сегментації колізійного домена. Зчитувач транслює послідовність бітових префіксів, а мітки відповідають лише за умови повного збігу їхнього унікального ідентифікатора із заданим шаблоном.

Інтеграція алгоритмів класу *Query Tree* (QT) з механізмами *EPCglobal Gen2* дозволяє розділити загальну множину міток на палеті на менші, ізольовані підмножини ще до ініціалізації фази *ALOHA*. Застосування масок вибірки (*Select command*) за префіксами *GS1* (*Global Standards 1*), такими як ідентифікатор компанії-виробника або категорія товару, штучно обмежує параметр N для кожного окремого кадру L [5]. Це радикально зменшує дисперсію помилки оцінювання кількості об'єктів та дозволяє мікроконтролеру *RFID*-зчитувача встановлювати значення $Q_{initial}$, яке є асимптотично близьким до оптимального, мінімізуючи час перехідних процесів і гарантуючи зчитування понад 99.9% міток в умовах жорстких часових обмежень автоматизованої логістики.

Розгортання апаратної інфраструктури радіочастотної ідентифікації на високошвидкісних лініях сортування формує експоненційне зростання обсягів сирих радіочастотних даних, що генеруються на фізичному рівні. Безпосередня маршрутизація цього потоку до центрального ядра *Warehouse Management System* (WMS) неминуче призводить до критичного перевантаження локальної мережевої інфраструктури та деградації продуктивності транзакційних баз даних рітейл-складу [3, 5]. Відповідно, архітектурним імперативом є імплементація розподіленого проміжного програмного забезпечення (*RFID Middleware*) та парадигми периферійних обчислень (*Edge Computing*). Програмний комплекс *Middleware* виступає абстракційним шаром, який інкапсулює низькорівневі протоколи взаємодії зі зчитувачами, зокрема *Low Level Reader Protocol* (LLRP), та забезпечує первинну агрегацію, семантичну фільтрацію і просторово-часову трансформацію гексадецимальних масивів даних безпосередньо у вузлах їх генерації. В умовах сучасного логістичного хабу, де конвеєрна стрічка обслуговує змішані потоки товарів (*Mixed SKU*),

периферійні контролери *Middleware* розгортаються на промислових серверах поблизу *RFID*-порталів, що радикально мінімізує мережеву затримку (*Latency*) при передачі апаратних тригерів на механічні сортувальні дивертери.

Фундаментальним завданням модуля проміжної обробки є просторово-часова фільтрація та дедуплікація надлишкових зчитувань. У зоні дії інтенсивного електромагнітного поля порталу одна пасивна мітка може бути успішно ідентифікована мікроконтролером зчитувача від десятків до кількох сотень разів протягом мілісекундного вікна сканування, генеруючи масив ідентичних подій з різними апаратними мітками часу та флуктуативними показниками рівня потужності (*RSSI*) [2, 9]. Для оптимізації цього процесу на програмному рівні застосовуються алгоритми ковзного вікна (*Sliding Window*) з адаптивним розміром. Математично процес фільтрації описується через функцію щільності ймовірності перебування мітки в логічній зоні зчитування. Якщо T_{read} — множина часових міток успішних зчитувань унікального ідентифікатора EPC_i , то подію валідної присутності об'єкта в зоні Z можна достовірно зафіксувати, лише якщо щільність зчитувань у заданому часовому вікні Δt перевищує емпірично встановлений поріг $Th_{density}$:

$$\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^M \delta(t_j \in [t, t + \Delta t]) > Th_{density} \quad (7)$$

де M — загальна кількість зчитувань мітки EPC_i , а δ — індикаторна функція Кронекера.

Цей математичний апарат дозволяє *Middleware* зі стовідсотковою ймовірністю відсікати паразитні зчитування (*Cross-reads*) із суміжних ліній конвеєра, які характеризуються низькою щільністю, високою дисперсією фазового кута та слабким енергетичним потенціалом [7, 10].

Трансформація відфільтрованих наборів ідентифікаторів у високорівневі бізнес-події регламентується архітектурним стандартом *Application Level Events* (*ALE*), специфікованим міжнародним консорціумом *GS1*. Двигун *ALE* дозволяє клієнтським додаткам, тобто інтерфейсним модулям *WMS*, декларувати асинхронну підписку на специфічні логістичні події через механізм *Event Cycle Specification* (*ECSpec*). На рівні ліній сортування конфігурація *ECSpec* забезпечує жорстку прив'язку фізичних антенних порталів до логічних зон (наприклад, «Вузол автоматичного приймання» або «Сортувальний рукав №4»). Процесор

ALE агрегує радіочастотні дані протягом строго визначеного робочого циклу, тривалість якого апаратно синхронізується з тактовою швидкістю конвеєра та перериваннями від програмованих логічних контролерів (*PLC*), що отримують сигнали від оптичних бар'єрів позиціонування вантажу [4, 6]. Результуючий звіт *ALE* містить виключно оптимізований масив *EPC*-ідентифікаторів, статус яких змінився відносно попереднього циклу, позбавляючи *WMS* необхідності аналізувати статичні об'єкти в полі зчитувача.

Наступним етапом глибокої інтеграції є трансляція згенерованих *ALE*-звітів у глобальний контекст управління ланцюгом постачань із використанням протоколу *Electronic Product Code Information Services (EPCIS)*. Інтерфейси *EPCIS* забезпечують стандартизований репозиторій, структуруючи кожну транзакційну подію за чотирма інформаційними вимірами: ідентифікатор об'єкта, глобальний номер локації *GLN*, точна мітка часу та бізнес-крок (наприклад, інспектування чи відвантаження). Інтеграція з ядром *WMS* ритейл-оператора реалізується через асинхронні брокери повідомлень кластерного типу, такі як *Apache Kafka* або *RabbitMQ*, що гарантують високу пропускну здатність (*Throughput*) та реалізують семантику доставки *Exactly-Once* [1, 8]. Приклад структури корисного навантаження (*Payload*) події ідентифікації на сортувальній лінії у форматі *JSON-LD* формується наступним чином:

```
JSON
{
  "@context": "https://ref.gs1.org/standards/epcis/2.0.0/epcis-context.jsonld",
  "type": "ObjectEvent",
  "eventTime": "2026-03-11T18:29:53.000Z",
  "eventTimeZoneOffset": "+02:00",
  "epcList": ["urn:epc:id:sgtin:0614141.107346.2026"],
  "action": "OBSERVE",
  "bizStep": "urn:epcglobal:cbv:bizstep:inspecting",
  "readPoint": {"id": "urn:epc:id:sgln:0614141.00777.0"}
}
```

Забезпечення жорстких обмежень реального часу (*Real-Time Constraints*) на високошвидкісних лініях вимагає абсолютної мінімізації затримок між моментом зчитування *RFID*-мітки та активацією пневматичного виконавчого механізму сортування. Середній час затримки в черзі брокера повідомлень при

передачі даних до *WMS* апроксимується класичною моделлю масового обслуговування $M/M/1$:

$$W = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (8)$$

де λ — інтенсивність надходження згенерованих *ALE*-звітів, μ — інтенсивність їх обробки ядром бази даних *WMS* [3].

Якщо алгоритм прийняття рішення щодо напрямку маршрутизації потребує синхронного запиту до центральної БД, загальна мережева затримка (*Round-Trip Time*) може перевищити фізично доступне вікно часу доходження пакунка до дивертера, що неминуче призведе до помилки сортування. Для усунення цього архітектурного вузького місця *Middleware* доповнюється модулями *In-Memory Data Grid (IMDG)*, які локально кешують таблиці маршрутизації *WMS*. Завдяки цьому проміжне програмне забезпечення здатне автономно, з мілісекундною затримкою, визначати цільовий рукав сортування на основі декодованого префікса *EPC* та негайно надсилати керівний сигнал на *PLC* через промислові протоколи *Modbus TCP* або *PROFINET*. У свою чергу, фінальна синхронізація транзакцій з базою даних *WMS* відбувається у фоновому асинхронному режимі, гарантуючи детерміновану роботу конвеєра незалежно від поточного пікового навантаження на сервери управління складом [5, 9].

Валідація розробленої апаратно-програмної архітектури динамічної ідентифікації здійснювалася шляхом створення комплексного цифрового двійника (*Digital Twin*) у програмному середовищі *MATLAB Simulink*. Замість натурних випробувань, які мають обмежену репрезентативність в умовах стохастичних електромагнітних перешкод логістичного хабу, було розроблено багаторівневу імітаційну модель, що інтегрує кінематику високошвидкісного конвеєра, електродинаміку радіочастотного тракту та логіку мережевої взаємодії з *WMS*. Фізичний рівень системи УВЧ-діапазону моделювався з використанням спеціалізованих інструментаріїв для обчислювальної електродинаміки, що дозволило відтворити діаграми направленості чотирьох патч-антен із правосторонньою круговою поляризацією (*RHCP*) та коефіцієнтом підсилення 8.5 *dBic*. Генерація та демодуляція радіосигналів симулювалася на основі точних апаратних специфікацій трансивера чипсета

Impinj R2000, налаштованого на режим *Dense Reader Mode* із вихідною потужністю тракту 30 дБм. Поведінка пасивних дипольних міток формату ALN-9654 (*Alien Technology*), розміщених на віртуальних картонних коробах стандарту *FEFCO 0201*, відтворювалася через блоки стохастичного моделювання модуляції зворотного розсіювання з урахуванням багатопроменевих завмирань каналу зв'язку. Кінематична підсистема цифрового двійника забезпечувала генерацію вектора лінійної швидкості переміщення вантажів v_c у діапазоні від 0.5 до 3.5 м/с (рис. 1).

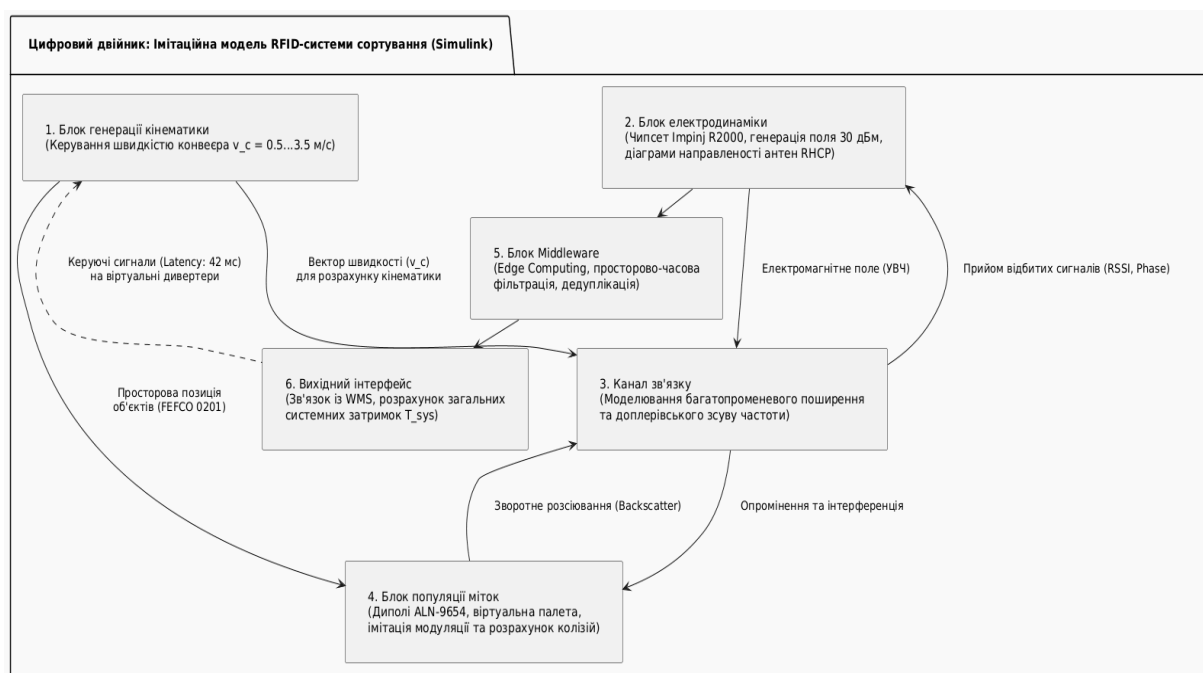


Рисунок 1 - Структурна схема імітаційної моделі апаратно-програмного комплексу в середовищі MATLAB Simulink

Для оцінки динаміки зчитування та верифікації розроблених алгоритмів фільтрації сирих даних застосовувався метод Монте-Карло, що надало можливість з високою точністю апроксимувати просторово-часовий розподіл радіочастотного поля. Емпіричний показник надійності ідентифікації (Read Rate), трансформований у контекст результатів імітаційного моделювання, обчислювався як математичне сподівання відношення успішно розпізнаних унікальних ідентифікаторів ЕРС до загальної популяції міток у тестовій вибірці за результатами серії симуляційних прогонів:

$$RR_{emp} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{N_{success}(i, v_c)}{N_{total}(i)} \right) \quad (9)$$

де K — загальна кількість ітерацій моделювання для заданої швидкості v_c , $N_{success}$ — обсяг коректно декодованих ідентифікаторів без порушення цілісності полінома циклового надлишкового коду (CRC-16), N_{total} — еталонна кількість міток на віртуальній палеті.

Порівняльний аналіз ефективності в середовищі *Simulink* підтвердив, що за лінійної швидкості віртуального конвеєра до 1.5 м/с базовий алгоритм антиколізії *DFSA* та запропонована гібридна модель демонструють асимптотично близькі показники на рівні 99.8%. Збільшення кінематичної швидкості до критичної позначки 3.0 м/с ініціювало в моделі експоненційну деградацію показника RR_{emp} для стандарту *EPC Gen2* до 84.3%. Імітація інтеграції розробленої гібридної архітектури, що використовує префіксне дерево (*Query Tree*), дозволила утримати рівень успішного зчитування на позначці 99.2% за рахунок попередньої детермінованої сегментації колізійного домена в цифровому двійнику системи (рис. 2).

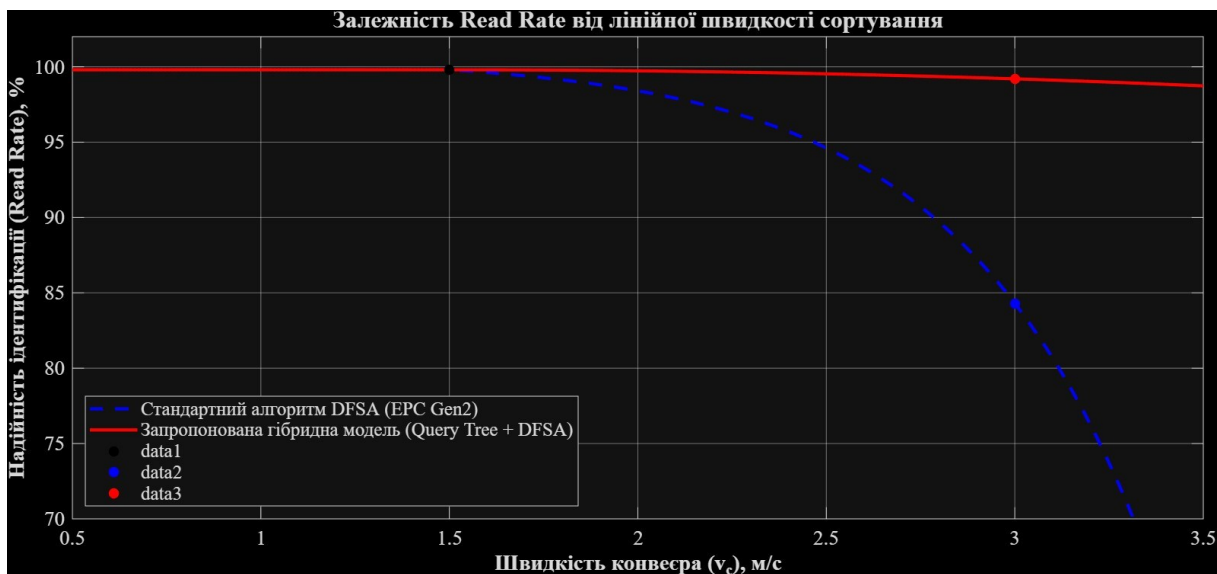


Рисунок 2 - Залежність емпіричного показника надійності ідентифікації (RR_{emp}) від лінійної швидкості конвеєра (v_c)

Наступним етапом моделювання стала квантифікація мережевих затримок (*Latency*) та загальної пропускної здатності (*Throughput*) під час

інформаційного обміну з ядром *WMS*. Сумарний час затримки в симульованій системі T_{sys} описувався лінійним рівнянням:

$$T_{sys} = T_{rf} + T_{edge} + T_{net} + T_{wms} \quad (10)$$

де T_{rf} — час радіочастотної транзакції разом з обробкою колізій, T_{edge} — час агрегації та дедуплікації даних на рівні проміжного програмного забезпечення (*Middleware*), T_{net} — затримка транспортування пакетів у локальній мережі, T_{wms} — час виконання *SQL*-транзакції маршрутизації в базі даних [2, 10].

Симуляція прямої трансляції сирих *ALE*-подій до центральної бази даних без використання периферійних обчислень генерувала пікові значення T_{sys} , які перевищували 450 мс. При кінематиці конвеєра 3.0 м/с це математично призводило до просторового зсуву об'єкта на 1.35 метра, що в топології логістичної моделі означало гарантований пропуск пневматичного сортувального рукава, розміщеного на дистанції 1 метра від порталу. Введення в імітаційну модель програмних блоків *Edge Computing* із локальним *In-Memory* кешуванням таблиць маршрутизації редукувало медіанне значення T_{sys} до 42 мс. Пропускна здатність модернізованої системи Th_{sys} розраховувалася з урахуванням заданих кінематичних габаритів:

$$Th_{sys} = \left(\frac{v_c \cdot 3600}{l_{obj} + d_{min}} \right) \cdot RR_{emp} \cdot (1 - P_{mech\_fail}) \quad (11)$$

де l_{obj} — середня довжина маркованого об'єкта вздовж осі конвеєра, P_{mech_fail} — імовірність апаратної відмови сортувального механізму.

При фіксованих параметрах імітаційної моделі $l_{obj} = 0.4$ м та $d_{min} = 0.6$ м віртуальний апаратно-програмний комплекс продемонстрував розрахункову стабільну пропускну здатність на рівні 10710 *UPH*. Частка алгоритмічних помилок сортування (*Mis-sort rate*) у серії імітаційних експериментів склала менше 0.08%, що доводить високу функціональну стійкість архітектури до граничних навантажень.

Висновки. Проведене дослідження формалізує та теоретично валідую комплексну апаратно-програмну архітектуру динамічної радіочастотної ідентифікації для високошвидкісних конвеєрних ліній сортування в інфраструктурі рітейл-складів. Вирішення фундаментальної проблеми

деградації пропускної здатності систем УВЧ-діапазону було підтверджено шляхом розробки високоточного цифрового двійника в середовищі *MATLAB Simulink*. Багатокритеріальне імітаційне моделювання довело, що імплементація просторово-часового рознесення антенних решіток у поєднанні з апаратною компенсацією фазових спотворень гарантує стабілізацію енергетичного потенціалу в умовах глибоких перевідбиттів. Запропонована гібридна модель антиколізії продемонструвала в симуляційному середовищі здатність ефективно нівелювати експоненційне зростання бітових помилок, забезпечивши розрахунковий показник надійності ідентифікації на рівні 99.2% при кінематичній швидкості конвеєра 3.0 м/с.

Теоретично обґрунтовано та підтверджено методами імітаційного моделювання, що визначальним фактором забезпечення детермінованої роботи сортувальної автоматики є розгортання розподіленого програмного забезпечення на базі парадигми периферійних обчислень (*Edge Computing*). Моделювання топології мережевої взаємодії довело, що локальне *In-Memory* кешування та просторово-часова дедуплікація даних ізолюють виконавчі механізми конвеєра від транзакційних затримок центрального ядра *WMS*, редукуючи загальний системний час відгуку до 42 мс.

Розрахункова пропускна здатність віртуального комплексу досягла 10710 оброблених товарних одиниць за годину із часткою алгоритмічних помилок сортування менше 0.08%. Отримані результати глибокого математичного та стохастичного моделювання формують надійне наукове підґрунтя для подальшого фізичного прототипування та промислового масштабування розробленої архітектури в екосистемах сучасних дистриб'юторських центрів.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Abdo K. W. Radio Frequency Identification (RFID) implementation in an IoT Smart Library. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 2024. Vol. 9, № 3. С. 28480. <https://doi.org/10.29333/jisem/14925>
2. Acube Infotech. Guide to Implementing RFID in Retail Inventory Management. Acube Infotech. URL: <https://acubeinfotech.sa/blogs/guide-to-implementing-rfid-in-retail-inventory-management/> (дата звернення: 11.03.2026).
3. GeeksforGeeks. Introduction of Radio Frequency Identification (RFID). GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/introduction-of-radio-frequency-identification-rfid/> (дата звернення: 11.03.2026).

4. Gomes H., Navio F., Gaspar P. D., Soares V. N. G. J., Caldeira J. M. L. P. Radio-Frequency Identification Traceability System Implementation in the Packaging Section of an Industrial Company. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 23. C. 12943. <https://doi.org/10.3390/app132312943>
5. Guerrero Gonzalez A., Pedreño Roca M. J., Ayala Bernal P. J. Study of RFID technology for Warehouse Traceability in the Company FRUMECAR. *Preprints*. 2024. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.2101.v1>
6. Lim M. K., Bahr W., Leung S. C. H. RFID in the warehouse: A literature analysis (1995–2010) of its applications, benefits, challenges and future trends. *International Journal of Production Economics*. 2013. Vol. 145, № 1. C. 409–430. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.006>
7. Liu J. RFID (Radio Frequency Identification) Localization and Application. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 13. C. 5932. <https://doi.org/10.3390/app14135932>
8. Sooksakun N., Sudsertsin S. The application of RFID in warehouse process: case study of consumer product manufacturer in Thailand. *LogForum*. 2014. Vol. 10, № 4. C. 423–431. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2014.4.7>
9. Turcu C. Development and implementation of RFID technology. *SciSpace*. 2009. <https://doi.org/10.5772/103>
10. Universidad Carlos III de Madrid. RFID Research Document. e-Archivo. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.77254>

Received 14.03.2026.

Accepted 17.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.942:621.396.67:658.78

Vladyslav Sementsov, Vitaliy Tsapar

IMPLEMENTATION OF RFID TECHNOLOGY FOR OBJECT IDENTIFICATION IN RETAIL: OPTIMIZATION OF AUTOMATED SORTING LINES

Abstract. *The problem of integrating UHF radio frequency identification systems into the hardware and software complexes of high-speed conveyor lines in retail warehouses is investigated. Architectural solutions to minimize the impact of multipath radio wave propagation and Doppler frequency shift on the probability of reading passive tags in dynamics are theoretically substantiated. The validation of the proposed hybrid mathematical model of collision processing, combining deterministic prefix tree segmentation (Query Tree) with the stochastic DFSA algorithm of the EPCglobal Gen2 standard, was carried out by developing a comprehensive digital twin in the MATLAB Simulink environment. Simulation modeling proved the architecture's ability to achieve an estimated identification reliability rate of 99.2% at a linear conveyor speed of 3.0 m/s. The architecture of distributed middleware based on the Edge Computing paradigm was virtualized for spatiotemporal filtration of raw radio frequency data and local caching of routing tables. Stochastic simulation results confirm that translating aggregated arrays into the Application Level Events format with subsequent asynchronous transmission via EPCIS interfaces to the Warehouse Management System reduces system latency to 42 ms.*

The overall estimated throughput of the optimized complex in the simulation environment is 10710 processed units per hour with an algorithmic mis-sort rate of less than 0.08%.

Keywords: *RFID, automated sorting line, digital twin, simulation modeling, MATLAB Simulink, anti-collision algorithms, Edge Computing, WMS.*

Семенцов Владислав Костянтинович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4402-8219>

Цапар Віталій Степанович – к.т.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>

Sementsov Vladyslav Kostyantynovych – Postgraduate Student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4402-8219>

Tsapar Vitaliy Stepanovych – Ph.D., Associate Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>

СПРОЩЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ІНТЕГРАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ НА ОСНОВІ НАСКРІЗНИХ ВИТРАТНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

Анотація. У роботі розглянуто можливість використання наскрізних витратних коефіцієнтів для спрощеного розрахунку енергетичних показників металургійної продукції в умовах багатостадійного виробництва. Показано, що традиційний прямий підхід не забезпечує належного врахування внутрішніх взаємозв'язків між технологічними переділами, матеріальними потоками та вторинними енергоресурсами, що обмежує його застосовність у прогнозних і порівняльних розрахунках. Запропоновано спрощений метод, у якому наскрізні витратні коефіцієнти використовуються як узагальнена розрахункова база для визначення інтегральних енергетичних показників продукції без побудови повної деталізованої моделі для кожного переділу. Показано, що такий підхід зберігає високу точність порівняно з повною розрахунковою схемою та водночас суттєво спрощує оцінку впливу змін у структурі виробництва, сортаменті продукції та технологічних параметрах. Додатково продемонстровано, що отримані енергетичні показники можуть бути використані для швидкого розрахунку супутніх показників, пов'язаних з енергоспоживанням, зокрема умовно-паливного еквівалента продукції, еквівалентних витрат первинної енергії та вуглецевої інтенсивності, на основі уніфікованих коефіцієнтів перерахунку. Запропонований метод може бути застосований при виробничому плануванні, технічному переозброєнні підприємств та оцінці ефективності енерго- і ресурсозберігаючих заходів.

Ключові слова: наскрізна енергоємність, наскрізні витратні коефіцієнти, інтегральні енергетичні показники, спрощений метод розрахунку, виробництво металопродукції, вуглецева інтенсивність

Постановка проблеми. Гірничо-металургійні процеси належать до багатостадійних технологічних систем, для яких характерні широка

номенклатура, марочний і розмірний склад товарної продукції, наявність циклів вироблення та споживання енергоносіїв власного виробництва, а також утворення вторинних енергоресурсів у вигляді доменного, коксового та конвертерного газів, пари котлів-утилізаторів і систем випарного охолодження, які споживаються в межах підприємства або частково передаються іншим підприємствам. Це ускладнює використання прямого методу розрахунку енергоемності виробництва металопродукції шляхом ділення обсягу спожитого палива на обсяг виробництва товарної продукції [1]. Не маючи надійного інструменту для точного визначення питомих і загальних витрат паливно-енергетичних ресурсів на виробництво металопродукції, неможливо коректно оцінити пов'язані з цим енергоспоживанням інтегральні енергетичні показники продукції, зокрема умовно-паливний еквівалент продукції, еквівалентні витрати первинної енергії, паливну складову сумарного енергоспоживання, а також вуглецеву інтенсивність. Додатковою складовою цієї проблеми є необхідність швидкої оцінки змін у технології виробництва та впровадження енерго- і ресурсозберігаючих заходів.

Таким чином, існує проблема точного і оперативного розрахунку показників енергоемності металопродукції та пов'язаних з ними інтегральних енергетичних показників у багатостадійному виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для коректних розрахунків енергоемності металопродукції та похідних від неї інтегральних енергетичних показників використовують відомий алгоритм визначення наскрізної енергоемності [1], що ґрунтується на балансуванні надходження і споживання всіх видів енергії, незалежно від форми чи способу її використання, а також на балансуванні матеріальних потоків, з яких формується товарна продукція.

Останні роботи з розвитку методології наскрізної енергоемності були пов'язані з визначенням загального споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на підприємствах гірничо-металургійного комплексу [2-4], визначенням питомих витрат ПЕР при виробництві конкретних видів металопродукції [5, 6], урахуванням технічного переозброєння підприємств гірничо-металургійного комплексу України [7, 8], комплексною оцінкою впливу різних енергозберігаючих технологій на загальну енергоемність виробництва [9, 10], нормуванням споживання ПЕР [11], а також розширенням

використання наскрізної енергоемності для оцінки викидів шкідливих речовин, парникових газів і твердих суспендованих частинок пилу [12-14].

Разом із перевагами існують і певні проблеми у застосуванні цього підходу. По-перше, його реалізація вимагає високої якості вихідних даних та злагодженої роботи бухгалтерії, енергетичних служб і технологів [8]. По-друге, складність процесів металургійного виробництва, а також велика кількість енергетичних потоків ускладнюють їх точний облік, особливо в умовах частих змін у структурі виробництва. По-третє, метод наскрізної енергоемності поки що не завжди інтегрується з міжнародними системами аналізу життєвого циклу, зокрема з LCA, що ускладнює його використання в задачах розрахунку похідних показників, у тому числі вуглецевого сліду продукції, а також у проєктах, орієнтованих на експорт або залучення міжнародних інвестицій.

Мета дослідження. Метою даної роботи є розвиток методу розрахунку інтегральних енергетичних показників металургійної продукції на основі методики наскрізної енергоемності шляхом узагальнення даних про енергоспоживання металургійних підприємств України, якій забезпечує достатню точність оперативного аналізу впливу змін технологічних і виробничих параметрів у багатостадійному виробництві.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Наскрізна заводська енергоемність i -го виду продукції визначається за формулою [1]:

$$d_{zi} = t_{zi} + K_{\text{е}} \cdot e_{zi} + K_{\text{г}} \cdot h_{zi} \quad (1)$$

де:

d_{zi} – наскрізна заводська енергоемність i -го виду продукції, кг у.п./н.о.;

t_{zi} – наскрізна питома витрата умовного палива, кг у.п./н.о.;

e_{zi} – наскрізна питома витрата покупної електроенергії, кг у.п./н.о.;

h_{zi} – наскрізна питома витрата теплоенергії, кг у.п./н.о.;

$K_{\text{е}}$ – калорійний еквівалент для перерахунку витрат електроенергії у витрати умовного палива, кг у.п./кВт·год;

$K_{\text{г}}$ – калорійний еквівалент для перерахунку витрат теплоенергії у витрати умовного палива, кг у.п./Мкал.

Для забезпечення порівнянності результатів між різними підприємствами та періодами часу прийнята стандартна величина калорійного еквівалента для електроенергії $K_{\text{е}} = 0,34$ кг у.п./кВт·год, що усуває вплив змінних факторів на

оцінку енергоємності продукції. Це особливо важливо, оскільки з роками витрати палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії змінювалися в межах 0,32–0,39 кг у.п./кВт·год.

Оцінку прямих викидів парникових газів, що пов’язані з використанням паливно-енергетичних ресурсів у промисловості, зазвичай виконують за такою моделлю:

$$E_c = \sum E_i + E_r \quad (2)$$

де:

E_c –емісія парникових газів на підприємстві в результаті власної виробничої діяльності, т CO₂;

E_i –емісії парникових газів при виробництві і-го виду продукції, т CO₂;

E_r –емісія парникових газів в результаті допоміжної діяльності підприємства, т CO₂.

Під допоміжною діяльністю розуміється виконання робіт або надання послуг (транспортних, ремонтних, управлінських тощо), обсяг яких не завжди відповідає обсягу основної продукції. Кількість утворюваних при цьому парникових газів є незначною (зазвичай не більше 1 %), тому її можна вважати умовно-постійною величиною.

Методологія розрахунку коефіцієнтів емісії для металургійних підприємств передбачає визначення кількості викидів CO₂ на одиницю продукції або спожитої енергії. Для цього використовується загальний принцип оцінки обсягу палива, що спалюється, та кількості вуглецю, який у ньому міститься. Базове рівняння для розрахунку емісії E_i для окремого процесу або виду палива виглядає так:

$$E_i = A \cdot C \cdot F \cdot (44/12) \quad (3)$$

де

E_i –емісія від і-го процесу або спалювання певного виду палива, т CO₂;

A –кількість використаного палива, т або м³;

C –масова частка вуглецю в паливі, частка від одиниці (безрозмірна величина);

F –коефіцієнт повного згоряння вуглецю, частка від одиниці (зазвичай близький до 1);

44/12 – коефіцієнт, що враховує співвідношення молекулярних мас CO_2 (44) та атомарного вуглецю (12).

Коефіцієнт емісії парникових газів e_i визначається відношенням кількості утвореного CO_2 E_i до обсягу виробленої продукції Q_i :

$$e_i = E_i / Q_i \quad (4)$$

Остаточна модель для оцінки загальної емісії парникових газів на підприємстві E_c включає розрахунки для кожного окремого процесу або виду палива, зведені у вигляді суми:

$$E_c = \sum (Q_i \cdot e_i) + E_r \quad (5)$$

Алгоритм розрахунку величини e_i для кожного виду продукції детально викладено в [13].

Згідно з моделлю (5), було здійснено розрахунок емісії парникових газів для різних видів продукції, що виробляються на заводі «А». Результати розрахунків наведені у вигляді графіків на Рис. 1 і Рис. 2.

Основними продуктами металургійного виробництва є агломерат, чавун, сталь, прокат (листовий та сортовий), заготовки, вапно, виливниці та пара ТЕЦ. Як видно з Рис. 2, основними джерелами емісії діоксиду вуглецю є виробництво чавуну та пари на ТЕЦ. Незважаючи на те, що пара ТЕЦ не є основним кінцевим продуктом металургійного виробництва, її виробництво вимагає значної кількості палива, що пояснює високий коефіцієнт емісії. Загалом, сумарні емісії від цих процесів складають значну частину загального обсягу викидів.

Недоліки моделі (5) полягають у відсутності взаємозв'язку між обсягом виробництва кожного виду продукції. Це не дозволяє прогнозувати емісію парникових газів при зміні сортаменту або обсягу виробництва кінцевої продукції навіть за умови незмінної технології на кожному переділі. Відповідно до моделі (5), можна прогнозувати зміну розмірів емісії тільки за рахунок зміни величини e_i , яка визначається головним чином питомими витратами палива на виробництво i -ї продукції (товарної або напівфабрикатів).

Обсяг виготовлення напівфабрикатів жорстко детермінований кількістю товарної продукції (в основному прокату) та витратними коефіцієнтами

напівфабрикатів на виготовлення наступної продукції. В умовах складної технологічної схеми взаємозалежність між виробництвом продукції та емісією парникових газів не враховується.

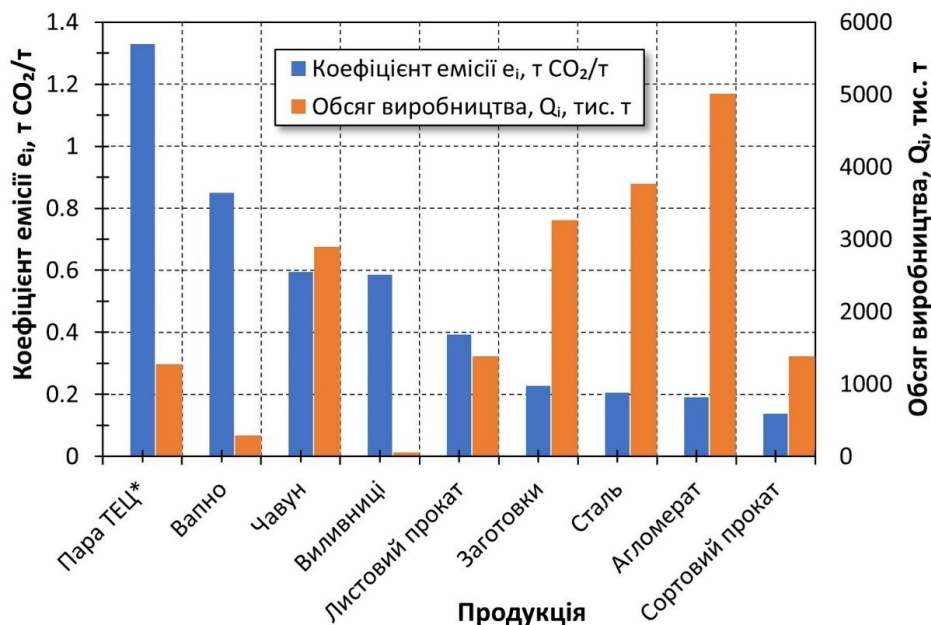


Рисунок 1 – Коефіцієнти емісії та обсяги виробництва для продукції заводу «А»

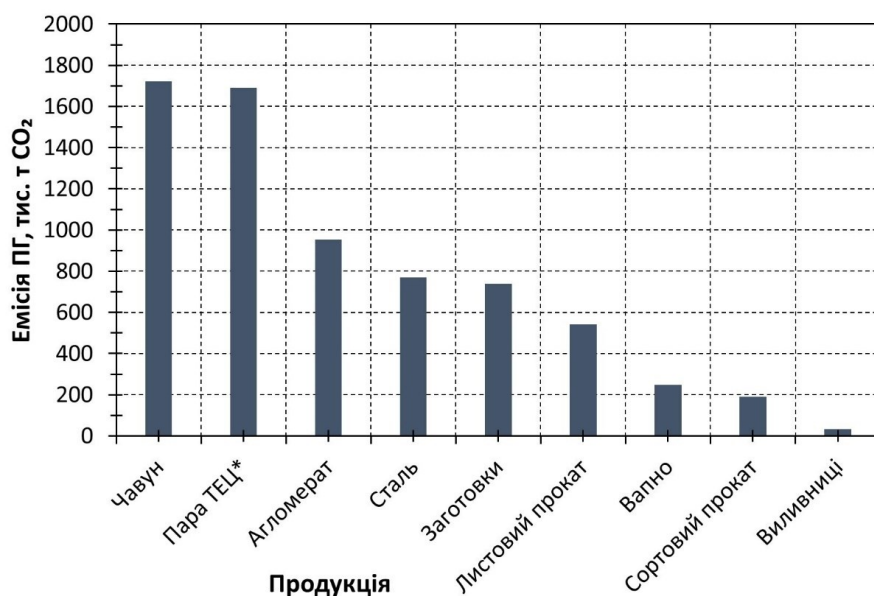


Рисунок 2 – Обсяги емісії парникових газів для продукції заводу «А»

Таким чином, отримані результати демонструють обмеженість використання моделі (5) для комплексного аналізу виробничих процесів з точки зору емісії парникових газів. Для підвищення точності прогнозування

необхідно враховувати взаємозв'язок між технологічними переділами та їх енергетичними витратами.

З урахуванням цього розроблено модель розрахунку емісії парникових газів, яка базується на принципах планування виробництва. У першу чергу прогнозується обсяг виробництва товарної продукції та її сортамент, після чого розраховується потреба в кожному виді напівфабрикату, змінному обладнанні та енергоресурсах на основі їх витратних коефіцієнтів на виготовлення продукції кожного переділу. Запропонована модель має вигляд:

$$E = \sum Q_{jt} \cdot \sum (q_{ci} \cdot e_i + q_{pi} \cdot e_p + v_p) \quad (6)$$

де:

E – загальна емісія парникових газів на підприємстві, т CO_2 ;

Q_{jt} – обсяг виробництва j -ї товарної продукції, т/рік;

q_{ci} , q_{pi} – наскрізний витратний коефіцієнт відповідно для кожного напівфабрикату та пари ТЕЦ на виробництво i -ї товарної продукції, т CO_2 /т або т CO_2 /Гкал;

e_p – коефіцієнт емісії парникових газів при виробництві пари ТЕЦ, т CO_2 /Гкал;

v_p – умовно-постійна величина емісії парникових газів при здійсненні іншої діяльності, т CO_2 /т.

Величина коефіцієнта емісії e_p визначається розрахунковим шляхом, виходячи з витрат умовного палива на виробництво пари на ТЕЦ та з урахуванням співвідношення різних видів палива, що використовуються на ТЕЦ. З врахуванням рекомендацій [15, 16], середні значення викидів діоксиду вуглецю на тону умовного палива для кожного газу:

- Для доменного газу – 6,747 т CO_2 .
- Для коксового газу – 1,243 т CO_2 .
- Для природного газу – 1,675 т CO_2 .

Таким чином, модель (6) може бути повністю ототожнена з моделлю (1) розрахунку наскрізної енергоемності товарної продукції на основі наскрізних витратних коефіцієнтів напівфабрикатів, де коефіцієнти емісії кожного виду продукції виконують роль цехової енергоемності. Це означає, що всі залежності заводської енергоемності продукції від технологічних параметрів

виробництва є аналогічними залежностям емісії парникових газів від тих самих параметрів.

На Рис. 3 та Рис. 4 представлені результати розрахунку емісії діоксиду вуглецю для заводу «А» у відповідності з моделлю (6). Розрахунки здійснено для періоду, в якому проводилася інвентаризація парникових газів.

Рис. 3 демонструє результати розрахунку емісії діоксиду вуглецю від різних напівфабрикатів для заводу «А» у виробництві чотирьох видів продукції: Листовий прокат, Сортовий прокат, Сляби та Чавун. Найбільший внесок у загальну емісію діоксиду вуглецю забезпечують чавун, пара ТЕЦ та агломерат. Ці напівфабрикати мають високі питомі показники викидів, що значно впливають на загальну емісію для всіх видів продукції. Найменший вплив мають виливниці та інші малозначні напівфабрикати.

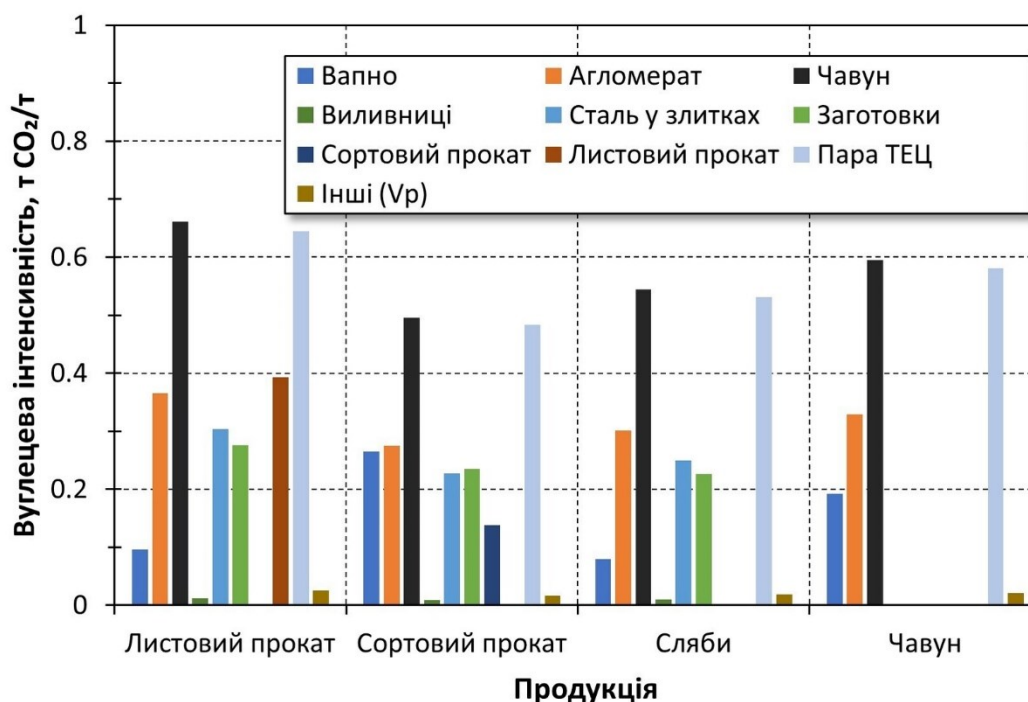


Рисунок 3 – Внесок напівфабрикатів в питомий вуглецевий слід продукції заводу «А» за моделлю (6)

На Рис. 4 показаний загальний ефект накопичення вуглецевої інтенсивності через всі стадії виробництва. Отримані значення можуть використовуватися для оцінки повного вуглецевого сліду кожного продукту або для порівняння ефективності різних технологічних процесів з точки зору

викидів парникових газів. Аналіз рисунка показує, що прокатна продукція є найбільш енергоємної з точки зору емісій парникових газів, оскільки вона включає в себе емісії усіх попередніх ділянок.

Проведений розрахунок показав, що виробництво однієї тони листового прокату на цьому заводі супроводжується викидом діоксиду вуглецю в атмосферу в обсязі 2,7766 т за методологією наскрізної енергоємності (модель 6) у порівнянні з 0,3928 т за методикою, що не враховує наскрізні переходи (модель 5, Рис. 1). Аналогічна ситуація спостерігається для сортового прокату: 2,1436 т CO₂/т за моделлю (6) проти 0,1379 т CO₂/т за моделлю (5).

Відповідно, різниця у значеннях для прокатної продукції значною мірою обумовлена тим, що модель (5) враховує лише поточні емісії для кожного переділу без накопичення емісій від попередніх етапів виробництва. Натомість модель (6) враховує усі наскрізні переходи, зокрема емісії, що виникають на стадіях виробництва чавуну, сталі, заготовок (слябів та блюмів) і їх подальшої обробки.

Порівняння для слябів також показує значну різницю між моделями. За моделлю (6) викиди складають 1,9595 т CO₂/т, тоді як за моделлю (5) вони відповідають заготовкам із значенням 0,2266 т CO₂/т. Для чавуну модель (5) дає значення 0,5952 т CO₂/т, тоді як модель (6) показує значно вищий коефіцієнт емісії 1,7177 т CO₂/т.

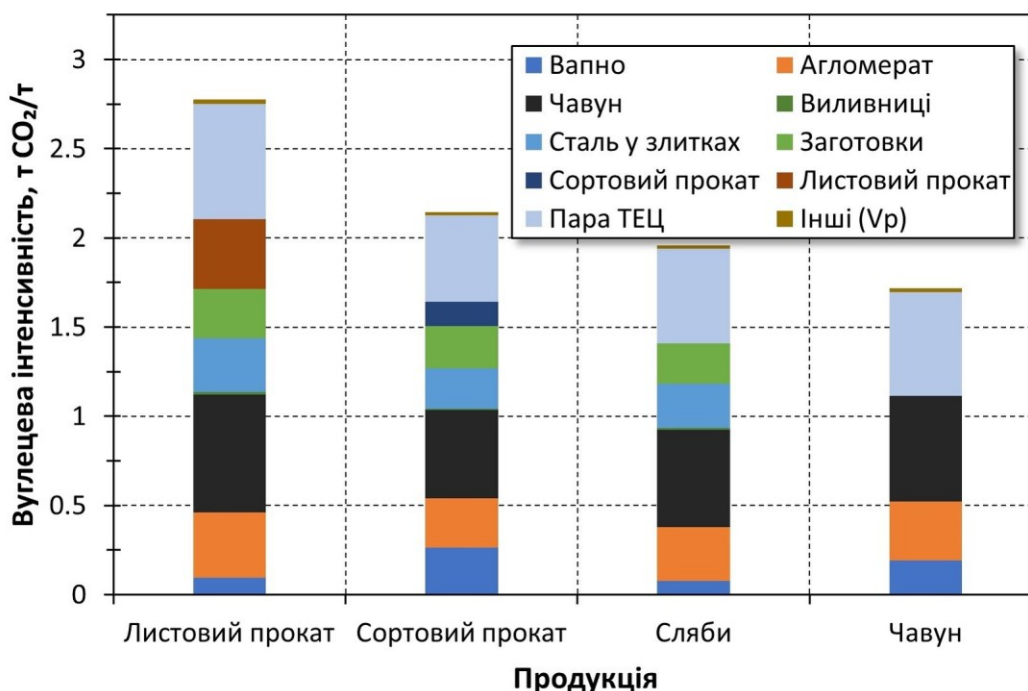


Рисунок 4 – Сумарна вуглецева інтенсивність для заводу «А» по продукції Листового прокату, Сортового прокату, Слябів та Чавуну

Використовуючи модель (6), значно простіше прогнозувати зміну емісії в цілому по підприємству при суттєвих змінах технологічних параметрів виробництва, особливо в тих випадках, коли вони спричиняють значне змінення наскрізного витратного коефіцієнта чавуну на виробництво товарної продукції.

Найпоширенішою методикою оцінювання вуглецевого сліду продукції є LCA (Life Cycle Assessment), яка аналізує весь життєвий цикл – від видобутку ресурсів до утилізації – через підсумовування прямих викидів парникових газів від енергоносіїв. Обмежений LCA застосовується в межах підприємства для порівняння процесів чи оптимізації енергоспоживання, базуючись на прямих витратах без взаємозв'язків між ділянками. Стандарт ISO 14044 рекомендує розширення системи для співпродуктів (напр., пар), але через складність припущень і даних на практиці переважає простий обмежений LCA з фіксованими коефіцієнтами.

Метод LCA передбачає прямий розрахунок питомого вуглецевого сліду за такими формулами:

Цехова продукція:

$$C_{iLCA} = (e_{ci} \times q_r) \times 0,5 + t_{ci} \times 2,5 \quad (7)$$

де

e_{ci} – цехова витрата електроенергії (кВт·год/т),

t_{ci} – цехова витрата умовного палива (кг/т),

q_r – прямий витратний коефіцієнт, що визначає, скільки одиниць енергоносія або продукції витрачається на виробництво одиниці напівфабрикату.

Коефіцієнти 0,5 та 2,5 є прийнятими середньостатистичними значеннями, що характеризують викиди CO₂ від споживання електроенергії та умовного палива відповідно.

Для визначення величини питомого вуглецевого сліду на рівні підприємства всі цехові значення повинні складатися:

$$C_{zLCA} = \Sigma ((e_{ci} \times q_r) \times 0,5 + (t_{ci} \times q_r) \times 2,5) \quad (8)$$

Метод наскрізної енергоємності відрізняється від обмеженого LCA тим, що він враховує внутрішні взаємозв'язки між виробничими процесами через застосування наскрізних коефіцієнтів (q_c). Ці коефіцієнти визначаються як відношення витрат енергоносіїв, що проходять через усі етапи виробництва, до первинних витрат для кожного напівфабрикату. Це дозволяє враховувати перерозподіл енергоносіїв між різними процесами та оцінювати їхній внесок у загальний вуглецевий слід.

Крім того, на відміну від обмеженого LCA, метод наскрізної енергоємності також передбачає перетворення покупної електроенергії в умовне паливо через калорійний коефіцієнт 0,34 кг у.п. / кВт·год. Після перетворення електроенергія оцінюється через загальний коефіцієнт викидів 2,5 кг CO₂ / кг у.п.

Таким чином, загальний розрахунок питомого вуглецевого сліду продукції на рівні підприємства за методом наскрізної енергоємності здійснюється за формулою:

$$C_{zCE} = \Sigma ((e_{ci} \times q_c) \times 0,34 \times 2,5 + (t_{ci} \times q_c) \times 2,5) \quad (9)$$

Однією з переваг методики наскрізної енергоємності є можливість окремого обліку витрат покупної електроенергії та умовного палива на виробництво продукції. Відповідно до цього, було виконано розрахунок питомої вуглецевої інтенсивності (сумарної вуглецевої інтенсивності для заводу «А» за продукцією листового прокату, сортового прокату, слябів та чавуну) з використанням моделі (9) та проведено порівняння розрахунків з результатами, представленими на Рис. 4. Результати порівняння наведені на Рис. 5.

Результати порівняння показують, що значення емісій при виробництві розглянутої продукції – листового прокату, сортового прокату, слябів та чавуну, розраховані за формулою (9) та з використанням повної комплексної моделі (6), практично однакові. Відмінності становлять менше 1%, що може не братися до уваги, враховуючи похибки вихідних даних.

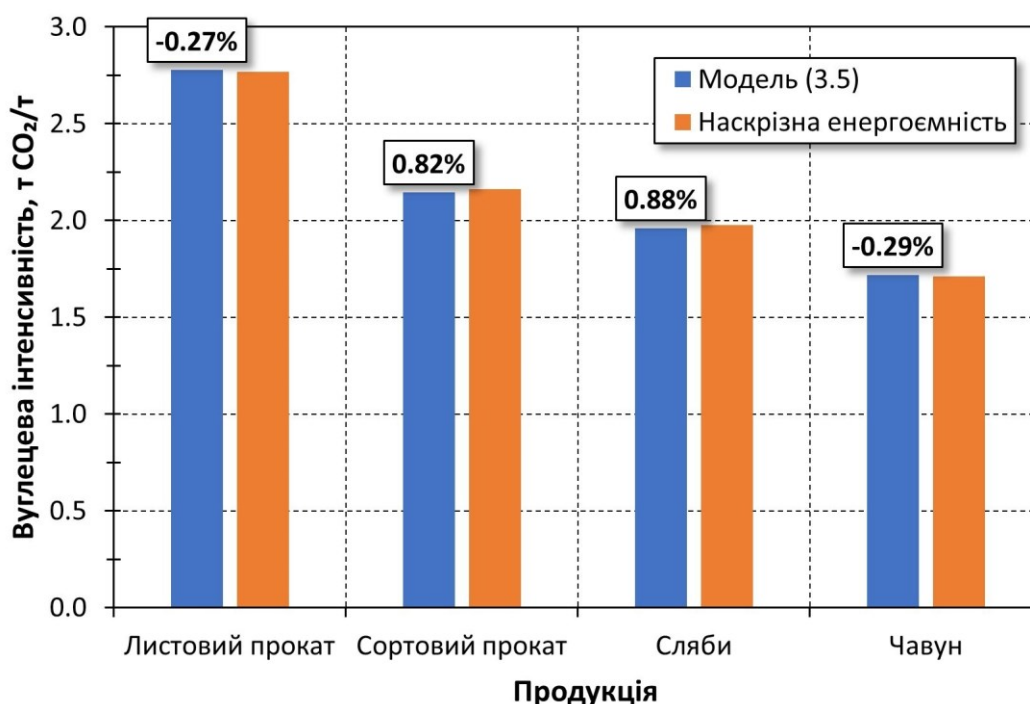


Рисунок 5 – Порівняння сумарної вуглецевої інтенсивності для заводу «А» за продукцією листового прокату, сортового прокату, слябів та чавуну, розрахованої за формулами (9) та моделлю (6)

Практично повний збіг результатів, отриманих за формулою (9) та за моделями (6), можна пояснити наступним чином. Використання формули (9) дозволяє визначити сумарну вуглецеву інтенсивність продукції без

необхідності безпосереднього розрахунку коефіцієнтів емісії для кожного переділу або напівфабрикату. Формула використовує наскрізні витратні коефіцієнти, які визначаються для всього виробничого ланцюга від початкової сировини до кінцевої продукції. Це означає, що всі енергетичні витрати, пов'язані з виробництвом продукції, вже враховані у витратних коефіцієнтах, але не безпосередньо у вигляді емісій діоксиду вуглецю. Замість цього, вони виражені у вигляді спожитої енергії та палива, яка надалі перетворюється у емісії CO₂ шляхом застосування уніфікованих коефіцієнтів перерахунку.

В методології LCA (Life Cycle Assessment) стандартний підхід до розрахунку викидів CO₂ передбачає перетворення прямих енергетичних витрат (палива, електроенергії, пари тощо) на емісії через множення на відповідні коефіцієнти емісії. Ці коефіцієнти визначають, скільки діоксиду вуглецю викидається при споживанні одиниці енергії або палива.

Однак у випадку використання формули (6) відбувається інший підхід. Замість розрахунку емісій для кожного окремого переділу або процесу, проводиться перетворення всіх енерговитрат на емісію діоксиду вуглецю через застосування принципу LCA не до прямих витрат енергоносіїв, а до наскрізних витратних коефіцієнтів. Це означає, що ми використовуємо узагальнену інформацію про енергоємність продукції, яка включає всі витрати енергії, палива та пари ТЕЦ на всіх переділах виробництва. Перетворення енерговитрат на емісію CO₂ відбувається за допомогою уніфікованих коефіцієнтів перерахунку, що дозволяє застосувати принцип LCA до всього виробничого ланцюга відразу.

Слід підкреслити, що емісії CO₂ не є частиною розрахунків наскрізної енергоємності, а визначаються лише на етапі перетворення енерговитрат у вуглецеву інтенсивність. Це важливий момент, оскільки самі по собі енерговитрати не передбачають визначення кількості викидів діоксиду вуглецю. Всі розрахунки енергоємності здійснюються незалежно від розрахунків викидів CO₂. Проте, використовуючи відомі коефіцієнти перерахунку, можна безпосередньо перетворити ці енерговитрати у еквівалентні емісії CO₂.

Використання наскрізних витратних коефіцієнтів дозволяє отримати точні значення емісій CO₂ без додаткових розрахунків, оскільки вся інформація

про енергетичні витрати вже включена у ці коефіцієнти. Це означає, що розрахунок за формулою (9) може бути настільки ж точним, як і розрахунок за допомогою повної комплексної моделі (6), оскільки він враховує всі енерговитрати на всіх етапах виробництва. Фактично, методика, яка застосовується у формулі (9), реалізує принцип LCA на рівні всього виробничого ланцюга, використовуючи наскрізні витратні коефіцієнти замість прямих витрат палива та електроенергії.

Такий підхід значно спрощує процес розрахунку емісій діоксиду вуглецю, оскільки не вимагає додаткових досліджень щодо визначення коефіцієнтів емісії для кожного переділу або напівфабрикату. Всі необхідні дані вже доступні у вигляді витрат енергоносіїв, які враховані у розрахунку енергоемності продукції. Перетворення енерговитрат у емісії CO₂ за допомогою стандартних коефіцієнтів перерахунку є прямим застосуванням принципу LCA, але з використанням наскрізних витратних коефіцієнтів замість прямих даних про споживання енергоносіїв.

Таким чином, методика, яка ґрунтується на використанні наскрізних витратних коефіцієнтів та перетворенні енерговитрат у емісії CO₂ за допомогою коефіцієнтів перерахунку, забезпечує високий рівень точності розрахунків. Це дозволяє застосовувати її для оцінки вуглецевої інтенсивності продукції на рівні всього підприємства без додаткових досліджень або складних розрахунків.

Для порівняння методик LCA та наскрізної енергоемності було використано дані, що містять обсяги споживання електроенергії та умовного палива, а також прямі та наскрізні витратні коефіцієнти для різних напівфабрикатів на металургійних підприємствах України. Проведені розрахунки дозволяють оцінити вуглецевий слід за кожною методикою окремо та порівняти загальні результати.

На рисунках Рис. 6 та Рис. 7 представлено значення питомого вуглецевого сліду для кожного напівфабрикату, розраховані за методами обмеженого LCA та наскрізної енергоемності відповідно. Розрахунок вуглецевого сліду для різних напівфабрикатів демонструє суттєві відмінності між методами, які пояснюються особливостями перерозподілу ресурсів у загальному виробничому процесі.

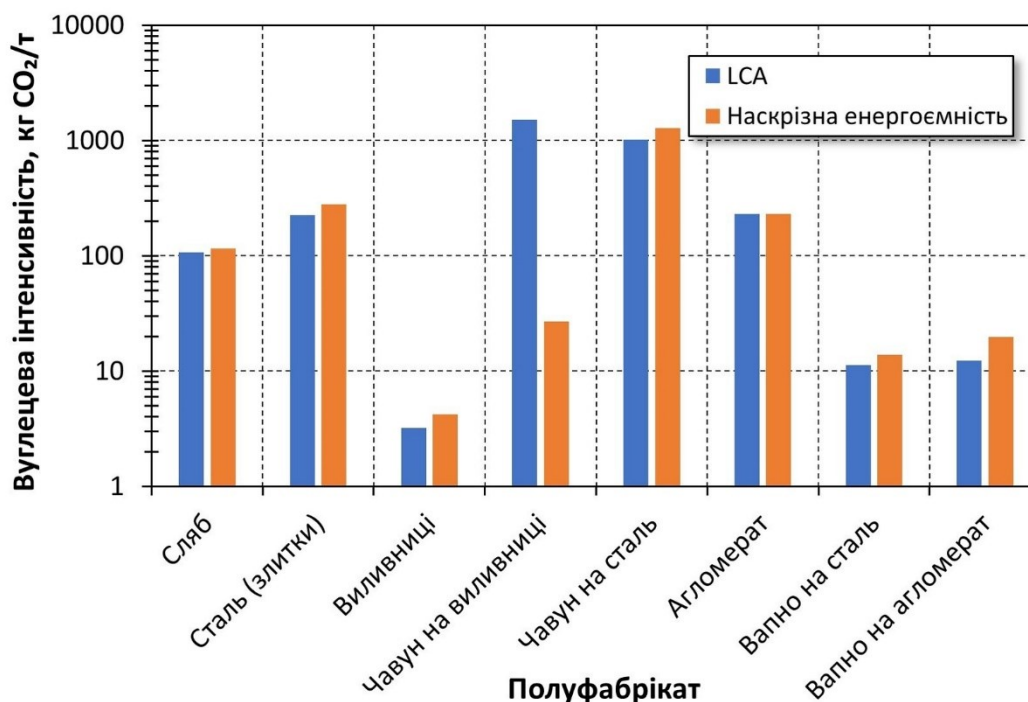


Рисунок 6 – Порівняння питомого вуглецевого сліду напівфабрикатів за методами обмеженого LCA та наскрізної енергоємності.

Для напівфабрикату «Сляб» метод обмеженого LCA дає значення 106,75 кг CO₂/т, тоді як метод наскрізної енергоємності – 114,98 кг CO₂/т.

Розрахунки для сталі (злитків) показують значення 225,20 кг CO₂/т за методом обмеженого LCA та 277,49 кг CO₂/т за методом наскрізної енергоємності.

Найбільші відхилення спостерігаються для чавуну на виливниці, де значення за методом обмеженого LCA дорівнює 1505,43 кг CO₂/т, тоді як за методом наскрізної енергоємності – лише 26,88 кг CO₂/т. Величезна різниця пояснюється тим, що при використанні методу наскрізної енергоємності враховується що, значна частина енергоносіїв перерозподіляється на інші процеси, знижуючи підсумковий результат. Подібна ситуація спостерігається для вапна на агломерат, де перерозподіл ресурсів також суттєво впливає на кінцеве значення.

Відмінності в розрахунках також спостерігаються для чавуну на сталь, де обмежений LCA дає значення 1018,92 кг CO₂/т, тоді як метод наскрізної енергоємності – 1271,02 кг CO₂/т. У цьому випадку більш високе значення за

методом наскрізної енергоємності пояснюється врахуванням перерозподілу енергоносіїв між виробничими ділянками.

Для агломерату різниця між методами є мінімальною – 231,77 кг CO₂/т за обмеженим LCA та 229,87 кг CO₂/т за наскрізною енергоємністю. Це може пояснюватися тим, що перерозподіл ресурсів у даному випадку незначний.

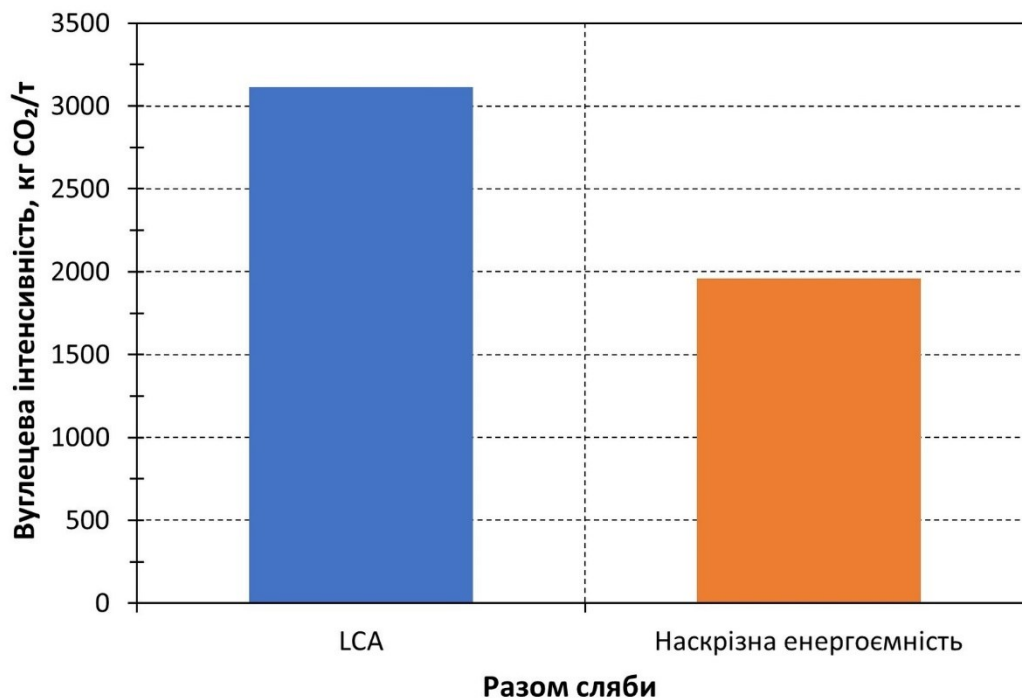


Рисунок 7 – Питомий вуглецевий слід катаних слябів за методами обмеженого LCA та наскрізної енергоємності.

На Рис. 7 представлено порівняння загального питомого вуглецевого сліду продукції "катані сляби", розрахованого за обома методами. Загальне значення за методом обмеженого LCA становить 3114,81 кг CO₂/т, тоді як за методом наскрізної енергоємності – 1957,99 кг CO₂/т. Це відхилення на 37,17% чітко демонструє, що врахування перерозподілу ресурсів між виробничими ділянками, відображає реальні енерговитрати на кожному етапі виробництва.

Висновки. Розроблено спрощений метод розрахунку інтегральних енергетичних показників металургійної продукції на основі методики наскрізної енергоємності, у якому наскрізні витратні коефіцієнти використовуються як узагальнена розрахункова база без побудови повної деталізованої моделі для кожного переділу.

Показано, що врахування внутрішніх взаємозв'язків між технологічними переділами, матеріальними потоками та вторинними енергоресурсами є необхідною умовою коректного розрахунку інтегральних енергетичних показників у багатостадійному виробництві. Використання спрощеного підходу на основі наскрізної енергоємності забезпечує високу точність порівняно з повною розрахунковою схемою, а розбіжність результатів для розглянутих видів продукції не перевищує 1–1,5 %.

Встановлено, що отримані енергетичні показники можуть бути використані як універсальна база для розрахунку похідних показників, пов'язаних з енергоспоживанням, зокрема умовно-паливного еквівалента продукції, еквівалентних витрат первинної енергії, паливної складової сумарного енергоспоживання, а також вуглецевої інтенсивності на основі уніфікованих коефіцієнтів перерахунку.

Порівняння з обмеженим LCA показало, що використання стандартних коефіцієнтів без урахування внутрішніх виробничих взаємозв'язків може призводити до суттєвого викривлення результатів. Для окремих видів прокатної продукції відхилення за показником вуглецевої інтенсивності може досягати 38 %, що підтверджує доцільність застосування підходу на основі наскрізної енергоємності не лише в задачах виробничого планування, технічного переозброєння та оцінки ефективності енерго- і ресурсозберігаючих заходів, а й для забезпечення зіставності розрахунків у міжнародних проєктах та в умовах адаптації до європейських вимог щодо оцінки продукції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Д.В. Сталинский, В.Г. Литвиненко, Т.А. Андреева, Г.Н. Грецкая, А.Л. Скоромный, Энергоемкость металлургической продукции, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков, Украина, 2015, 347 С.
2. E. Worrell, L. Price, N. Martin, J. Farla, R. Schaeffer, Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators, Energy Policy. 25 (1997), pp. 727–744. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00064-5).
3. Каневский А.Л., Лесовой В.В., Андреева Т.А., А.Л. Скоромный, Слисаренко А.А., Использование топливно-энергетических ресурсов на предприятиях объединения «Металлургпром», в: Казантип-ЭКО-2009 Экология Энерго- И Ресурсосбережение Охрана Окружающей Среды И Здоровье Человека Утилизация Отходов Сборник Научных Статей XVII Международной Научно-Практической Конференции, Издательство САГА, Харьков, 2009: сс. 323–329.

4. В.Н. Майорченко, А.А. Романенко, В.Л. Сиротенко, Л.С. Давыденко, Н.В. Дорошенко, Л.В. Морщавко, Анализ состояния технического переоснащения, модернизации и внедрения новейших технологий энергосбережения на предприятиях ГМК Украины, *Металлургическая И Горнорудная Промышленность*. 4 (2010), сс. 131–134.
5. Перетятко Р.А., Каневский А.Л., А.Л. Скоромный, Слисаренко А.А., К вопросу о расчете удельных затрат ТЭР при производстве чугуна, в: *Казантип-ЭКО-2010 Экология Энерго- И Ресурсосбережение Охрана Окружающей Среды И Здоровье Человека Утилизация Отходов Сборник Научных Статей XVIII Международной Научно-Практической Конференции*, НТМТ, Харьков, 2010: сс. 69–73.
6. Д.В. Сталинский, Р.А. Перетятко, Т.А. Андреева, Энергоемкость проката, *Вісник Національного Технічного Університету ХПІ*. 46 (2011), сс. 131–138.
7. В.Г. Литвиненко, В.Д. Мантула, А.Л. Каневский, Т.А. Андреева, В.Ю. Юхнов, Оценка энергоэффективности производства на основе анализа сквозной энергоемкости продукции, *Екологія Та Промисловість*. 2 (2009), сс. 47–53.
8. В.Г. Литвиненко, А.Л. Скоромный, А.А. Слисаренко, Т.А. Андреева, Р.А. Перетятко, Снижение энергозатрат при производстве металлопродукции при реконструкции мартеновского цеха ПРАО «Донецксталь» - металлургический завод», *Екологія Та Промисловість*. 3 (2012), сс. 99–105.
9. Д.В. Сталинский, В.Г. Литвиненко, В.А. Ботштейн, Т.А. Андреева, А.Л. Скоромный, Влияние технического перевооружения сталеплавильного производства на энергопотребление в черной металлургии, *Екологія Та Промисловість*. 1 (2011), сс. 58–63.
10. Т.А. Андреева, В.Г. Литвиненко, А.Л. Скоромный, А.А. Слисаренко, Влияние внедрения непрерывной разливки стали на изменение энергоемкости металлопродукции, *Екологія Та Промисловість*. 4 (2013), сс. 80–84.
11. Т.А. Андреева, В.Г. Литвиненко, А.А. Слисаренко, Г.Н. Грецкая, А.Л. Скоромный, К вопросу совершенствования системы нормирования топливно-энергетических ресурсов, *Екологія Та Промисловість*. 2 (2010), сс. 55–60.
12. Каневский А.Л., А.Л. Скоромный, Литвиненко В.Г., Андреева Т.А., Слисаренко А.А., Оценка снижения выбросов парниковых газов за счет внедрения основных энергосберегающих мероприятий на предприятиях горно-металлургического комплекса Украины, в: *Казантип-ЭКО-2009 Экология Энерго- И Ресурсосбережение Охрана Окружающей Среды И Здоровье Человека Утилизация Отходов Сборник Научных Статей XVII Международной Научно-Практической Конференции*, Издательство САГА, Харьков, 2009: сс. 365–372.
13. Литвиненко В.Г., Грецкая Г.Н., Дамрин В.Я., Закономерность образования и прогнозирования эмиссии двуокси углерода при производстве металлургической продукции, *Екологія Та Промисловість*. 4 (2008), сс. 14–18.
14. Литвиненко В.Г., Мантула В.Д., Грецкая Г.Н., Основные закономерности образования парниковых газов на металлургических предприятиях, *Екологія Та Промисловість*. 1 (2007), сс. 28–31.
15. United States Environmental Protection Agency (EPA), Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories, United States Environmental Protection Agency, 2025. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>.
16. O. US EPA, GHG Emission Factors Hub, (2025). <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub> (accessed April 6, 2025).

Received 11.03.2026.

Accepted 17.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 628.511:620.9

A SIMPLIFIED METHOD FOR CALCULATING INTEGRAL ENERGY INDICATORS OF METALLURGICAL PRODUCTS USING THROUGH CONSUMPTION COEFFICIENTS

Abstract. *The study considers the use of through consumption coefficients for the simplified calculation of energy performance indicators of metallurgical products in multi-stage production systems. It is shown that the conventional direct approach does not adequately account for internal relationships between technological stages, material flows, and secondary energy resources, which limits its applicability in predictive and comparative calculations. A simplified method is proposed in which through consumption coefficients are used as a generalized calculation basis for determining integral energy indicators of products without constructing a fully detailed model for each stage. The approach preserves high accuracy compared to the full calculation scheme while significantly simplifying the assessment of the effects of changes in production structure, product mix, and technological parameters. It is further demonstrated that the obtained energy indicators can be used for rapid calculation of related indicators associated with energy consumption, including fuel-equivalent values, primary energy equivalents, and carbon intensity, based on unified conversion factors. The proposed method can be applied in production planning, technical modernization of enterprises, and evaluation of the effectiveness of energy- and resource-saving measures.*

Keywords: *through-plant energy intensity, through consumption coefficients, integral energy indicators, calculation method, metal products production, carbon intensity*

REFERENCES

1. D.V. Stalinskii, V.G. Litvinenko, T.A. Andreeva, G.N. Gretskeya, A.L. Skoromnii, *Energoemkost metallurgicheskoi produktsii*, GP «UkrNTTs «Energostal», Kharkov, Ukraina, 2015, 347 S.
2. E. Worrell, L. Price, N. Martin, J. Farla, R. Schaeffer, *Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators*, *Energy Policy*. 25 (1997), pp. 727–744. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00064-5).
3. Kanevskii A.L., Lesovoi V.V., Andreeva T.A., A.L. Skoromnii, Slisarenko A.A., *Ispolzovanie toplivno-energeticheskikh resursov na predpriyatiyakh obedineniya «Metallurgprom»*, v: Kazantip-EKO-2009 *Ekologiya Energo- I Resursoberezhenie Okhrana Okruzhayushchei Sredi I Zdorove Cheloveka Utilizatsiya Otkhodov Sbornik Nauchnikh Statei XVII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii*, Izdatelstvo SAGA, Kharkov, 2009: ss. 323–329.
4. V.N. Maiorchenko, A.A. Romanenko, V.L. Sirotenko, L.S. Davidenko, N.V. Doroshenko, L.V. Morshchavko, *Analiz sostoyaniya tekhnicheskogo pereosnashcheniya, modernizatsii i vnedreniya noveishikh tekhnologii energosberezheniya na predpriyatiyakh GMK Ukraini, Metallurgicheskaya I Gornorudnaya Promishlennost*. 4 (2010), ss. 131–134.
5. Peretyatko R.A., Kanevskii A.L., A.L. Skoromnii, Slisarenko A.A., *K voprosu o raschete udelnykh zatrat TER pri proizvodstve chuguna*, v: Kazantip-EKO-2010 *Ekologiya Energo- I*

- Resursosberezhenie Okhrana Okruzhayushchei Sredi I Zdorove Cheloveka Utilizatsiya Otkhodov Sbornik Nauchnikh Statei XVIII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii, NTMT, Kharkov, 2010: ss. 69–73.
6. D.V. Stalinskii, R.A. Peretyatko, T.A. Andreeva, *Energoemkost prokata*, Visnik Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu KhPI. 46 (2011), ss. 131–138.
 7. V.G. Litvinenko, V.D. Mantula, A.L. Kanevskii, T.A. Andreeva, V.Yu. Yukhnov, *Otsenka energoeffektivnosti proizvodstva na osnove analiza skvoznoi energoemkosti produktsii*, Yekologiya Ta Promislovist. 2 (2009), ss. 47–53.
 8. V.G. Litvinenko, A.L. Skoromnii, A.A. Slisarenko, T.A. Andreeva, R.A. Peretyatko, *Snizhenie energozatrat pri proizvodstve metalloproduksii pri rekonstruktsii martenovskogo tsekha PRAO «Donetskstal» - metallurgicheskii zavod», Yekologiya Ta Promislovist. 3 (2012), ss. 99–105.*
 9. D.V. Stalinskii, V.G. Litvinenko, V.A. Botshtein, T.A. Andreeva, A.L. Skoromnii, *Vliyanie tekhnicheskogo perevooruzheniya staleplavilnogo proizvodstva na energopotreblenie v chernoi metallurgii*, Yekologiya Ta Promislovist. 1 (2011), ss. 58–63.
 10. T.A. Andreeva, V.G. Litvinenko, A.L. Skoromnii, A.A. Slisarenko, *Vliyanie vnedreniya neprerivnoi razlivki stali na izmenenie energoemkosti metalloproduksii*, Yekologiya Ta Promislovist. 4 (2013), ss. 80–84.
 11. T.A. Andreeva, V.G. Litvinenko, A.A. Slisarenko, G.N. Gretskaia, A.L. Skoromnii, *K voprosu sovershenstvovaniya sistemi normirovaniya toplivno-energeticheskikh resursov*, Yekologiya Ta Promislovist. 2 (2010), ss. 55–60.
 12. Kanevskii A.L., A.L. Skoromnii, Litvinenko V.G., Andreeva T.A., Slisarenko A.A., *Otsenka snizheniya vibrosov parnikovikh gazov za schet vnedreniya osnovnikh energosberegayushchikh meropriyatii na predpriyatiyakh gorno-metallurgicheskogo kompleksa Ukraini*, v: Kazantip-EKO-2009 Ekologiya Energo- I Resursosberezhenie Okhrana Okruzhayushchei Sredi I Zdorove Cheloveka Utilizatsiya Otkhodov Sbornik Nauchnikh Statei XVII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii, Izdatelstvo SAGA, Kharkov, 2009: ss. 365–372.
 13. Litvinenko V.G., Gretskaia G.N., Damrin V.Ya., *Zakonomernost obrazovaniya i prognozirovaniya emissii dvoukisi ugleroda pri proizvodstve metallurgicheskoi produktsii*, Yekologiya Ta Promislovist. 4 (2008), ss. 14–18.
 14. Litvinenko V.G., Mantula V.D., Gretskaia G.N., *Osnovnie zakonomernosti obrazovaniya parnikovikh gazov na metallurgicheskikh predpriyatiyakh*, Yekologiya Ta Promislovist. 1 (2007), ss. 28–31.
 15. United States Environmental Protection Agency (EPA), *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*, United States Environmental Protection Agency, 2025. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>.
 16. O. US EPA, *GHG Emission Factors Hub*, (2025). <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub> (accessed April 6, 2025).

Скоромний Андрій Леонідович, кандидат техн. наук, старший науковий співробітник кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», e-mail: andrey.scoromnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>

Skoromnyi Andrii Leonidovich, PhD, senior researcher of Department of Thermal Engineering and Energy Technology of the Dnipro University of Technology, e-mail: andrey.scoromnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОПТИМУМУ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

Анотація. У роботі застосовано рівноважне термодинамічне моделювання для аналізу енергетичної ефективності газифікації вугілля залежно від коефіцієнта витрати окисника. Коефіцієнт витрати окисника розглядається як неперервний керувальний параметр, а аналіз ґрунтується на узгодженому дослідженні рівноважної температури процесу, складу, теплоти згоряння та питомого виходу генераторного газу.

Встановлено, що реакція зазначених параметрів на зміну коефіцієнта витрати окисника має стійку тристадійну структуру, яка включає область неповного перетворення, оптимальну область та область надлишкового окислення. Показано, що зміна коефіцієнта витрати окисника призводить до узгодженої трансформації складу газу, зокрема до максимуму сумарної горючої складової та мінімуму продуктів окислення при значенні близько 0,3. Показано, що температура процесу зростає монотонно зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника і не визначає положення енергетичного оптимуму, зростання температури та виходу газу після певного значення коефіцієнта витрати окисника вже не компенсує зниження його теплоти згоряння. Запропоновано інтегральний енергетичний показник, який враховує одночасно вихід газу та його теплоту згоряння. Встановлено, що цей показник має чіткий максимум при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 для всіх досліджених умов. Отримані результати дозволяють розглядати зазначене значення як універсальну характеристичну точку процесу газифікації, що визначається його внутрішньою термодинамічною структурою та відповідає області раціональних режимів із мінімальними окислювальними втратами.

Ключові слова: газифікація, вугілля, термодинамічний аналіз, коефіцієнт витрати окисника, генераторний газ, енергетичний оптимум, інтегральний енергетичний показник

Постановка проблеми. Вугілля залишається важливою складовою глобальної енергетичної системи навіть в умовах декарбонізації та активного впровадження відновлюваних джерел енергії. За даними [1] та прогнозами [2], воно й надалі відіграватиме суттєву роль у виробництві електроенергії та забезпеченні промислових процесів. У цих умовах підвищення ефективності термохімічної конверсії вугілля є ключовим завданням для зниження викидів та підвищення стійкості енергетичних систем.

Газифікація вугілля є однією з базових технологій, що дозволяє реалізувати кероване перетворення палива з отриманням генераторного газу, теплової енергії та проміжних продуктів. Ефективність цього процесу визначається складною взаємодією температурного режиму, складу газової фази та ступеня перетворення палива. Одним із ключових параметрів, що визначає перебіг газифікації, є коефіцієнт надлишку окисника, який контролює співвідношення між відновлювальними та окислювальними процесами. Разом з тим аналіз отриманих у роботі результатів показує, що ефективність газифікації не може бути адекватно описана через окремі показники, такі як склад газу, температура або теплотворна здатність.

Таким чином, виникає проблема відсутності узгодженого підходу до визначення оптимального режиму газифікації, який враховував би спільну поведінку термодинамічних та енергетичних параметрів процесу, а не їх ізольований аналіз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна кількість сучасних досліджень присвячена аналізу впливу коефіцієнта надлишку окисника на окремі параметри процесу газифікації вугілля або біомаси, що дозволило встановити типові закономірності та сформувані базове уявлення про роль кількості окисника у процесах газифікації.

У роботі [3] досліджено газифікацію у псевдозрідженому шарі та показано, що зміна коефіцієнта надлишку окисника призводить до монотонних змін якості генераторного газу. Зокрема, використання повітря супроводжується зниженням теплотворної здатності, тоді як застосування киснево-парових середовищ сприяє підвищенню вмісту водню. Отримані оптимальні значення коефіцієнта надлишку окисника відображають специфіку реакторної

конфігурації та прийнятого визначення параметра, однак аналіз обмежується показниками без детального розгляду структури залежностей у різних областях.

У дослідженні [4] за допомогою чисельного моделювання підземної газифікації встановлено істотний вплив коефіцієнта надлишку окисника на температурні поля, стабільність процесу та утворення CO. Показано, що оптимальне значення коефіцієнта надлишку окисника забезпечує найбільш стабільний режим, проте основна увага приділяється гідродинамічним аспектам, тоді як термодинамічні закономірності зміни складу газу залишаються поза детальним аналізом.

Аналогічні залежності наведені в роботах [5, 6] присвячених газифікації біомаси. Зокрема, показано, що підвищення коефіцієнта надлишку окисника призводить до зниження об'ємної теплотворної здатності генераторного газу та зміни співвідношення CO/H₂. У роботі [7] продемонстровано чітке розмежування режимів горіння, піролізу та газифікації в широкому діапазоні значень коефіцієнта надлишку окисника. Водночас ці дослідження базуються переважно на макроскопічних тенденціях і не передбачають аналізу можливих структурних особливостей поведінки системи у проміжних областях зміни параметра.

У роботі [8] застосовано багатокритеріальну оптимізацію процесу газифікації біомаси, що підтвердило типовий характер впливу коефіцієнта надлишку окисника, а саме зростання ступеня конверсії та зниження теплотворної здатності генераторного газу зі збільшенням кількості окисника. Подібні результати наведені в [9], де також встановлено систематичні зміни температури, складу газу та побічних продуктів, однак без детального аналізу термохімічної структури залежностей.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із впливом газифікуючого агента. Показано, що заміна повітря на киснево-збагачені або парові середовища істотно змінює реакційні шляхи, температурний рівень і склад генераторного газу. У роботі [10] встановлено, що збагачення повітря киснем підвищує теплотворну здатність газу, але супроводжується зменшенням його виходу та збільшенням втрат вуглецю. У дослідженні [11] показано вплив складу середовища та мінеральної складової палива на реакційну здатність і склад газу, однак без аналізу неперервної поведінки системи в залежності від

коефіцієнта надлишку окисника. Робота [12] також базується на рівноважному моделюванні та оптимізації, проте орієнтована на визначення допустимих робочих областей за інтегральними критеріями.

Окрім цього, газифікація розглядається як складова інтегрованих енергетичних систем [13, 14], де аналізуються теплові та ексергетичні потоки. Проте такі підходи орієнтовані на системний рівень і не розкривають детальної термодинаміки процесу безпосередньо в газифікаторі.

Аналіз наукової літератури показує, що існуючі дослідження здебільшого розглядають вплив коефіцієнта надлишку окисника на окремі параметри процесу та встановлюють переважно відокремлені ізольовані залежності. При цьому взаємозв'язок між температурою, складом газу, виходом газу та енергетичними показниками, який визначає формування оптимального режиму газифікації, залишається недостатньо дослідженим. Це обумовлює необхідність комплексного аналізу їх узгодженої поведінки в широкому діапазоні значень коефіцієнта надлишку окисника.

Мета дослідження. Метою даної роботи є встановлення закономірностей формування енергетичного оптимуму та інтегрального енергетичного показника процесу газифікації вугілля на основі узгодженого аналізу температури, складу та виходу генераторного газу та у широкому діапазоні значень коефіцієнта надлишку окисника.

Викладення основного матеріалу дослідження. Досліджено газифікації кам'яного вугілля марки Д з зольністю 28%, яке використовується на теплових електростанціях, енергетичному секторі та в промисловості України.

Дослідження проводилося за допомогою NASA CEA [15], призначеного для розрахунку складу і властивостей довільних систем з хімічними і фазовими перетвореннями. В основі математичної моделі лежить термодинамічний підхід, заснований на мінімізації відповідного термодинамічного потенціалу. Такий підхід часто використовується при дослідженнях термохімічних процесів і дозволяє отримувати якісні результати [16-18].

Процес газифікації вугілля досліджувався при тиску 0,1 МПа. В якості окисника використовувався повітря, повітря, збагачене киснем (35%, 50%, 75 % кисню у повітрі), і кисень. При цьому параметр коефіцієнта надлишку окисника α (відношення фактичної витрати окисника в процесі газифікації до

витрати окисника при стехіометричному співвідношенні для повного горіння) змінювався в діапазоні 0,2-0,5.

На рисунку 1 наведено результати дослідження впливу коефіцієнта витрати окисника α на утворення горючої складової генераторного газу.

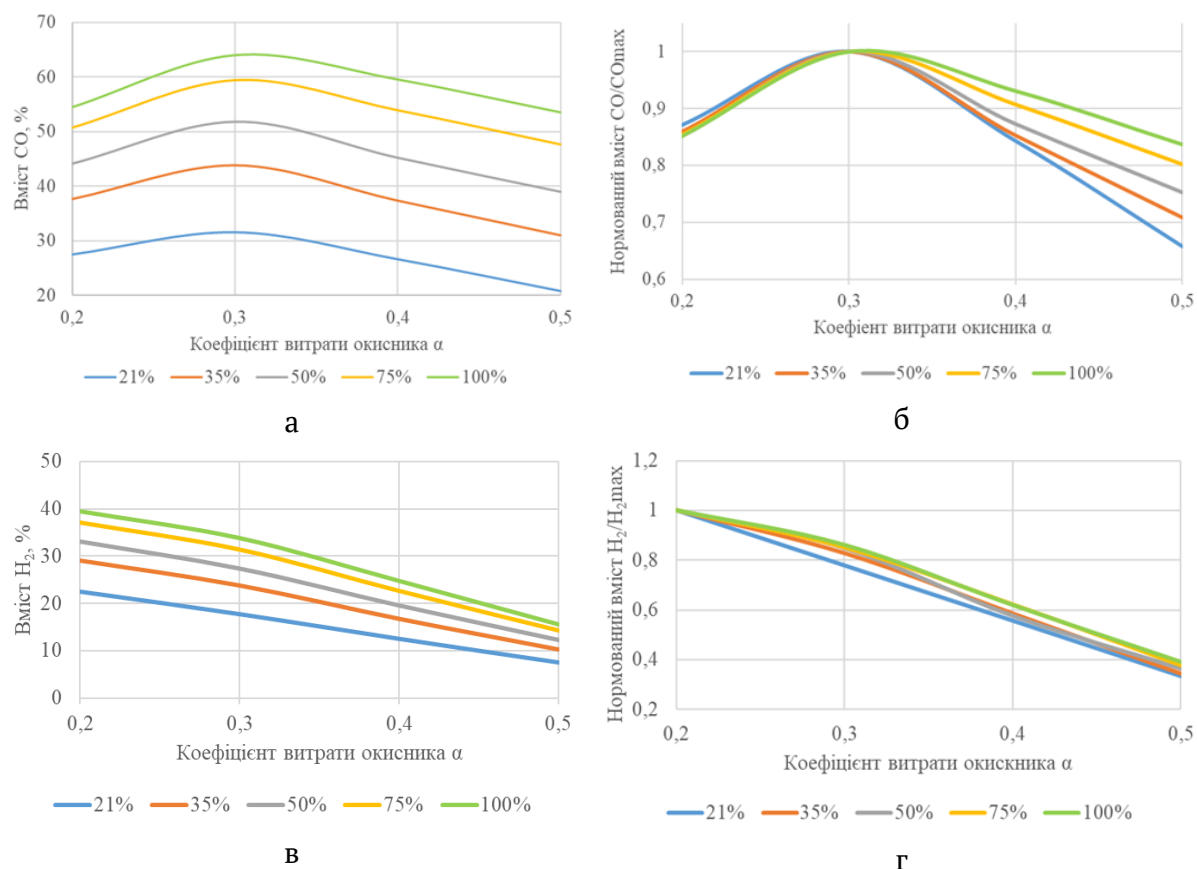


Рисунок 1 – Формування горючої складової генераторного газу залежно від коефіцієнта витрати окисника

Отримані результати вмісту CO залежно від коефіцієнта витрати окисника (рис. 1а) дозволяють виділити область максимального утворення CO, яка формується в інтервалі значень коефіцієнта витрати окисника 0,3-0,32 та зміщується в область вищих значень концентрації при збільшенні частки кисню в дутті. При зменшенні коефіцієнта витрати окисника щодо максимуму вміст CO зменшується, у зв'язку з тим, що окисника недостатньо для повної переробки вуглецю, що підтверджується наявністю непрореагованого вуглецю.

Нормування залежностей CO/CO_{max} показало (рис. 1б), що для всіх досліджених ступенів кисневого збагачення максимум вмісту CO досягається

практично в одній і тій самій області коефіцієнта витрати окисника близько 0,3-0,32. Це свідчить про наявність квазіуніверсальної області оптимуму за коефіцієнтом витрати окисника, тоді як зміна частки кисню в дутті впливає переважно на абсолютний рівень концентрації CO, а не на положення максимуму. Водночас зі збільшенням кисню в повітрі зменшується швидкість спаду нормованого вмісту CO/CO_{max} при коефіцієнті витрати окисника більше 0,3, що свідчить про розширення області режимів, у яких зберігається високий рівень утворення CO.

Як видно з результатів досліджень, зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника вміст H_2 у генераторному газі зменшується практично монотонно для всіх досліджених ступенів кисневого збагачення (рис. 1в). Це свідчить про високу чутливість водневої складової до посилення окислювального режиму та відсутність локального оптимуму за даним показником. На відміну від CO, для якого характерна наявність максимуму, поведінка H_2 визначається переважанням реакцій його окислення та зміщенням рівноваги системи $CO-H_2O-CO_2-H_2$ у бік утворення водяної пари. Це підтверджує, що оптимальний режим газифікації не може визначатися за окремими компонентами, а має встановлюватися з урахуванням їх узгодженої зміни.

Нормування залежностей H_2/H_{2max} показало (рис. 1г), що для всіх досліджених ступенів кисневого збагачення максимальний вміст H_2 досягається при мінімальному значенні коефіцієнта витрати окисника 0,2, після чого спостерігається монотонне зниження. Близькість нормованих кривих свідчить про подібний характер впливу коефіцієнта витрати окисника на водневу складову генераторного газу незалежно від вмісту кисню в повітрі. При цьому зі зростанням частки кисню відносно зменшення H_2 дещо уповільнюється.

На рисунку 2 наведено результати дослідження впливу коефіцієнта витрати окисника α на вміст відновлювальних компонентів (CO, H_2) та продуктів окислення (CO_2 , H_2O).

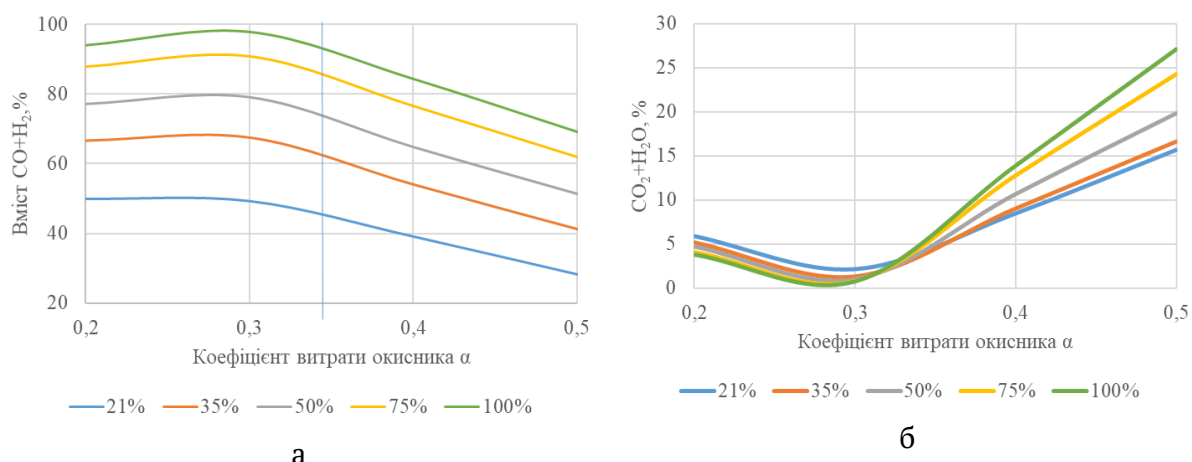


Рисунок 2 – Формування відновлювальних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$) та продуктів окислення ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) залежно від коефіцієнта витрати окисника

Аналіз сумарної горючої складової генераторного газу показав (рис. 2а), що при всіх видах окисника характерна наявність максимуму при коефіцієнті витрати окисника 0,3-0,32, який відповідає енергетично оптимальному режиму газифікації. На відміну від окремих компонентів, для яких спостерігаються різні закономірності зміни, сумарне значення відновлювальних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$) відображає узгоджену поведінку системи і може бути використаний як інтегральний критерій вибору режиму.

Сумарні окиснювальні втрати (рис. 2б), оцінені за показником кількості продуктів окислення ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), при всіх видах окисника досягають мінімуму при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3. При відхиленні від цього значення в бік більших значень коефіцієнта витрати окисника спостерігається різке зростання сумарних втрат, яке посилюється зі збільшенням частки кисню в окиснику. Це підтверджує, що область коефіцієнта витрати окисника 0,3-0,32 відповідає не лише максимуму горючої складової генераторного газу, але й мінімуму сукупних окиснювальних втрат процесу.

Для якісного індикатора ефективності газифікації за складом генераторного газу пропонується використовувати відношення $\lg((\text{CO} + \text{H}_2)/\text{CO}_2)$, значення якого наведено на рисунку 3.

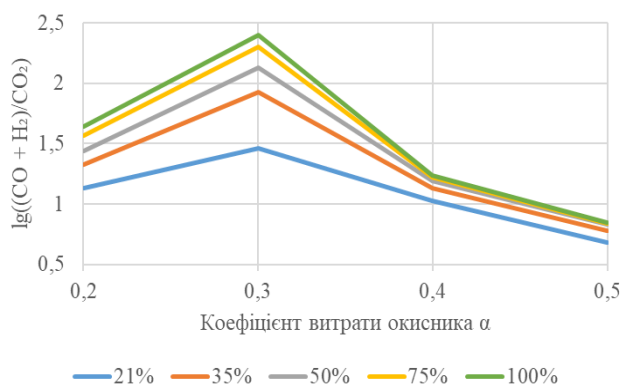


Рисунок 3 – Індикатор ефективності газифікації за паливною складовою

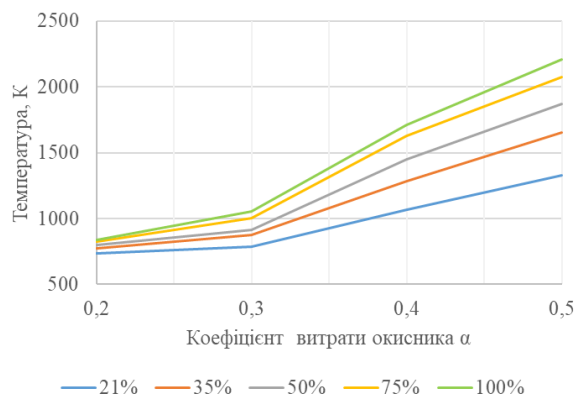


Рисунок 4 – Температура газифікації залежно від коефіцієнта витрати окисника

Наявність максимального значення відношення $\lg((CO + H_2)/CO_2)$ свідчить про існування універсальної області енергетично оптимального режиму газифікації, яка визначається узгодженою зміною складу генераторного газу та мінімізацією окислювальних втрат, при цьому підвищення кількості кисню в окиснику посилює якість газу, але не зміщує оптимум, який існує при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3.

Отримані результати демонструють наявність трьох характерних областей процесу газифікації: при малих значеннях коефіцієнта витрати окисника (область I) спостерігається неповне перетворення вуглецю; при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 (область II) формується енергетично оптимальний режим за паливною складовою, що відповідає максимуму сумарної горючої складової ($CO + H_2$); при подальшому зростанні коефіцієнта витрати окисника (область III) відбувається надлишкове окислення, що призводить до зниження вмісту горючих компонентів газу.

Оптимальний режим газифікації визначається як максимумом паливної складової, а й умовою досягнення достатнього температурного рівня, що забезпечує повний перебіг реакцій газифікації вуглецю. Результати дослідження впливу складу та кількості окисника на температурний рівень процесу газифікації наведено на рисунку 4.

Отримані залежності температури показують, наявність явно виражених трьох температурних областей, межі яких співпадають з областями кардинальної зміни складу генераторного газу. При малих значеннях коефіцієнта витрати окисника (область I) температура процесу є недостатньою

для повного протікання реакцій газифікації, що призводить до наявності непрореагованого вуглецю. Зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника температура різко зростає, забезпечуючи повне перетворення палива (область II), однак подальше підвищення коефіцієнта витрати окисника супроводжується окрім підвищення температури (область III) надлишковим окисленням і зниженням вмісту горючих компонентів газу. Таким чином, дослідження показали, що область раціональних режимів визначається одночасним виконанням температурного критерію та максимуму сумарної горючої складової ($\text{CO} + \text{H}_2$).

Важливими показниками для оцінки енергетичної ефективності процесу газифікації є вихід та теплота згоряння генераторного газу. Параметри генераторного газу залежно від коефіцієнта витрати окисника наведено на рисунку 5.

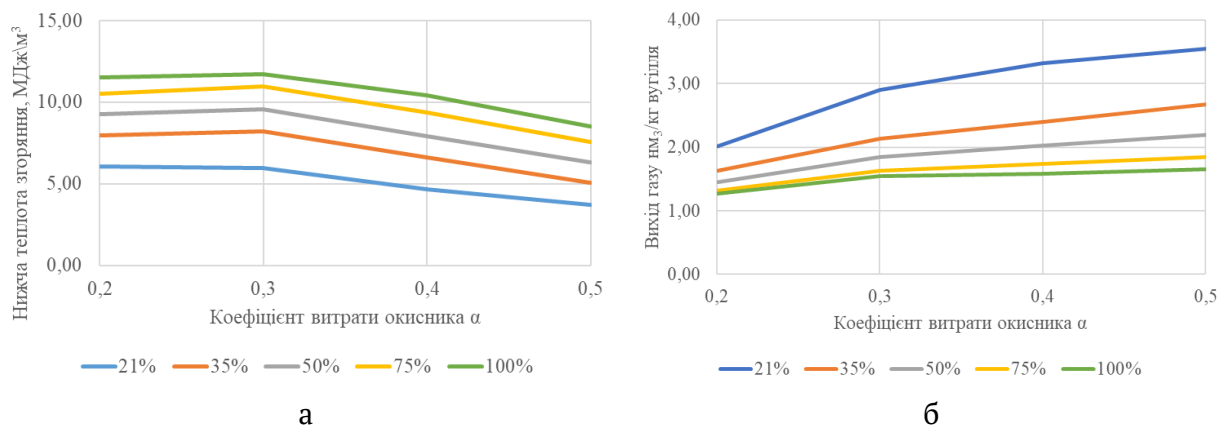


Рисунок 5 – Значення нижчої теплоти згоряння (а) та вихід генераторного газу (б) залежно від коефіцієнта витрати окисника

Встановлено, що для всіх значень видів окисника нижчої теплоти згоряння генераторного газу досягається при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3, це відповідає області одночасного максимуму горючих компонентів та мінімуму продуктів окислення (рис. 5а). Так для повітряної газифікації теплота згоряння газу становить 5,5-6 МДж/м³, а при кисневій газифікації 11,5-12 МДж/м³. Отриманий генераторний газ залежно від теплоти згоряння, склад і технології може використовуватися як паливний газ, як відновлювальний в металургійному виробництві, при організації парогазових циклів, а також як хімічна сировина. Збільшення коефіцієнта витрати окисника

призводить до зростання виходу генераторного газу (рис. 5б), однак це супроводжується зниженням його теплотворної здатності та зростанням окиснювальних втрат, що свідчить про недоцільність оцінки ефективності процесу лише за об'ємом утвореного газу. Як видно, найбільший вихід генераторного газу спостерігається при повітряній газифікації, що пояснюється великим вмістом баластного азоту

Як сказано раніше, у більшості досліджень ефективність газифікації оцінюється за теплотворною здатністю генераторного газу або за його складом. Ці показники характеризують якість газу, однак не відображають загальну кількість хімічної енергії, отриманої з одного кілограма палива. Унаслідок цього повітряна газифікація часто інтерпретується як енергетично не вигідна через низьке значення теплоти згоряння газу. Такий висновок ґрунтується виключно на властивостях газу в перерахунку на одиницю об'єму й не враховує сумарний вихід газу.

Для отримання фізично узгодженого показника в цій роботі використано інтегральний енергетичний показник, визначений як добуток об'ємного виходу газу при газифікації та його об'ємної нижчої теплоти згоряння $V_{\text{г}} \times Q_{\text{н}}$. Цей параметр відображає загальну кількість енергії, переданої від вугілля до генераторного газу, і забезпечує безпосередню основу для порівняння газифікації при використанні різних видів окисника без спотворень, притаманних використанню лише теплоти згоряння газу. Отримані дані щодо значень інтегрального енергетичного показника для газифікації з різним типом окисника наведено на рисунку 6.

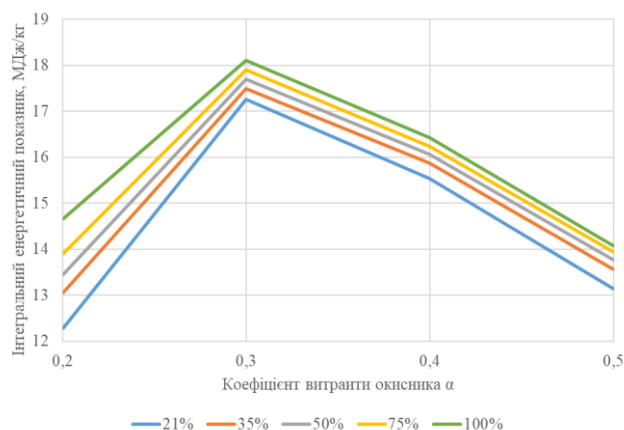


Рисунок 6 – Інтегральний енергетичний показник процесу газифікації

Аналіз інтегрального енергетичного показника показав, що для всіх видів окисника максимум досягається при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3. При подальшому зростанні коефіцієнта витрати окисника, незважаючи на збільшення виходу газу, спостерігається зниження $V_r \times Q_n$, що зумовлено зменшенням теплоти згоряння генераторного газу внаслідок інтенсифікації окислювальних процесів.

Отримані результати підтверджують, що інтегральний енергетичний показник забезпечує більш коректне представлення процесу газифікації, ніж використання лише окремих показників, такі як склад газу, температура або теплотворна здатність. Хоча теплота згоряння генераторного газу при повітряній газифікації є низькою, вихід газу є значним, і сумарна кількість хімічної енергії, отриманої з одного кілограма вугілля, у області, близькій до максимуму, є порівнянною з кисневою газифікацією. Поширене уявлення про те, що повітряна газифікація є «енергетично слабкою», виникає внаслідок оцінювання виключно якості газу в перерахунку на одиницю об'єму. Інтегральний критерій, використаний у цій роботі, усуває це обмеження та показує, що максимальний енергетичний вихід для всіх видів окисників має однаковий порядок величини та енергетичний максимум є чітко визначеною характерною точкою, яка формується при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3.

Висновки. Встановлено, що область раціональних режимів газифікації обмежується з одного боку зоною недостатньої окислювальної забезпеченості, у якій спостерігається наявність непрореагованого вуглецю, а з іншого – областю надлишкового окислення, що призводить до зниження вмісту горючих компонентів газу. У межах цих обмежень формується енергетично оптимальний режим процесу, що відповідає максимуму сумарної горючої складової. Показано, що сумарна горюча складова газу досягає максимуму при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3, тоді як продукти окислення у цій області мають мінімальні значення. Це дозволяє ідентифікувати зазначений діапазон як область мінімальних окислювальних втрат і максимального енергетичного потенціалу генераторного газу.

Встановлено, що використання логарифмічного показника $\lg((CO+H_2)/CO_2)$ дозволяє отримати стійкий критерій оцінки режиму газифікації. Показано, що

для всіх досліджених умов максимум цього показника відповідає значенню коефіцієнта витрати окисника близько 0,3. Зазначений режим відповідає одночасному досягненню максимуму сумарної горючої складової ($\text{CO} + \text{H}_2$) та мінімуму вмісту CO_2 , що свідчить про реалізацію оптимального відновлювально-окислювального балансу процесу газифікації. Отримані результати дозволяють перейти від аналізу окремих компонентів до системного визначення раціонального режиму процесу.

Показано, що температура процесу газифікації зростає монотонно зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника і не має максимуму в області енергетичного оптимуму. Це свідчить про те, що оптимальний режим визначається не максимальним температурним рівнем, а досягненням балансу між достатньою температурою процесу та мінімізацією втрат, пов'язаних з окисленням.

Встановлено, що енергетичний оптимум процесу газифікації формується як результат узгодженої зміни виходу генераторного газу та його теплотворної здатності, що адекватно описується інтегральним енергетичним показником $V_{\text{г}} \times Q_{\text{н}}$. Показано, що цей показник має чітко виражений максимум при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 для всіх досліджених умов, незважаючи на протилежний характер зміни його складових (зростання виходу газу та зниження його теплотворної здатності при збільшенні подачі окисника). Це свідчить про те, що положення оптимального режиму визначається внутрішньою термодинамічною структурою процесу та відповідає області мінімальних окислювальних втрат, у якій досягається максимальний сумарний енергетичний вихід генераторного газу.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. International Energy Agency, World Energy Outlook 2025, IEA, Paris, France, Analytical Services, 2025, pp. 517, Nov. 12, 2025, from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>.
2. British Petroleum, BP Energy Outlook 2025, BP, London, UK, Market research, pp. 56, 2025, from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2025.pdf>
3. Aydar, E., Gul, S., Unlu, N., Akgun, F. and Livatyali, H., Effect of the Type of Gasifying Agent on Gas Composition in a Bubbling Fluidized Bed Reactor, J. Energy Inst., vol. 87, no. 1, pp. 35–42, 2014, DOI: 10.1016/j.joei.2014.02.004.

4. Biswas, A. K., Suksuwan, W., Phoungthong, K. and Wae-hayee, M., Effect Of Equivalent Ratio (ER) On the Flow and Combustion Characteristics in A Typical Underground Coal Gasification (UCG) Cavity, *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 86, no. 2, pp. 28–38, 2021, DOI: 10.37934/arfmts.86.2.2838.
5. Sher, F., Hameed, S., Smječanin Omerbegović, N., Chupin, A., Ul Hai, I., Wang, B., Heng Teoh, Y. and Joka Yildiz, M., Cutting-Edge Biomass Gasification Technologies for Renewable Energy Generation and Achieving Net Zero Emissions, *Energy Convers. Manag.*, vol. 323, p. 119213, 2025, DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119213.
6. Zhu, D., Wang, Q., Xie, G., Ye, Z., Zhu, Z. and Ye, C., Effect of Air Equivalence Ratio on the Characteristics of Biomass Partial Gasification for Syngas and Biochar Co-Production in the Fluidized Bed, *Renew. Energy*, vol. 222, p. 119881, 2024, DOI: 10.1016/j.renene.2023.119881.
7. Clemente-Castro, S., Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Giráldez, I. and Díaz, M. J., Comparative Study of the Combustion, Pyrolysis and Gasification Processes of *Leucaena Leucocephala*: Kinetics and Gases Obtained, *Heliyon*, vol. 9, no. 7, p. e17943, 2023, DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17943.
8. Habibollahzade, A., Ahmadi, P. and Rosen, M. A., Biomass Gasification Using Various Gasification Agents: Optimum Feedstock Selection, Detailed Numerical Analyses and Tri-Objective Grey Wolf Optimization, *J. Clean. Prod.*, vol. 284, p. 124718, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124718.
9. Silva, I. P., Silva, B. R. S., Santana, H. E. P., Souza, W. L., Silva, G. F., Ruzene, D. S. and Silva, D. P., Operational Assessment of Downdraft Gasification of Agricultural Residues from Cassava Cultivation, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 114, pp. 326–336, 2025, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.427.
10. Mastellone, M. L., Zaccariello, L., Santoro, D. and Arena, U., The O₂-Enriched Air Gasification of Coal, Plastics and Wood in a Fluidized Bed Reactor, *Waste Manag.*, vol. 32, no. 4, pp. 733–742, 2012, DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.005.
11. Yang, Z., Zhang, L., Peng, J. and Guo, M., Gasification of Inferior Coal with High Ash Content under CO₂ and O₂/H₂O Atmospheres, *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 10, pp. 1046–1053, 2015, DOI: 10.1080/15435075.2014.962031.
12. Dave, P. P., Shah, P. D., Poonawala, T. Y., Channiwala, S. A. and Parikh, J. K., Determination of Optimally Feasible Operating Parameters for Gasification of High-Ash-Content Coal, *MRS Energy Sustain.*, vol. 10, no. 1, pp. 100–112, 2023, DOI: 10.1557/s43581-022-00056-6.
13. Piazzzi, S., Patuzzi, F. and Baratieri, M., Energy and Exergy Analysis of Different Biomass Gasification Coupled to Fischer-Tropsch Synthesis Configurations, *Energy*, vol. 249, p. 123642, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123642.
14. Yang, S., Ren, Q., Han, S., Cui, R., Hu, Y., Heng, Y., Dong, S., Li, L., Gong, M., Liang, C., Guo, S., Fang, N. and Li, W., Coal Gasification-Combustion System – Part I: Principle and Nitrogen Migration Characteristics, *Fuel*, vol. 398, p. 135527, 2025, DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135527.
15. <https://www.nasa.gov/glenn/research/chemical-equilibrium-with-applications/>
16. Ratnadhariya, J. K. and Channiwala, S. A., Three Zone Equilibrium and Kinetic Free Modeling of Biomass Gasifier - a Novel Approach, *Renew. Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1050–1058, 2009, DOI: 10.1016/j.renene.2008.08.001.
17. Pinchuk, V. A. and Sharabura, T. A., Computer modeling of coal-water fuel gasification process using an equilibrium thermodynamic model, in *Inf. Support Decis.-Mak. Syst. Econ. Eng. Organ. Fields*, Donetsk: LANDON-XXI, pp. 354–371, 2013, from https://modern.science.triacon.org/valeriya.pinchuk/2013_12.pdf
18. Li, L., Zhou, L., Ren, Q., Cui, R., Yang, S., Li, W. and Dong, S., Influence of Ash Composition on Slag Properties and Network Structure in Coal Gasification Fine Slag: A High-Temperature Melting Perspective, *Energy*, vol. 329, p. 136816, 2025, DOI: 10.1016/j.energy.2025.136816.

UDC 662.764

Olena Tutova, Valeriia Pinchuk

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ENERGY OPTIMUM FORMATION IN COAL GASIFICATION

Abstract. *Equilibrium thermodynamic modeling was applied to analyze the energy efficiency of coal gasification as a function of the oxidizer consumption coefficient. The oxidizer consumption coefficient is considered as a continuous control parameter that determines the balance between reduction and oxidation processes, and the analysis is based on the coordinated evaluation of equilibrium temperature, producer gas composition, its heating value, and specific gas yield. It is shown that variation of the oxidizer consumption coefficient leads not to isolated changes of individual parameters, but to their interrelated transformation with a clearly pronounced structural character. It is established that within the studied range, a three-stage structure of the process is formed, including a region of incomplete conversion with the presence of unreacted carbon, a region of rational operating conditions, and a region of excessive oxidation accompanied by a decrease in the content of combustible gas components. It is shown that transitions between these regions are characterized by changes in the behavior of the main parameter dependencies, reflecting a shift in the balance between dominant thermochemical processes.*

It is established that within the region of rational operating conditions, an energy-optimal gasification regime is formed, corresponding to the maximum of the total combustible fraction of the producer gas and the minimum of oxidation products. It is shown that this regime is realized at an oxidizer consumption coefficient of approximately 0.3 and corresponds to the region of minimal oxidation losses. The introduction of the logarithmic indicator $\lg((\text{CO}+\text{H}_2)/\text{CO}_2)$ made it possible to obtain a stable criterion for evaluating the gasification regime, ensuring unambiguous identification of the optimum region. It is shown that the maximum of this indicator coincides with the maximum of the total combustible fraction and the minimum of oxidation products, confirming the realization of an optimal reduction–oxidation balance.

It is established that the gasification temperature increases monotonically with increasing oxidizer consumption coefficient and does not determine the position of the

energy optimum. It is shown that beyond a certain value of the oxidizer consumption coefficient, further increases in temperature and gas yield no longer compensate for the decrease in gas heating value, resulting in reduced energy efficiency. To generalize the obtained results, an integral energy indicator was proposed, which simultaneously accounts for the producer gas yield and its heating value. It is established that this indicator exhibits a well-defined maximum at an oxidizer consumption coefficient of approximately 0.3 for all investigated conditions, despite the opposite trends of its components.

The obtained results show that the energy optimum of the gasification process is formed as a result of coordinated variation of process parameters and is determined by its internal thermodynamic structure. This makes it possible to move from the analysis of individual characteristics to a system-based identification of the rational gasification regime corresponding to minimal oxidation losses and maximum total energy output of the producer gas.

Keywords: *gasification, coal, thermodynamic analysis, oxidizer consumption coefficient, producer gas, energy optimum, integral energy indicator*

Тутова Олена Валеріївна - аспірант, Український державний університет науки і технологій, e-mail: riasnovaelen@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6846-0327>

Пінчук Валерія Олександрівна - доктор техн. наук, проф., завідувач кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», e-mail: Pinchuk.V.O@nmu.one

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7684-1867>

Tutova Olena Valeriyivna - junior researcher, Ukrainian State University of Science and Technologies, e-mail: riasnovaelen@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6846-0327>

Pinchuk Valeriia Oleksandrivna - Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department of Thermal Engineering And Energy Technology of the Dnipro University of Technology, e-mail: Pinchuk.V.O@nmu.one

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7684-1867>

МЕТОД ПОБУДОВИ КРИЗОВО-КОНТЕКСТНОГО ДАТАСЕТУ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ ADAPTIVE IRM

Анотація. Ця робота присвячена не експериментальному підтвердженню ефективності Adaptive IRM, а побудові спеціалізованого кризово-контекстного датасету, який робить таку перевірку можливою в коректній постановці. У статті запропоновано метод перетворення кризових повідомлень із HumAID у пари виду «абстрактний запит – кризово-залежна відповідь», де питання навмисно очищується від прямих маркерів лиха, а правильна інтерпретація потребує відновлення прихованого контексту події. Такий дизайн відрізняється від переважних у crisis informatics задач tweet-level classification, informativeness detection, humanitarian categorization і multimodal crisis annotation, для яких призначені HumAID, CrisisBench, AIDR, TREC-IS і CrisisMMD [1, 2, 3, 4, 5, 6]. У результаті роботи сформовано датасет обсягом 41 152 записи за п'ятьма категоріями кризових подій; під час генерації питань використовувалася схема primary generation -> retry generation -> fallback, причому fallback було задіяно у 1 432 випадках, що становить 3.48% корпусу. Як наступний етап пропонуються формалізована ручна валідація, автоматична retrieval-style перевірка семантичної узгодженості, event-disjoint split на рівні подій HumAID, реалізація Adaptive IRM і порівняння LLM-baseline, LLM+Adaptive IRM, RAG і PEFT-baselines із розширеним набором автоматичних і ручних метрик [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Ключові слова: кризово-контекстний датасет, великі мовні моделі, прихована контекстна адаптація, Adaptive IRM, question generation, crisis informatics, HumAID, генерація запитань, валідація датасетів.

Постановка проблеми

Соціальні медіа давно стали одним із ключових джерел даних для crisis informatics, оскільки під час надзвичайних ситуацій користувачі публікують оперативні відомості про руйнування, потреби, переміщення, інфраструктурні збої, пошук допомоги та локальну обстановку. Водночас саме це середовище

створює високе навантаження на автоматичні методи аналізу: повідомлення короткі, шумні, контекстно насичені й не завжди придатні для прямого вилучення actionable information. Тому задача не зводиться до простого розпізнавання тексту: необхідні способи враховувати прихований контекст події, який визначає, як саме має інтерпретуватися один і той самий загальний запит [1].

Актуальність такої постановки посилюється з появою великих мовних моделей. Сучасні огляди з LLM у disaster management показують, що ці моделі вже застосовуються для фільтрації за релевантністю, класифікації, вилучення інформації, summarization і підтримки рішень на різних фазах disaster cycle. Водночас той самий огляд підкреслює відкриті проблеми надійності, доменної адаптації, відтворюваності та якісного оцінювання в кризовому середовищі, де контекст не завжди заданий явно, а помилка відповіді може бути змістовно значущою [7].

На цьому тлі запропонована стаття розв'язує підготовчу, але методологічно важливу задачу: формує корпус для перевірки того, чи може модель коректно відновлювати кризовий контекст не з прямої згадки лиха в питанні, а з окремого контекстного сигналу та семантичного зв'язку з відповіддю. Саме тому центральним науковим результатом тут є датасет і його валідаційна рамка, а не вже реалізована модифікація базової LLM.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наявні кризові корпуси та постановки

Одним із найбільш релевантних джерел для цієї роботи є HumAID — корпус, що містить близько 77 тисяч вручну розмічених твітів, відібраних із пулу приблизно 24 мільйонів повідомлень, пов'язаних із 19 надзвичайними подіями 2016-2019 років. Автори HumAID розглядають цей ресурс як основу для навчання та порівняння моделей, що працюють із кризовими повідомленнями на рівні окремих твітів, насамперед у задачах класифікації та аналізу гуманітарно значущої інформації [2].

Подібну дослідницьку лінію розвиває CrisisBench. У цій роботі об'єднано вісім розмічених кризових джерел, на основі яких сформовано вибірки обсягом 166.1 тис. твітів для задачі informativeness classification і 141.5 тис. твітів для humanitarian classification. Таким чином, CrisisBench орієнтований на зіставне

навчання й оцінювання класифікаторів кризових повідомлень, а не на перевірку здатності моделей адаптувати відповідь до прихованого кризового контексту [3].

AIDR також належить до класу систем, орієнтованих на автоматичну обробку й класифікацію crisis-related microblog communications. Платформу було розроблено для швидкого налаштування користувацьких категорій та автоматичного розподілу повідомлень за ними в умовах надзвичайних ситуацій. TREC-IS, своєю чергою, формує постановку навколо пошуку actionable information у потоках соціальних медіа, використовуючи інформаційні типи та пріоритизацію повідомлень для підтримки response scenarios. CrisisMMD розширює кризовий аналіз завдяки мультимодальним даним, однак його основні анотаційні задачі також залишаються пов'язаними з класифікацією: informative vs. not informative, humanitarian categories і damage severity assessment [4, 5, 6].

Отже, наявні кризові корпусні ресурси послідовно розв'язують задачі класифікації повідомлень, фільтрації, категоризації, пріоритизації та мультимодальної анотації. Ці напрями є фундаментальними для crisis informatics, однак вони не покривають окрему постановку, у якій користувацький запит залишається абстрактним, а релевантна відповідь визначається прихованим кризовим контекстом.

LLM, контекстна адаптація та PEFT

Зв'язок роботи із сучасною літературою щодо LLM та адаптації формулюється через два взаємодоповнювальні напрями. Перший — це disaster-oriented LLM research, де огляд 2025 року щодо LLM у disaster management фіксує зростання прикладних робіт, але також повідомляє про брак стандартизованих оцінювальних рамок, придатних датасетів і акуратної доменної адаптації [7]. Другий — це література з parameter-efficient adaptation, яка показує, що поведінку великих моделей можна предметно перебудовувати без повного fine-tuning. Сюди належать adapters, prefix tuning, LoRA, IA3 і споріднені методи [9, 16, 17, 18, 19].

Саме в цьому контексті Adaptive IRM слід позиціонувати як спеціалізований механізм прихованої контекстної realignment/adaptation, а не як довільну надбудову. Концептуально такий модуль перебуває поруч із PEFT-

підходами за метою — адаптувати поведінку моделі за обмежених ресурсів, — але відрізняється тим, що в розглянутій постановці важливим є не лише перенесення в домен, а відновлення релевантного кризового контексту за абстрактним користувацьким питанням. Для експериментального фону також доречно згадати RAG як сильний baseline зовнішнього контекстного підсилення й AdaptEval як свідчення того, що здатність LLM адаптуватися до домену вже оцінюється як окрема дослідницька проблема [8, 10].

Генерація питань та оцінювання

Для генерації питань стаття спирається не лише на практичну евристику, а й на корпусний напрям question generation. Сучасний огляд із Neural Question Generation систематизує типи входів, методи, benchmark-дані та evaluation metrics і тим самим дає коректну рамку для пояснення, чому автоматична генерація питань може використовуватися як інструмент перетворення вихідного тексту на перевірювану пару «питання — відповідь» [20].

Водночас література з QG-оцінювання прямо попереджає, що reference-based metrics є недостатніми, особливо коли на один контекст припадає лише одне референсне питання. QGEval вводить семивимірну рамку оцінювання — fluency, clarity, conciseness, relevance, consistency, answerability і answer consistency — та показує, що наявні automatic metrics часто погано узгоджуються з human judgments. Робота про те, що reference-based metrics «спростовують самі себе» у QG, посилює цей висновок: єдине reference question не дає надійної оцінки якості [11, 21].

Тому в статті доцільно поєднувати кілька типів метрик. BERTScore і BLEURT корисні як semantic/reference-based показники; PMAN і RQUGE важливі тому, що зміщують акцент до answerability і можуть краще відображати придатність питання для реального використання; retrieval-style Hit@k залишається зручною sanity-check метрикою для попередньої перевірки семантичного зв'язку питання з твітом [12, 13, 14, 15].

Попри суттєвий прогрес у crisis informatics і наявність великих кризових корпусів, більшість наявних датасетів орієнтована на tweet-level classification, informativeness detection, humanitarian categorization, priority estimation або multimodal annotation. HumAID і CrisisBench надають основу насамперед для задач класифікації та порівняння моделей на рівні повідомлень; AIDR і TREC-IS

акцентують автоматичну фільтрацію та виокремлення actionable information; CrisisMMD розширює аналіз завдяки мультимодальності, але зберігає логіку анотаційних задач. Водночас ці ресурси практично не покривають сценарій, у якому користувацький запит залишається абстрактним, а коректна відповідь визначається прихованим кризовим контекстом і має бути відновлена моделлю без прямих маркерів типу лиха в самому питанні. Отже, для верифікації прихованої контекстної адаптації LLM необхідний спеціалізований датасет, що містить пари виду «абстрактний запит — кризово-залежна відповідь», де питання семантично пов'язане з кризовим повідомленням, але не підказує подію напряду [2, 3, 4, 5, 6].

Мета дослідження

Метою роботи є розроблення методу побудови кризово-контекстного датасету для подальшої верифікації Adaptive IRM у задачах прихованої контекстної адаптації відповідей великих мовних моделей. Для досягнення цієї мети необхідно: вибрати кризовий вихідний корпус; визначити цільові категорії подій; перетворити кризові повідомлення на пари «абстрактне питання — кризово-залежна відповідь»; вилучити з питань прямі кризові маркери; реалізувати автоматичний контроль формальних обмежень генерації; сформувати підсумковий датасет; підготувати план ручної та автоматичної перевірки якості корпусу; задати event-disjoint experimental split і визначити майбутній протокол порівняння LLM-baseline, LLM+Adaptive IRM і зіставних контекстних baselines. Така постановка узгоджується з наявною літературою щодо disaster LLMs, domain adaptation evaluation і question generation evaluation, але закриває окрему, досі недостатньо представлену задачу [7, 10, 11].

Викладення основного матеріалу дослідження

Вихідні дані та конструкція датасету

Як вихідна база використовується HumAID, оскільки цей корпус достатньо великий, розмічений за реальними disaster events і вже застосовувався як ресурс для кризового машинного навчання [2]. У поточній версії датасету сформовано 41 152 записи за п'ятьма категоріями: hurricanes — 27 443; earthquakes — 6 974; cyclones — 3 933; wildfires — 2 242; floods — 560.

На відміну від вихідної класифікаційної логіки кризових корпусів, у запропонованій постановці кожен приклад перетворюється на пару виду «абстрактний запит — кризово-залежна відповідь», де питання має бути загальним і не містити слів-маркерів лиха, а вихідний твіт виступає референсною кризово-залежною відповіддю. Така конструкція створює controlled setting для перевірки того, чи зможе окремий адаптаційний механізм повернути у відповідь пропущений контекст.

Метод генерації питань

Метод побудови датасету охоплює кілька послідовних етапів: відбір вихідних кризових повідомлень, генерацію абстрактного питання, автоматичну перевірку формальних обмежень, повторну генерацію в разі порушення умов і fallback-механізм для збереження повноти корпусу.

Для кожного повідомлення з HumAID локально розгорнута LLM генерувала коротке питання, на яке вихідний твіт має давати пряму відповідь. Як генеративна модель використовувалася openai/gpt-oss-20b у форматі GGUF з MXFP4-квантизацією. Інференс виконувався через локальний endpoint, що давало змогу проводити генерацію без звернення до зовнішніх API й фіксувати використовувану конфігурацію на рівні експерименту.

Під час генерації використовувалися стохастичні параметри декодування: temperature = 0.8, top-k = 40, top-p = 0.8, min-p = 0.05, repetition penalty = 1.1. Рівень reasoning effort було встановлено як Low. Фіксований random seed не задавався, тому генерація є стохастичною, а повне посимвольне відтворення окремих питань під час повторного запуску не гарантується. Водночас відтворюваними залишаються сама процедура побудови корпусу, набір обмежень, prompt-flow і правила автоматичної валідації.

Метою генерації було отримати не довільне питання до твіта, а питання спеціального типу: воно має бути достатньо конкретним, щоб вихідний твіт був його прямою відповіддю, але водночас не має містити прямої вказівки на тип лиха. Тому prompt було побудовано навколо трьох ключових вимог:

1. питання має відображати головний зміст твіта;
2. питання має бути WH-питанням;
3. питання не має містити заборонених кризових маркерів.

У primary generation prompt моделі задавалася інструкція написати рівно одне питання. В інструкції зазначалося, що твіт має бути найкращою прямою відповіддю на це питання, а саме питання має бути коротким, природним і пов'язаним з одним конкретним фактом: числом, людиною, організацією, дією, допомогою, місцем, часом, пошкодженням, підтримкою або оновленням. Також явно заборонялися yes/но-питання, питання про хештеги, авторів, сам твіт, а також близьке копіювання вихідного формулювання. Приклад загальної логіки primary prompt наведено на Лістингу 1.

```
Task: write exactly ONE question.
```

```
Goal:
```

```
The tweet text must be the best direct answer.
```

```
Rules:
```

- Ask about the MAIN point, not a side detail.
- Ask only for information stated in the tweet.
- Use one WH-question only.
- No yes/no questions.
- Do NOT mention any disaster, crisis, emergency, hazard, or event.
- Do NOT copy or closely paraphrase the tweet.
- Keep it short.
- End with "?".

Лістинг 1 – Приклад primary generation prompt для формування одного підсумкового питання за текстом твіта

Користувачий prompt для primary generation мав мінімальну структуру: моделі передавався текст твіта, після чого вимагалось повернути лише одне підсумкове питання. Приклад користувачького prompt наведено на Лістингу 2.

```
Tweet text:
```

```
<tweet>
{{TWEET_TEXT}}
</tweet>
```

```
Write one natural question that this tweet answers directly.
Return only the question.
```

Лістинг 2 – Структура користувацького prompt для передавання тексту твіта та отримання одного підсумкового питання

Якщо згенероване питання не проходило автоматичну перевірку, запускалася retry generation. У retry prompt додатково передавалося попереднє невалідне питання, а модель отримувала інструкцію не повторювати його формулювання й згенерувати кращу заміну. Retry prompt був жорсткішим: вимагав коротшого WH-питання, фокусу на головному повідомленні твіта й заміни потенційних кризових слів нейтральними родовими іменниками, такими як amount, support, damage, group, help, place або update.

Загальна структура retry user prompt наведена на Лістингу 3.

```
Tweet text:
<tweet>
{{TWEET_TEXT}}
</tweet>
```

```
Bad previous question:
<bad_question>
{{BAD_QUESTION}}
</bad_question>
```

```
Do not reuse its wording.
Write the single best replacement question.
Return only the question.
```

Лістинг 3 – Структура retry user prompt для повторної генерації питання після невдалої автоматичної перевірки

Таким чином, генерація будувалася не як одноразовий виклик LLM, а як контрольований pipeline: спочатку виконувалася основна генерація, потім

формальна перевірка, далі повторна генерація за потреби, і лише після цього fallback.

Заборонені кризові маркери

Для запобігання прямій підказці типу лиха використовувався фіксований список заборонених слів. Він охоплював прямі назви природних і техногенних подій, а також загальні crisis-related терміни:

disaster, earthquake, quake, aftershock, aftershocks, tremor, tsunami, hurricane, cyclone, typhoon, tornado, storm, blizzard, wildfire, fire, flood, landslide, mudslide, drought, eruption, volcano, pandemic, outbreak, explosion, blast, evacuation, catastrophe, emergency.

Цей список використовувався одночасно на двох рівнях. По-перше, він включався в prompt як явне обмеження для LLM. По-друге, той самий список застосовувався в автоматичному валідаторі після генерації. Таке дублювання було необхідним, оскільки prompt-інструкції не гарантують повного дотримання обмежень, особливо за стохастичного декодування.

Автоматична валідація питань

Після генерації кожне питання проходило автоматичну перевірку. Питання вважалось валідним лише за виконання кількох умов. Воно не має бути порожнім, має починатися з WH-слова, закінчуватися знаком питання, не містити заборонених кризових маркерів, не бути yes/no-питанням і не перевищувати встановлене обмеження довжини. Додатково відкидалися шаблонні або надто слабкі формулювання, наприклад питання виду What is the key detail about..., What is reported about..., What is mentioned about..., What is the situation... і близькі до них конструкції.

На рівні валідатора перевірялися такі групи обмежень:

- наявність тексту питання;
- відсутність слів із forbidden list;
- початок питання з WH-маркера: what, who, when, where, why, which, how;
- відсутність yes/no-структури на початку питання;
- наявність фінального знака ?;
- відсутність наперед заданих bad patterns;
- обмеження довжини питання.

Якщо питання порушувало хоча б одну з цих умов, воно не включалося до підсумкового датасету напряду. Натомість виконувалася *retry generation*. Якщо повторна генерація також не давала валідного результату, застосовувався *fallback*-механізм. *Fallback* використовувався як допоміжна процедура, що дає змогу зберегти запис у корпусі навіть тоді, коли LLM не змогла згенерувати питання, яке задовольняє всі обмеження.

У поточній версії корпусу *fallback* було використано 1 432 рази, що становить 3.48% від загальної кількості записів. Це значення характеризує стійкість генеративного *pipeline*: для більшої частини корпусу питання було отримано на етапі *primary* або *retry generation*, а *fallback* застосовувався лише в обмеженій частці випадків. Водночас якість *primary*-, *retry*- і *fallback*-прикладів має бути окремо перевірена на наступному етапі за допомогою формалізованої ручної та автоматичної валідації.

Підсумкове формулювання методу

Запропонований метод будує пари виду «абстрактний запит — кризово-залежна відповідь» на основі кризових повідомлень HumAID [2]. Для кожного повідомлення локально розгорнута LLM *openai/gpt-oss-20b* генерує коротке WH-питання, яке має відображати основний зміст вихідного твіта, але не містити прямих кризових маркерів. Генерація виконується у стохастичному режимі з фіксованими параметрами декодування, після чого кожне питання проходить автоматичну перевірку за формальними критеріями: наявність WH-структури, відсутність *yes/no*-форми, відсутність заборонених слів, коректне завершення знаком питання, обмеження довжини й фільтрація небажаних шаблонних формулювань.

У разі порушення цих вимог виконується повторна генерація з жорсткішою інструкцією та передаванням попереднього невалідного питання як негативного прикладу. Якщо повторна генерація також не приводить до валідного результату, використовується *fallback*-питання. У результаті формується кризово-контекстний датасет, у якому користувацький запит навмисно залишається абстрактним, а правильна інтерпретація відповіді потребує врахування прихованого контексту події. Така постановка відрізняється від класичних задач кризової класифікації та призначена для подальшої верифікації прихованої контекстної адаптації LLM [2, 3, 7].

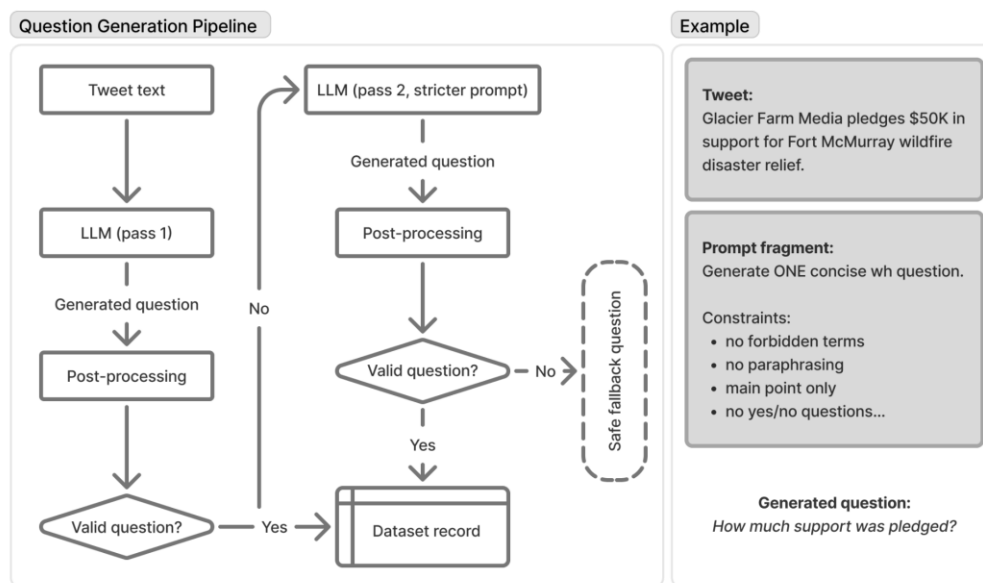


Рисунок 1. Конвеєр генерації запитань для побудови кризо-незалежних запитів на основі твітів.

Для заданого твіту LLM генерує кандидатне запитання (перший прохід), яке далі проходить постобробку та перевірку. Якщо перевірка не пройдена, виконується другий прохід генерації з використанням суворішого промпта. Якщо обидві спроби є неуспішними, використовується безпечне запасне запитання. Запитання вважається коректним, якщо воно не містить заборонених термінів, пов'язаних із кризами, не є перефразуванням вхідного твіту, відповідає формату WH-запитання та задовольняє обмеження довжини. Постобробка включає нормалізацію, зокрема виділення одного запитання та забезпечення коректного форматування. Фрагмент промпта наведено у скороченому вигляді з ілюстративною метою.

Результати

У результаті застосування запропонованого методу було сформовано кризово-контекстний датасет обсягом 41 152 записи. Датасет охоплює п'ять категорій подій: hurricanes, earthquakes, cyclones, wildfires і floods. Розподіл записів за категоріями є нерівномірним: найбільшу частку становлять повідомлення, пов'язані з ураганами, тоді як категорія повеней представлена суттєво меншою кількістю прикладів.

Таблиця 1

Розподіл записів сформованого кризово-контекстного датасету за категоріями подій

Категорія	Кількість записів
hurricanes	27 443
earthquakes	6 974
cyclones	3 933
wildfires	2 242
floods	560
Усього	41 152

Для забезпечення стійкості пайплайна використовувалася схема primary generation -> retry generation -> fallback. Fallback було задіяно у 1 432 випадках, що становить 3.48% загального обсягу корпусу. Це значення показує, що в більшості випадків питання були сформовані основним або повторним проходом, а fallback використовувався як допоміжний механізм для збереження повноти датасету.

Таблиця 2

Узагальнені показники сформованого датасету та частка використання fallback-механізму

Показник	Значення
Загальна кількість записів	41 152
Кількість категорій	5
Fallback	1 432
Fallback, %	3.48

Основним результатом цього етапу є отримання відтворюваного методу генерації кризово-контекстних пар і сформованого на його основі датасету. Запропонований корпус фіксує постановку, у якій питання залишається абстрактним і не містить прямої вказівки на тип лиха, тоді як відповідь зберігає зв'язок із конкретним кризовим повідомленням.

На наступному етапі планується провести формалізовану перевірку якості датасету. Вона має включати ручну стратифіковану валідацію, аналіз primary-, retry- і fallback-прикладів, а також автоматичну retrieval-style перевірку семантичної узгодженості між згенерованими питаннями та вихідними кризовими повідомленнями. Тому будь-які метрики якості питань і їхнього

зв'язку з вихідними твітами розглядаються в цій статті як частина майбутнього протоколу валідації, а не як уже завершений експериментальний результат.

План валідації та експериментальний дизайн

План ручної валідації

Наступним обов'язковим кроком є формалізована ручна перевірка якості датасету. Для цього пропонується використовувати стратифіковану вибірку з 500 прикладів, по 100 на кожен клас. Такий дизайн є кращим порівняно з пропорційною вибіркою, оскільки дає змогу забезпечити достатнє представництво рідкісних категорій, насамперед floods, які за пропорційного відбору могли б бути представлені надто малою кількістю прикладів. Для підвищення надійності оцінювання перевірку доцільно проводити двома незалежними анотаторами з подальшим розрахунком міжанотаторної узгодженості.

Критерії ручного оцінювання мають бути задані заздалегідь і застосовуватися однаково до всіх прикладів аудиту. Для кожного прикладу необхідно перевірити, чи є питання валідним питальним реченням; чи зберігає воно семантичний зв'язок із вихідним твітом; чи можна відповісти на нього безпосередньо за текстом твіта; чи відсутні в ньому прямі кризові маркери; чи не є воно майже дослівною копією вихідного повідомлення; чи є його формулювання природним і зрозумілим.

Такий протокол узгоджується із сучасними підходами до оцінювання question generation, у яких якість питання визначається не лише формальною подібністю до референсу, а й його answerability, consistency, clarity і придатністю для відповіді за вихідним контекстом. Зокрема, QGEval акцентує багатовимірне оцінювання якості питань, тоді як PMAN і RQUGE додатково підкреслюють важливість перевірки того, чи можна отримати відповідь на згенероване питання із заданого контексту [11, 14, 15].

За підсумками ручного аудиту планується зафіксувати кілька груп показників: загальну частку валідних питань, частку валідних питань за кожним кризовим класом, частоту порушень, пов'язаних із наявністю прямих crisis markers, рівень міжанотаторної узгодженості, а також типологію виявлених помилок. Мінімальна типологія помилок охоплює надто загальне питання, втрату answerability, приховане відсилання до типу лиха, near-cory

вихідного твіта й неприродне формулювання. Такий аналіз дасть змогу використовувати ручну перевірку не лише як інструмент контролю якості, а й як джерело дослідницьких висновків про типові обмеження запропонованого методу генерації питань.

Експериментальний план наступного етапу

Наступним етапом дослідження є реалізація Adaptive IRM і проведення контрольованого порівняння моделей в event-disjoint постановці. Оскільки HumAID охоплює 19 окремих disaster events [2], train/val/test split доцільно формувати на рівні подій, щоб уникнути інформаційного витоку між вибірками. В експериментальній частині планується порівняти базову LLM без додаткової адаптації, модель з Adaptive IRM, retrieval-augmented baseline і parameter-efficient baseline на основі PEFT. Як метрики передбачається використовувати retrieval-style Hit@k, semantic metrics BERTScore і BLEURT, answerability-oriented metrics PMAN та/або RQUGE, а також формалізоване ручне оцінювання. Такий дизайн дасть змогу перевірити, чи справді Adaptive IRM покращує відновлення прихованого кризового контексту порівняно як із чистою LLM, так і з альтернативними механізмами контекстного підсилення [2, 8, 9, 10, 11].

Висновки

У роботі запропоновано метод побудови кризово-контекстного датасету для подальшої верифікації Adaptive IRM у задачах прихованої контекстної адаптації відповідей великих мовних моделей. На відміну від наявних crisis datasets, орієнтованих переважно на tweet-level classification, informativeness detection і humanitarian categorization [2, 3, 4, 5, 6], запропонований корпус моделює ситуацію, у якій користувацький запит залишається абстрактним, а коректна відповідь визначається прихованим кризовим контекстом.

Основним результатом дослідження є сформований датасет обсягом 41 152 записи за п'ятьма категоріями кризових подій: hurricanes, earthquakes, cyclones, wildfires і floods. Для побудови корпусу було запропоновано генеративну схему, що включає primary generation, retry generation і fallback-механізм. Fallback було використано у 1 432 випадках, що становить 3.48% корпусу й характеризує роботу пайплайна з погляду повноти формування датасету.

Таким чином, внесок роботи полягає в розробленні методу перетворення кризових повідомлень на пари виду «абстрактний запит — кризово-залежна відповідь» і в отриманні датасету, придатного для подальшої перевірки прихованої контекстної адаптації LLM. Валідація якості згенерованих питань, event-disjoint split, реалізація Adaptive IRM і порівняння з baseline-підходами розглядаються як задачі наступного етапу дослідження.

У подальшій роботі необхідно: провести стратифіковану ручну валідацію корпусу на 500 прикладах із двома анотаторами; окремо проаналізувати якість primary-, retry- і fallback-прикладів; виконати автоматичну retrieval-style перевірку семантичної узгодженості питань і вихідних кризових повідомлень; зафіксувати event-disjoint split; реалізувати Adaptive IRM; виконати експериментальне порівняння LLM baseline, LLM+Adaptive IRM, RAG і PEFT-baseline; розширити набір метрик за межі формального контролю генерації. [7, 8, 9, 10, 11].

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Reuter C., Hughes A. L., Kaufhold M.-A. Social media in crisis management: An evaluation and analysis of crisis informatics research. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2018. Vol. 34, No. 4. P. 280–294. DOI: 10.1080/10447318.2018.1427832.
2. Alam F., Qazi U., Imran M., Ofli F. HumAID: Human-Annotated Disaster Incidents Data from Twitter with Deep Learning Benchmarks. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. 2021. Vol. 15, No. 1. P. 933–942. DOI: 10.1609/icwsm.v15i1.18116.
3. Alam F., Sajjad H., Imran M., Ofli F. CrisisBench: Benchmarking Crisis-related Social Media Datasets for Humanitarian Information Processing. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. 2021. Vol. 15, No. 1. P. 923–932. DOI: 10.1609/icwsm.v15i1.18115.
4. Imran M., Castillo C., Lucas J., Meier P., Vieweg S. AIDR: Artificial Intelligence for Disaster Response. *WWW '14 Companion: Proceedings of the 23rd International Conference on World Wide Web*. New York : ACM, 2014. P. 159–162. DOI: 10.1145/2567948.2577034.
5. McCreadie R., Buntain C., Soboroff I. TREC Incident Streams: Finding Actionable Information on Social Media. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2019)*. Valencia, Spain : ISCRAM Association, 2019. P. 691–705.
6. Alam F., Ofli F., Imran M. CrisisMMD: Multimodal Twitter Datasets from Natural Disasters. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. 2018. Vol. 12, No. 1. DOI: 10.1609/icwsm.v12i1.14983.
7. Lei Z., Dong Y., Li W., Ding R., Wang Q. R., Li J. Harnessing Large Language Models for Disaster Management: A Survey. *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2025*. Vienna, Austria : Association for Computational Linguistics, 2025. P. 14528–14551. DOI: 10.18653/v1/2025.findings-acl.750.

8. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Küttler H., Lewis M., Yih W.-t., Rocktäschel T., Riedel S., Kiela D. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 9459–9474. DOI: 10.5555/3495724.3496517.
9. Han Z., Gao C., Liu J., Zhang J., Zhang S. Q. Parameter-Efficient Fine-Tuning for Large Models: A Comprehensive Survey. *Transactions on Machine Learning Research*. 2024. URL: <https://openreview.net/forum?id=IIsCS8b6zj> (дата звернення: 29.04.2026).
10. Afzal A., Chalumattu R., Matthes F., Mascarell L. AdaptEval: Evaluating Large Language Models on Domain Adaptation for Text Summarization. *Proceedings of the 1st Workshop on Customizable NLP: Progress and Challenges in Customizing NLP for a Domain, Application, Group, or Individual (CustomNLP4U)*. Miami, Florida, USA : Association for Computational Linguistics, 2024. P. 76–85. DOI: 10.18653/v1/2024.customnlp4u-1.8.
11. Fu W., Wei B., Hu J., Cai Z., Liu J. QGEval: Benchmarking Multi-dimensional Evaluation for Question Generation. *Proceedings of the 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Miami, Florida, USA : Association for Computational Linguistics, 2024. P. 11783–11803. DOI: 10.18653/v1/2024.emnlp-main.658.
12. Zhang T., Kishore V., Wu F., Weinberger K. Q., Artzi Y. BERTScore: Evaluating Text Generation with BERT. *arXiv preprint arXiv:1904.09675*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1904.09675.
13. Sellam T., Das D., Parikh A. P. BLEURT: Learning Robust Metrics for Text Generation. *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Online : Association for Computational Linguistics, 2020. P. 7881–7892. DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.704.
14. Wang Z., Funakoshi K., Okumura M. Automatic Answerability Evaluation for Question Generation. *arXiv preprint arXiv:2309.12546*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2309.12546.
15. Mohammadshahi A., Scialom T., Yazdani M., Yanki P., Fan A., Henderson J., Saeidi M. RQUGE: Reference-Free Metric for Evaluating Question Generation by Answering the Question. *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2023*. Toronto, Canada : Association for Computational Linguistics, 2023. P. 6845–6867. DOI: 10.18653/v1/2023.findings-acl.428.
16. Hounsby N., Giurghi A., Jastrzebski S., Morrone B., de Laroussilhe Q., Gesmundo A., Attariyan M., Gelly S. Parameter-Efficient Transfer Learning for NLP. *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*. 2019. Vol. 97. P. 2790–2799. URL: <https://proceedings.mlr.press/v97/hounsby19a.html> (дата звернення: 29.04.2026).
17. Li X. L., Liang P. Prefix-Tuning: Optimizing Continuous Prompts for Generation. *Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing*. Online : Association for Computational Linguistics, 2021. P. 4582–4597. DOI: 10.18653/v1/2021.acl-long.353.
18. Hu E. J., Shen Y., Wallis P., Allen-Zhu Z., Li Y., Wang S., Wang L., Chen W. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*. 2022. URL: <https://openreview.net/forum?id=nZeVKeeFYf9> (дата звернення: 29.04.2026).
19. Liu H., Tam D., Muqeeth M., Mohta J., Huang T., Bansal M., Raffel C. Few-Shot Parameter-Efficient Fine-Tuning Is Better and Cheaper than In-Context Learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2022. Vol. 35. P. 1950–1965. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/hash/0cde695b83bd186c1fd456302888454c-Abstract-Conference.html (дата звернення: 29.04.2026).

20. Guo S., Liao L., Li C., Chua T.-S. A Survey on Neural Question Generation: Methods, Applications, and Prospects. Proceedings of the Thirty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2024. P. 8038–8047. DOI: 10.24963/ijcai.2024/889.
21. Nguyen B., Yu M., Huang Y., Jiang M. Reference-based Metrics Disprove Themselves in Question Generation. Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2024. Miami, Florida, USA : Association for Computational Linguistics, 2024. P. 13651–13666. DOI: 10.18653/v1/2024.findings-emnlp.798.

Received 17.03.2026.

Accepted 15.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.8

Anton Guda, Mykyta Bereziuk

METHOD FOR CONSTRUCTING A CRISIS-CONTEXT DATASET FOR ADAPTIVE IRM VERIFICATION

Abstract. Recent research in the field of crisis informatics is largely focused on the automatic processing of social media messages during emergency situations. Existing crisis corpora, including HumAID, CrisisBench, AIDR, TREC-IS, and CrisisMMD, provide an important foundation for message classification, informativeness detection, humanitarian categorization, prioritization, and multimodal annotation tasks. At the same time, most of these resources are oriented toward the analysis of individual messages or the identification of their class, rather than toward verifying the ability of a large language model to reconstruct hidden crisis context from an abstract query. With the development of large language models, there is a growing need for specialized datasets that make it possible to evaluate not only the general linguistic competence of a model, but also its ability to adapt a response to a context that is not explicitly specified in the user’s question.

The purpose of this work is to develop a method for constructing a crisis-context dataset for the subsequent verification of Adaptive IRM in tasks of hidden contextual adaptation of large language model responses. To achieve this purpose, it is proposed to transform crisis messages from the HumAID corpus into pairs of the form “abstract query — crisis-dependent answer”, where the question does not contain direct markers of the disaster type but preserves a semantic connection with the original message.

The paper proposes a generative dataset construction pipeline that includes primary generation, retry generation, and a fallback mechanism. For each crisis message, a locally deployed large language model generates a short WH-question to which the original tweet should provide a direct answer. After generation, the question undergoes automatic validation according to formal criteria: the presence of an interrogative

structure, the absence of a yes/no form, ending with a question mark, compliance with the length limit, the absence of undesirable template-like formulations, and the absence of direct crisis markers such as earthquake, hurricane, flood, disaster, emergency, and others. If the initial question does not meet the specified requirements, a retry generation step is performed using a stricter instruction. In case of a repeated failure, a fallback question is applied, which makes it possible to preserve the completeness of the corpus. As a result, a dataset of 41,152 records was formed across five categories of crisis events: hurricanes, earthquakes, cyclones, wildfires, and floods. The fallback mechanism was used in 1,432 cases, which accounts for 3.48% of the corpus.

The main result of the study is a method for transforming crisis messages into “abstract query — crisis-dependent answer” pairs and the dataset constructed on its basis for the future verification of hidden contextual adaptation in LLMs. The proposed approach differs from classical crisis datasets in that it models a situation in which the question does not directly indicate the type of disaster, while the correct answer requires taking into account the hidden context of the event. Future work includes formalized manual validation of the corpus, automatic retrieval-style verification of semantic consistency, construction of an event-disjoint split, implementation of Adaptive IRM, and comparison with LLM-baseline, RAG, and PEFT-baseline approaches.

Keywords: crisis-context dataset, large language models, hidden contextual adaptation, Adaptive IRM, question generation, crisis informatics, HumAID, question generation, dataset validation.

Гуда Антон Ігоревич – д.т.н., професор, каф. «Комп’ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, УДУНТ, ORCID 0000-0003-1139-1580, atu.guda@gmail.com.

Березюк Микита Олександрович – аспірант, каф. «Комп’ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, УДУНТ, ORCID 0009-0000-2205-3611, nikitber@hotmail.com.

Guda Anton – professor, dep. “Computer and Information Technology”, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST, ORCID 0000-0003-1139-1580, atu.guda@gmail.com.

Bereziuk Mykyta – post-graduate student, dep. “Computer and Information Technology”, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST, ORCID 0009-0000-2205-3611, nikitber@hotmail.com.

ДИНАМІКА ГЛИБИННОГО ВІБРАТОРА З УРАХУВАННЯМ ПОСТУПАЛЬНОГО ТА КУТОВОГО РУХУ РОБОЧОГО ОРГАНА

Анотація. У статті розглянуто динаміку глибокого вібратора для ущільнення бетонних сумішей з урахуванням поступального та кутового руху його робочого органа. Побудовано розрахункову схему глибокого вібратора як просторової коливальної системи, у якій корпус прийнято твердим тілом із шістьма ступенями вільності, а дія бетонної суміші врахована через приєднану масу, пружний та непружний опір середовища. Розглянуто роботу дебалансного вібробуджувача з двома неврівноваженими вантажами, розташованими на валу з відповідними ексцентриситетами та кутом взаємного розвороту. Одержано аналітичні залежності для визначення відцентрових сил, результуючого моменту, приведеної маси системи, амплітуди поступальних коливань центра мас та амплітуди кутових коливань корпусу. Показано, що рух глибокого вібратора не можна зводити лише до горизонтальних коливань, оскільки дія дебалансних вантажів формує обертову рівнодіючу силу та результуючий момент, які спричиняють складний просторовий рух робочого органа. Встановлено, що траєкторія довільної точки корпусу залежить від її відстані до центра мас, кута розвороту дебалансних вантажів, моменту інерції, частоти обертання вала та приєднаної маси бетонної суміші. Доведено, що зміна кута розвороту дебалансів дозволяє регулювати співвідношення між поступальною та кутовою складовими руху, а отже впливати на характер передавання вібраційної енергії в бетонну суміш. Одержані результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів глибоких вібраторів, вибору раціональних режимів ущільнення, зменшення ризику розшарування суміші та подальшої оптимізації форми робочого органа.

Ключові слова: глибокий вібратор, бетонна суміш, ущільнення, дебалансний вібробуджувач, поступальний рух, кутовий рух, динамічна модель, відцентрова сила, результуючий момент, приєднана маса, траєкторія коливань.

Постановка проблеми. Глибинні вібратори належать до найбільш поширених засобів ущільнення бетонних сумішей під час виготовлення монолітних і збірних залізобетонних конструкцій, однак ефективність їх роботи істотно залежить від характеру коливального руху робочого органа та умов передавання вібраційної енергії в об’єм суміші. На відміну від поверхневого вібраційного обладнання, глибинний вібратор взаємодіє безпосередньо з внутрішніми шарами бетонної суміші, тому його динаміка визначає інтенсивність руйнування внутрішніх структурних зв’язків, видалення повітряних включень, перерозподіл цементного тіста та заповнювача, а також формування щільної і однорідної структури бетону.

У реальних умовах роботи рух корпусу глибинного вібратора не обмежується лише простими горизонтальними коливаннями. Через дію дебалансного віброзбуджувача, розміщення неврівноважених мас, їх ексцентриситет, кутову швидкість обертання та взаємодію з бетонною сумішшю робочий орган може здійснювати складний просторовий рух, який поєднує поступальні переміщення центра мас і кутові коливання навколо нього. При цьому траєкторії окремих точок корпусу можуть відрізнятися за амплітудою, напрямом і кутом нахилу площини коливань, що безпосередньо впливає на характер ущільнення суміші в різних зонах навколо вібратора.

Недостатньо обґрунтовані параметри глибинного вібратора можуть призводити до нерівномірного ущільнення, утворення зон зниженої щільності, локального розшарування бетонної суміші, осідання крупного заповнювача або надмірного вібраційного впливу на вже ущільнені шари. Особливо це проявляється за роботи з бетонними сумішами різної рухливості та реологічних властивостей, коли однакові режими вібрації можуть давати різний технологічний результат. У зв’язку з цим виникає потреба в побудові динамічної моделі глибинного вібратора, яка враховує масово-інерційні параметри робочого органа, дію дебалансного збуджувача, приєднану масу бетонної суміші, сили пружного та непружного опору середовища.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях бетонних і залізобетонних конструкцій значну увагу приділено підвищенню їх міцності, тріщиностійкості, довговічності та надійності роботи за рахунок удосконалення складу бетону, армування, умов формування структури

матеріалу та технологічних режимів виготовлення. Зокрема, у працях [1, 2] розглянуто питання підвищення несучої здатності та експлуатаційних характеристик бетонних елементів, що підтверджує важливість забезпечення якісної внутрішньої структури бетону ще на етапі його укладання та ущільнення.

Важливе теоретичне підґрунтя для дослідження процесів ущільнення бетонних сумішей становлять роботи, присвячені реологічним властивостям свіжого бетону. У праці [3] показано, що поведінка бетонної суміші у свіжому стані залежить від складу, вмісту цементного тіста, водоцементного відношення, характеристик заповнювачів і хімічних добавок. Це має безпосереднє значення для вибору параметрів вібраційного впливу, оскільки однакові режими роботи глибинного вібратора можуть по-різному впливати на суміші з різною рухливістю та структурно-механічними властивостями.

Окремий напрям становлять дослідження стійкості бетонних сумішей у свіжому стані та запобігання їх розшаруванню. У роботі [4] проаналізовано стабільність вертикальних шарів свіжого бетону, що є важливим для оцінювання здатності суміші зберігати однорідність під дією власної ваги та зовнішніх технологічних впливів. У дослідженні [5] встановлено, що вібраційно зумовлена сегрегація може негативно впливати на механічні властивості бетону та його проникність для хлорид-іонів. Це підтверджує необхідність обґрунтованого вибору амплітудно-частотних параметрів глибинного вібратора.

Безпосередньо вплив глибинного, або покерного, вібрування на осідання заповнювача у свіжому бетоні розглянуто в роботі [6]. Показано, що характер переміщення заповнювача істотно залежить від реологічних властивостей суміші та параметрів вібраційної дії. Це має принципове значення для побудови динамічної моделі глибинного вібратора, оскільки рух робочого органа повинен забезпечувати достатню інтенсивність ущільнення без надмірного розшарування матеріалу.

У роботі [7] запропоновано підхід до локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів у зону ущільнення бетонної суміші. Такий напрям є перспективним, оскільки дозволяє поєднати механічну вібраційну дію з локальним регулюванням властивостей суміші безпосередньо

в зоні роботи глибинного вібратора. Це створює передумови для підвищення ефективності ущільнення, особливо у випадках роботи з жорсткими або неоднорідними бетонними сумішами.

Фундаментальні положення щодо роботи вібраційних машин будівельної індустрії, принципів збудження коливань, динаміки робочих органів і взаємодії вібраційного обладнання з технологічним середовищем наведено у працях [8, 9]. У цих джерелах розглянуто загальні закономірності формування вібраційного впливу, параметри коливальних систем і особливості ущільнення бетонних сумішей за допомогою вібраційних машин. Разом з тим питання просторового руху глибинного вібратора, впливу розміщення дебалансних вантажів, приєднаної маси бетонної суміші та траєкторій руху окремих точок корпусу потребують подальшого уточнення.

Мета досліджень. Метою досліджень є розроблення та обґрунтування динамічної моделі глибинного вібратора для ущільнення бетонних сумішей з урахуванням поступального руху центра мас, кутових коливань робочого органа, дії дебалансного віброзбуджувача та взаємодії корпусу вібратора з бетонною сумішшю, а також встановлення рівнянь руху, які дозволяють оцінити вплив конструктивних і режимних параметрів на траєкторію коливань робочого органа.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Для дослідження динаміки глибинного вібратора його робочий орган розглядається як просторова коливальна система, що безпосередньо взаємодіє з бетонною сумішшю. На відміну від поверхневих вібраційних машин, які передають коливання через опалубку або зовнішню поверхню виробу, глибинний вібратор занурюється в об'єм суміші та створює локальну зону інтенсивної вібраційної дії. У цій зоні відбувається зменшення внутрішнього тертя між частинками, руйнування слабких структурних зв'язків, видалення повітряних включень і ущільнення бетонної суміші. Ефективність такого процесу визначається не лише частотою обертання дебалансного вала, а й характером просторового руху корпусу, амплітудами поступальних і кутових коливань, формою наконечника та умовами взаємодії з бетонною сумішшю.

У розрахунковій схемі глибинний вібратор (рисунок 1) приймається як тверде тіло масою M_1 , яке не деформується під час роботи. Нижня частина

корпусу має округлену форму із середнім радіусом R_c , а верхня частина обмежується зовнішнім і внутрішнім циліндрами. Така геометрія дає можливість розглядати робочий орган як просторову систему, у якій різні точки корпусу мають неоднакові траєкторії руху.

Він являє собою вал, установлений на підшипниках співвісно з вертикальною віссю корпусу. На валу розміщено два дебалансні вантажі: верхній масою m_v та нижній масою m_n . Вони мають відповідні ексцентриситети r_v і r_n та розташовані на відстанях h_v і h_n від центра мас робочого органа O . Обертання від електродвигуна передається через еластичну муфту, що дає змогу зменшити вплив ударних навантажень і компенсувати незначні перекоси в приводі. Площини, які проходять через вісь вала та центри мас дебалансних вантажів, утворюють між собою кут розвороту α . Саме цей кут істотно впливає на співвідношення між поступальним і кутовим рухом корпусу глибинного вібратора.

Для опису положення глибинного вібратора в просторі використовуються три системи координат. Перша – нерухома система $O'xyz$, яка є абсолютною та служить для опису положення робочого органа в просторі. Друга – рухома система $Ox'y'z'$, початок якої збігається з центром мас глибинного вібратора, а осі залишаються паралельними відповідним осям нерухомої системи. Третя система координат жорстко пов'язана з корпусом вібратора та використовується для опису його кутового положення. У положенні статичної рівноваги всі три системи координат збігаються, а координати центра мас позначаються як X_0, Y_0, Z_0 .

Перехід від рухомої системи координат до системи, жорстко пов'язаної з тілом, доцільно виконувати за допомогою кутів Ейлера. Для цього послідовно здійснюються три повороти: перший – навколо осі Oy' на кут ψ , другий – навколо нового положення осі Ox' на кут θ , третій – навколо вертикальної осі корпусу на кут φ (рисунок 2). Оскільки в робочому режимі кутові коливання глибинного вібратора є малими і не перевищують приблизно 0,01 рад, тригонометричні функції можна розкласти та обмежитися першими членами. Тоді малі кути ψ, θ, φ можна розглядати як повороти корпусу відносно відповідних координатних осей.

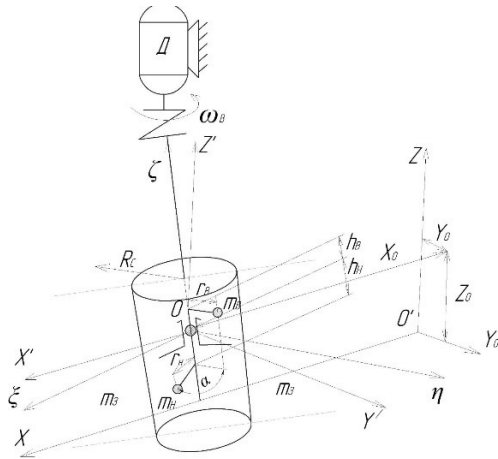


Рисунок 1 – Принципова схема глибинного вібратора

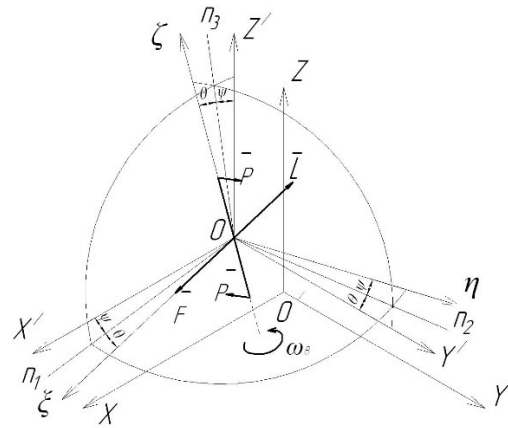


Рисунок 2 – Перетворення системи координат та динамічний гвинт що обертається

При малих кутових переміщеннях матриця напрямних косинусів між рухомою та нерухомою системами координат набуває спрощеного вигляду:

$$\begin{bmatrix} 1 & \varphi & -\psi \\ -\varphi & 1 & \theta \\ \psi & -\theta & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Тому перетворення координат довільної точки корпусу можна подати у лінеаризованій формі:

$$\begin{cases} x = x' + \varphi y' - \psi z', \\ y = -\varphi x' + y' + \theta z', \\ z = \psi x' - \theta y' + z'. \end{cases} \quad (2)$$

Таке представлення дозволяє поєднати поступальні переміщення центра мас і кутові коливання корпусу в єдиній динамічній моделі. Це особливо важливо для глибинного вібратора, оскільки під час роботи окремі точки його поверхні рухаються не однаково: центр мас може здійснювати рух, близький до колового у горизонтальній площині, а периферійні точки додатково отримують вертикальні складові переміщень через кутові коливання корпусу.

При обертанні дебалансного вала з кутовою швидкістю ω на верхній і нижній дебалансні вантажі діють відцентрові сили:

$$F_B = m_B r_B \omega^2 \quad (3)$$

$$F_H = m_H r_H \omega^2 \quad (4)$$

Ці сили обертаються разом із валом і є взаємно нерухомими відносно нього. Відносно центра мас О вони створюють моменти:

$$L_B = F_B h_B = m_B r_B \omega^2 h_B, \quad (5)$$

$$L_H = F_H h_H = m_H r_H \omega^2 h_H. \quad (6)$$

Просторова система сил у загальному випадку може бути зведена до динамічного гвинта, то дія двох дебалансних вантажів на корпус глибинного вібратора зводиться до обертової рівнодіючої сили та результуючого моменту.

З урахуванням кута розвороту дебалансних вантажів α рівнодіюча вимушуючих сил визначається як:

$$F = \sqrt{F_B^2 + F_H^2 + 2F_B F_H \cos \alpha} \quad (7)$$

Результуючий момент вимушуючих сил відповідно дорівнює:

$$L = \sqrt{L_B^2 + L_H^2 + 2L_B L_H \cos \alpha} \quad (8)$$

Площина дії результуючого моменту залишається перпендикулярною до рівнодіючої вимушуючих сил. Саме тому рух глибинного вібратора не можна зводити лише до поступальних коливань. У загальному випадку він складається з переміщення центра мас і обертання корпусу навколо нього. Це визначає складний просторовий характер траєкторій точок робочого органа.

Під час складання диференціальних рівнянь руху прийнято такі припущення: вплив бетонної суміші масою M_3 враховується через коефіцієнт приєднаної маси k_M ; сили, що виникають під час деформації бетонної суміші в робочому діапазоні, пропорційні переміщенням корпусу; сили непружного опору пропорційні швидкості переміщення та напрямлені протилежно руху; кутові переміщення і кутові швидкості корпусу є малими. У завантаженому матеріалі для розрахункової схеми прийнято, що коефіцієнт приєднаної маси може перебувати в межах $k_M = 0,2 \dots 0,8$.

Приведена маса коливальної системи визначається залежністю:

$$M = M_1 + k_M \cdot M_3 \quad (9)$$

де M_1 – маса глибинного вібратора; M_3 – маса бетонної суміші, що залучається до коливального руху; k_M – коефіцієнт приєднаної маси.

Поступальний рух центра мас глибинного вібратора описується на основі теореми про рух центра мас механічної системи. У проєкціях на координатні осі система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + k_x\dot{x} + C_x x = F_x(t) \\ M\ddot{y} + k_y\dot{y} + C_y y = F_y(t), \\ M\ddot{z} + k_z\dot{z} + C_z z = F_z(t) \end{cases} \quad (10)$$

де x, y, z – переміщення центра мас глибинного вібратора; k_x, k_y, k_z – коефіцієнти непружного опору переміщенням у напрямках відповідних осей; C_x, C_y, C_z – коефіцієнти жорсткості взаємодії системи з середовищем; $F_x(t), F_y(t), F_z(t)$ – проєкції рівнодіючої вимушуючих сил.

Оскільки основний технологічний рух глибинного вібратора формується в горизонтальній площині, для симетричного корпусу можна прийняти:

$$C_x = C_y = C, k_x = k_y = k. \quad (11)$$

Тоді горизонтальні переміщення центра мас описуються рівняннями:

$$M\ddot{x} + k\dot{x} + Cx = F \cos \omega t, \quad (12)$$

$$M\ddot{y} + k\dot{y} + Cy = F \sin \omega t. \quad (13)$$

Розв’язок цих рівнянь для сталого режиму роботи має вигляд:

$$x = A_0 \cos(\omega t - \beta), \quad (14)$$

$$y = A_0 \sin(\omega t - \beta). \quad (15)$$

де A_0 – амплітуда горизонтальних коливань центра мас; β – початкова фаза горизонтальних коливань.

Амплітуда горизонтальної складової коливань визначається залежністю:

$$A_0 = \frac{F}{\sqrt{(C - M\omega^2)^2 + (k\omega)^2}} \quad (16)$$

Для випадку, коли глибинний вібратор працює в далеко зарезонансному режимі, тобто коли ω істотно перевищує власну частоту системи, амплітуда може бути подана у спрощеному вигляді:

$$A_0 \approx \frac{F}{M\omega^2} \quad (17)$$

З огляду на те, що вимушуюча сила пропорційна ω , у зарезонансному режимі амплітуда поступальних коливань значною мірою визначається відношенням дебалансного моменту до приведеної маси системи. Це означає, що збільшення маси дебаланса або його ексцентриситету збільшує амплітуду коливань, тоді як збільшення приєднаної маси бетонної суміші зменшує її.

Обертальний рух глибинного вібратора навколо центра мас визначається динамічними рівняннями Ейлера. У загальному вигляді вони враховують моменти інерції корпусу відносно головних центральних осей, проєкції кутової швидкості та дію моментів вимушуючих сил. Після вираження проєкцій кутової швидкості через кути Ейлера отримується нелінійна система рівнянь. Однак через малі значення кутових коливань її можна лінеаризувати. Нехтуючи членами, що містять добутки кутових швидкостей і добутки швидкостей на кутові переміщення, отримаємо систему:

$$\begin{cases} J_x \ddot{\psi} + k_\psi \dot{\psi} + C_\psi \psi = L_x(t), \\ J_y \ddot{\theta} + k_\theta \dot{\theta} + C_\theta \theta = L_y(t), \\ J_z \ddot{\phi} + k_\phi \dot{\phi} + C_\phi \phi = L_z(t). \end{cases} \quad (18)$$

де J_x, J_y, J_z – моменти інерції глибинного вібратора відносно головних центральних осей; ψ, θ, ϕ – кути повороту корпусу; k_ψ, k_θ, k_ϕ – коефіцієнти непружного опору кутовим переміщенням; C_ψ, C_θ, C_ϕ – коефіцієнти жорсткості при кутових переміщеннях; $L_x(t), L_y(t), L_z(t)$ – проєкції результуючого моменту вимушуючих сил.

Для симетричного відносно вертикальної осі глибинного вібратора можна прийняти: $J_x = J_y = J, C_\psi = C_\theta = C_\phi, k_\psi = k_\theta = k_\phi$

Тоді обертання корпусу відносно центральної горизонтальної осі у вертикальній площині можна описати рівнянням:

$$J\ddot{\theta} + k_{\theta}\dot{\theta} + C_{\theta}\theta = L\cos(\omega t - \gamma), \quad (19)$$

де γ – початкова фаза кутових коливань.

Амплітуда кута повороту корпусу відносно центральної горизонтальної осі дорівнює:

$$B_0 = \frac{L}{\sqrt{(C_{\theta} - J\omega^2)^2 + (k_{\theta}\omega)^2}} \quad (20)$$

У зарезонансному режимі ця залежність спрощується до вигляду:

$$B_0 \approx \frac{L}{J\omega^2} \quad (21)$$

Отже, кутові коливання глибинного вібратора визначаються моментом вимушуючих сил і моментом інерції корпусу. Збільшення відстані дебалансів від центра мас збільшує моментну дію, а збільшення моменту інерції корпусу зменшує амплітуду кутових коливань.

Загальний розв’язок рівнянь руху складається з двох частин: розв’язку однорідних рівнянь, що описує вільні коливання системи, та часткового розв’язку неоднорідних рівнянь, який описує вимушені коливання. Оскільки в реальній системі наявні сили непружного опору, вільні коливання поступово затухають. Тому в сталому режимі основне значення мають вимушені коливання, зумовлені обертанням дебалансного вала.

Горизонтальні коливання центра мас викликаються обертовою рівнодіючою силою F , а вертикальні складові руху окремих точок корпусу виникають внаслідок обертання глибинного вібратора навколо центра мас під дією результуючого моменту L . Оскільки площина дії моменту перпендикулярна до рівнодіючої сили, між горизонтальними та вертикальними складовими коливань виникає фазове зміщення, яке визначає просторовий характер траєкторії точок корпусу.

Для визначення траєкторії руху довільної точки глибинного вібратора розглянемо точку K , розташовану на відстані r_1 від центра мас. Центр мас O здійснює рух у горизонтальній площині Oxy по колу радіусом A_0 . Усі точки центральної площини глибинного вібратора, що проходить через центр мас і перпендикулярна до осі дебалансного вала, мають горизонтальні проєкції

траєкторій у вигляді кіл. Водночас через кутові переміщення корпусу вони отримують вертикальні складові коливань, амплітуди яких пропорційні відстані від центра мас:

$$B_1 = B_0 r_1. \quad (22)$$

Точки, які не лежать у центральній площині, мають вертикальні складові амплітуд, що залежать не тільки від відстані r_1 , а й від кута δ між радіус-вектором точки та центральною площиною корпусу:

$$B_2 = B_0 r_1 \cos \delta \quad (23)$$

Для центральної площини при $\delta = 0$ ця залежність переходить у попередню. Отже, вертикальна складова коливань довільної точки визначається її просторовим положенням відносно центра мас і центральної площини корпусу.

Горизонтальна складова амплітуди коливань точки, яка не лежить у центральній площині, може бути подана як:

$$A_2 = A_0 + B_0 r_1 \sin \delta. \quad (24)$$

Повна амплітуда коливань довільної точки корпусу визначається залежністю:

$$A_K = \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \quad (25)$$

Кут нахилу площини траєкторії коливань довільної точки до горизонтальної площини дорівнює:

$$\tan \varepsilon = \frac{B_2}{A_2} \quad (26)$$

Звідси випливає, що будь-яка точка корпусу глибинного вібратора під час роботи рухається по просторовій замкненій кривій, яка в загальному випадку має форму еліпса. На горизонтальну площину Oxy траєкторія проектується у вигляді кола, а на вертикальні площини – у вигляді еліпса або його вироджених форм. При певних співвідношеннях параметрів дебалансів траєкторія може переходити в колову або дугову форму.

Особливий інтерес становлять два граничні випадки розвороту дебалансних вантажів. Якщо $m_B = m_H, r_B = r_H, h_B = h_H, \alpha = 0^\circ$, то відцентрові

сили діють синфазно. У такому випадку результуючий момент може бути відсутнім або мінімальним, а корпус глибинного вібратора здійснює переважно поступальний рух по колу радіусом A_0 . Усі точки корпусу мають однакову або близьку за характером горизонтальну траєкторію.

Якщо за тих самих умов $\alpha = 180^\circ$, то рівнодіюча вимушуючих сил може дорівнювати нулю, тобто $F = 0$, і центр мас залишається нерухомим або має мінімальні переміщення. У цьому випадку рух визначається переважно моментною дією, а окремі точки корпусу здійснюють коливання по плоских кривих, близьких до дуг кіл. Таким чином, зміна кута розвороту дебалансних вантажів дозволяє змінювати співвідношення між поступальною та кутовою складовими руху глибинного вібратора.

Висновки: Розроблено динамічну модель глибинного вібратора для ущільнення бетонних сумішей, у якій робочий орган розглянуто як просторову коливальну систему з урахуванням поступального руху центра мас, кутових коливань корпусу, дії дебалансного віброзбуджувача та взаємодії з бетонною сумішшю. Встановлено, що дія дебалансних вантажів формує обертову рівнодіючу силу та результуючий момент, які визначають просторову траєкторію руху робочого органа і співвідношення між горизонтальними та вертикальними складовими коливань. Показано, що зміна кута розвороту дебалансних вантажів, частоти обертання, моменту інерції та приєднаної маси бетонної суміші дозволяє керувати характером вібраційного впливу, що може бути використано для підвищення ефективності ущільнення та зменшення ризику розшарування бетонної суміші.

ЛІТЕРАТУРА

1. Improving bond performance of ribbed steel bars embedded in recycled aggregate concrete using steel mesh fabric confinement / S. Fayed та ін. Construction and Building Materials. 2023. Т. 369. С. 130452. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130452>
2. Bending performance of dapped-end beams having web opening: Experimental and numerical investigation / C. Aksoylu та ін. Structures. 2023. Т. 48. С. 736–753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.110>
3. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review / D. Jiao та ін. Cement and Concrete Composites. 2017. Т. 83. С. 146–159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016>
4. Torelli G., Lees J. M. Fresh state stability of vertical layers of concrete. Cement and Concrete Research. 2019. Т. 120. С. 227–243. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.006>

5. Gao X., Zhang J., Su Y. Influence of vibration-induced segregation on mechanical property and chloride ion permeability of concrete with variable rheological performance. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 194. P. 32–41. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.019>
6. Zhang J., Gao X., Su Y. Influence of Poker Vibration on Aggregate Settlement in Fresh Concrete with Variable Rheological Properties. Journal of Materials in Civil Engineering. 2019. T. 31, № 7. С. 04019128. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002782](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002782)
7. Нестеренко М. М., Склярєнко Т. О., Бугрова Т. М., Гавріков В. В. Система локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів в зону ущільнення бетонної суміші. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава, 24 квіт. 2025 р. Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025. С. 38–40.
8. Назаренко І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. М. ; Київ : КНУБА, 2007. 230 с.
9. Maslov A. G., Itkin A. F., Salenko Y. S. Vibratsionnyie mashinyi dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnyih smesey : Kremenchuk : PP Cherbatyh, 2014. 324 с.

Received 18.03.2026.

Accepted 13.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.928.23

Havrikov V., Buhrova T.

DYNAMICS OF AN INTERNAL VIBRATOR CONSIDERING THE TRANSLATIONAL AND ANGULAR MOTION OF THE WORKING BODY

Abstract. *The article considers the dynamics of an internal vibrator for compacting concrete mixtures, taking into account the translational and angular motion of its working body. A calculation scheme of the internal vibrator is developed as a spatial oscillatory system in which the housing is assumed to be a rigid body with six degrees of freedom, while the action of the concrete mixture is considered through the added mass, elastic resistance, and inelastic resistance of the medium. The operation of an unbalanced vibration exciter with two unbalanced masses mounted on the shaft with corresponding eccentricities and a mutual phase angle is considered. Analytical dependencies are obtained for determining centrifugal forces, the resulting moment, the reduced mass of the system, the amplitude of translational oscillations of the center of mass, and the amplitude of angular oscillations of the housing. It is shown that the motion of the internal vibrator cannot be reduced only to horizontal oscillations, since the action of the unbalanced masses forms a rotating resultant force and a resulting moment, which cause complex spatial motion of the working body. It is established that the trajectory of an arbitrary point of the housing depends on its distance from the center of mass, the phase angle of the unbalanced masses, the moment of inertia, the shaft*

rotation frequency, and the added mass of the concrete mixture. It is proved that changing the phase angle of the unbalanced masses makes it possible to regulate the ratio between the translational and angular components of motion and, consequently, to influence the nature of vibration energy transmission into the concrete mixture. The obtained results can be used to substantiate the parameters of internal vibrators, select rational compaction modes, reduce the risk of mixture segregation, and further optimize the shape of the working body.

Keywords: *internal vibrator, concrete mixture, compaction, unbalanced vibration exciter, translational motion, angular motion, dynamic model, centrifugal force, resulting moment, added mass, oscillation trajectory.*

REFERENCES

1. Fayed, S., Madenci, E., Özkiliç, Y. O., & Mansour, W. (2023). Improving bond performance of ribbed steel bars embedded in recycled aggregate concrete using steel mesh fabric confinement. *Construction and Building Materials*, 369, 130452. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130452>
2. Aksoylu, C., Özkiliç, Y. O., Çeledir, E., & Arslan, M. H. (2023). Bending performance of dapped-end beams having web opening: Experimental and numerical investigation. *Structures*, 48, 736–753. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.110>
3. Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. (2017). Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete—A review. *Cement and Concrete Composites*, 83, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016>
4. Torelli, G., & Lees, J. M. (2019). Fresh state stability of vertical layers of concrete. *Cement and Concrete Research*, 120, 227–243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.006>
5. Gao, X., Zhang, J., & Su, Y. (2019). Influence of vibration-induced segregation on mechanical property and chloride ion permeability of concrete with variable rheological performance. *Construction and Building Materials*, 194, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.019>
6. Zhang, J., Gao, X., & Su, Y. (2019). Influence of poker vibration on aggregate settlement in fresh concrete with variable rheological properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 04019128. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002782](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002782)
7. Nesterenko, M. M., Skliarenko, T. O., Buhrova, T. M., & Havrikov, V. V. (2025). Systema lokalnoi podachi tsementnoho molochka abo modyfikuiuchykh komponentiv v zonu ushchilnennia betonnoi sumishi [System of local supply of cement slurry or modifying components to the compaction zone of concrete mixture]. In *Stvorennia, ekspluatatsiia i remont avtomobilnoho transportu ta budivelnoi tekhniki: Materialy VIII Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (Poltava, April 24, 2025) (pp. 38–40). National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”.
8. Nazarenko, I. I. (2007). *Vibratsiini mashyny i protsesy budivelnoi industrii: Navchalnyi posibnyk* [Vibration machines and processes of the construction industry: Textbook]. KNUBA.
9. Maslov, A. G., Itkin, A. F., & Salenko, Y. S. (2014). *Vibratsionnyie mashinyi dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnyih smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes]. PP Cherbatyh.

Гавріков Володимир Володимирович – аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, Полтава, Україна, 36011, vhavrikov@gmail.com ORCID: 0009-0007-6893-7739

Бугрова Тетяна Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, Полтава, Україна, 36011, nning.t_nesterenko@nupp.edu.ua ORCID: 0000-0003-2690-4131

Volodymyr Havrikov – Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011,
E-mail: vhavrikov@gmail.com ORCID: 0009-0007-6893-7739

Tetiana Buhrova – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering and Technology National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011,
E-mail nning.t_nesterenko@nupp.edu.ua ORCID: 0000-0003-2690-4131

**CYBERSECURITY OF AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS OF
ELECTRIC POWER COMPLEXES IN THE MINING AND
PROCESSING INDUSTRY**

Abstract. *The implementation of digital manufacturing concepts and intelligent sensor networks in the mining and processing industry exponentially increases the risk of targeted cyberattacks on enterprises' electric power complexes, where interference with algorithms can cause technogenic disasters. To enhance the cyber resilience of automated information systems, a comprehensive architectural model based on the Defense-in-Depth concept has been developed. A multi-level infrastructure is proposed, featuring microsegmentation of industrial networks, Deep Packet Inspection for basic industrial protocols, hardening operating system configurations on engineering workstations, and the use of microkernel platforms for network gateways. It is demonstrated that combining international security standards with predictive hardware monitoring of programmable logic controller supply currents reliably prevents software-based control-logic spoofing, effectively mitigates intrusion vectors, and guarantees the continuity of energy-efficient control in raw-material processing operations.*

Keywords: *cybersecurity, mining and processing plant, automated information system, Defense-in-Depth, programmable logic controllers, electric power complex, IEC 62443.*

Problem Statement. The operation of mining and processing plants (MPPs) as fundamental links of critical infrastructure determines the stability of the raw material base for the metallurgical industry and the economic security of the state as a whole. The strategic importance of these enterprises dictates stringent reliability requirements for their electric power complexes, which supply power to the most energy-intensive production stages: grinding, classification, and magnetic separation of iron ore raw materials. Any interference with power supply control algorithms can cause not only massive economic losses due to equipment downtime

but also industrial accidents and technogenic disasters, such as the clogging of autogenous grinding mills or the disruption of tailings management facilities.

The current stage of the industry's development is characterized by a transition from isolated local systems to extensive automated information systems (AIS). The convergence of information technology (IT) and operational technology (OT) enables the optimization of specific power consumption per ton of concentrate; however, it also widens the range of potential cyber threats. The use of open data transmission protocols (Modbus TCP, IEC 60870-5-104, OPC UA) and the implementation of intelligent protection and monitoring devices make the digital infrastructure of power complexes vulnerable to targeted attacks aimed at manipulating telemetry data or directly intercepting the control of industrial controllers.

Despite the existence of general information security standards, the issue of protecting specific electric power nodes of MPPs, where technological and energy parameters are tightly interconnected, remains insufficiently researched. This highlights the need to develop comprehensive approaches to ensuring the cyber resilience of AIS that account for both the architectural features of industrial networks and the dynamics of transient processes in high-power electric drives of grinding equipment.

Analysis of Recent Research and Publications. When analyzing the primary threats and vulnerabilities, it is pertinent to begin with those targeting Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems. Historically, SCADA systems, which form the control foundation for automated electric power complexes, were designed as isolated segments (air-gapped networks), with priority given to the continuity of the technological process rather than protection against external intrusions. The convergence of IT and OT infrastructures, along with the transition to standardized protocol stacks, creates new critical attack vectors [1]. Based on the classification proposed in the cited work, it is advisable to examine threats to SCADA in the energy sector through the lens of the information security triad (CIA triad), taking into account industrial specifics:

1. Compromise of availability: implemented via DDoS attacks on data acquisition servers, intentional overloading of network equipment, or physical

damage to communication channels. In the energy sector, this results in the operator's loss of view of the technological process.

2. Compromise of integrity: telemetry data spoofing (false data injection), modification of protective relay settings, or unauthorized changes to the configuration of switching devices. The lack of cryptographic protection in fundamental industrial protocols leaves the system vulnerable to Man-in-the-Middle (MitM) attacks.

3. Compromise of confidentiality: interception of operational status information and power consumption scheduling data, which is most often a reconnaissance stage in preparation for more complex, targeted attacks.

Specific threats to the mining and processing industry are discussed in [2]. This research applies fuzzy logic methods and identifies three priority targets for cyberattacks at such enterprises: databases, internal communication networks, and the equipment itself. Typical attack scenarios have been identified for each level of process automation.

Of particular concern are the destructive impacts on the power-supply subsystems of energy-intensive units. A sudden power disconnection to the main electric drives of grinding mills or the shutdown of tailings pumping stations under load causes more than just a cycle interruption. Such incidents lead to the clogging of the equipment's working space, require lengthy scheduled unloading operations, and are accompanied by colossal inrush currents during the subsequent restart, which exponentially increases the risk of damage to the stator winding insulation and the failure of power transformers.

The security of industrial controllers represents a distinct challenge. The level of programmable logic controllers (PLCs), which directly control power circuits, has its own spectrum of vulnerabilities. The study [3] examines in detail the complex nature of threats associated with Control Logic Injection attacks, which can lead to the physical sabotage of production processes, specifically, equipment destruction due to intentional overloading. The authors emphasize that the most common infection vector for a closed OT perimeter is the compromise of engineering workstations (EWS) used by technical personnel via external media or vulnerable points of interaction with corporate networks.

Another critical risk factor for the architecture of modern PLCs is the possibility of unauthorized downloading of modified application software. Having gained access to an engineering station, an attacker can alter control algorithms (e.g., those written in IEC 61131-3 languages) so that the protective interlocks of electrical equipment are programmatically bypassed during emergency conditions. This allows the critical state to be concealed from operators, which will inevitably lead to equipment failure.

Regarding the regulatory framework, it should be noted that the international standard IEC 62443 is foundational for ensuring the cybersecurity of Industrial Automation and Control Systems (IACS). It defines Security Levels (SL) and requirements for various system components [4]. For MPP electric power complexes, implementing this standard entails: network segmentation and the creation of security zones; role-based access control (RBAC); secure remote access; and patch management.

Reference [5] describes the process of managing critical infrastructure cybersecurity using the integrated sectoral management system for national cybersecurity in Ukraine, based on the Law of Ukraine "On the Basic Principles of Ensuring the Cyber Security of Ukraine", which defines critical infrastructure facilities (to which MPPs belong) and the requirements for their protection. The study also indicates a growing level of cybercrime in Ukraine, underscoring the urgency of enhancing protection [6].

Presentation of the main research material. Enhancing the cyber resilience of MPP electric power complexes requires transitioning to an integrated architectural model. This model must account for the continuity of the technological processing cycle, the high cost of equipment failure, and the integration of edge computing and Industrial Internet of Things (IIoT) devices into the enterprise's multi-level power perimeter.

The proposed model is based on the Defense-in-Depth concept, adapted to the ISA-95 industrial hierarchy. Its architecture is illustrated in Figure 1 and structured across interdependent levels:

1. The corporate level and demilitarized zone (DMZ) (Levels 4 and 3.5) ensure the isolation of the industrial segment from external networks. Multi-factor authentication (MFA) is implemented here to minimize the risks of insider threats

(given the significant number of line personnel in the processing workshops), alongside the enforcement of end-to-end security policies and event auditing.

2. The network control and SCADA level (Level 3) is implemented through deep microsegmentation of the OT network using industrial Next-Generation Firewalls (NGFW) and Intrusion Detection/Prevention Systems (IDS/IPS). The latter are capable of performing Deep Packet Inspection (DPI) of specific fieldbuses (Profibus, Modbus/TCP, IEC 61850). This level also requires the configuration hardening [7] of general-purpose operating systems on EWS and integrity control of the control code, specifically algorithms implemented in IEC 61131-3 standard languages.

3. The controller level (Level 2) requires strict spatial isolation of PLCs and switching equipment, accompanied by video surveillance and physical access control systems.

4. The field level and IIoT segment (Levels 1 and 0) involves the use of a specialized embedded OS with a microkernel architecture for peripheral nodes, which prevents straightforward privilege escalation during cyberattacks.

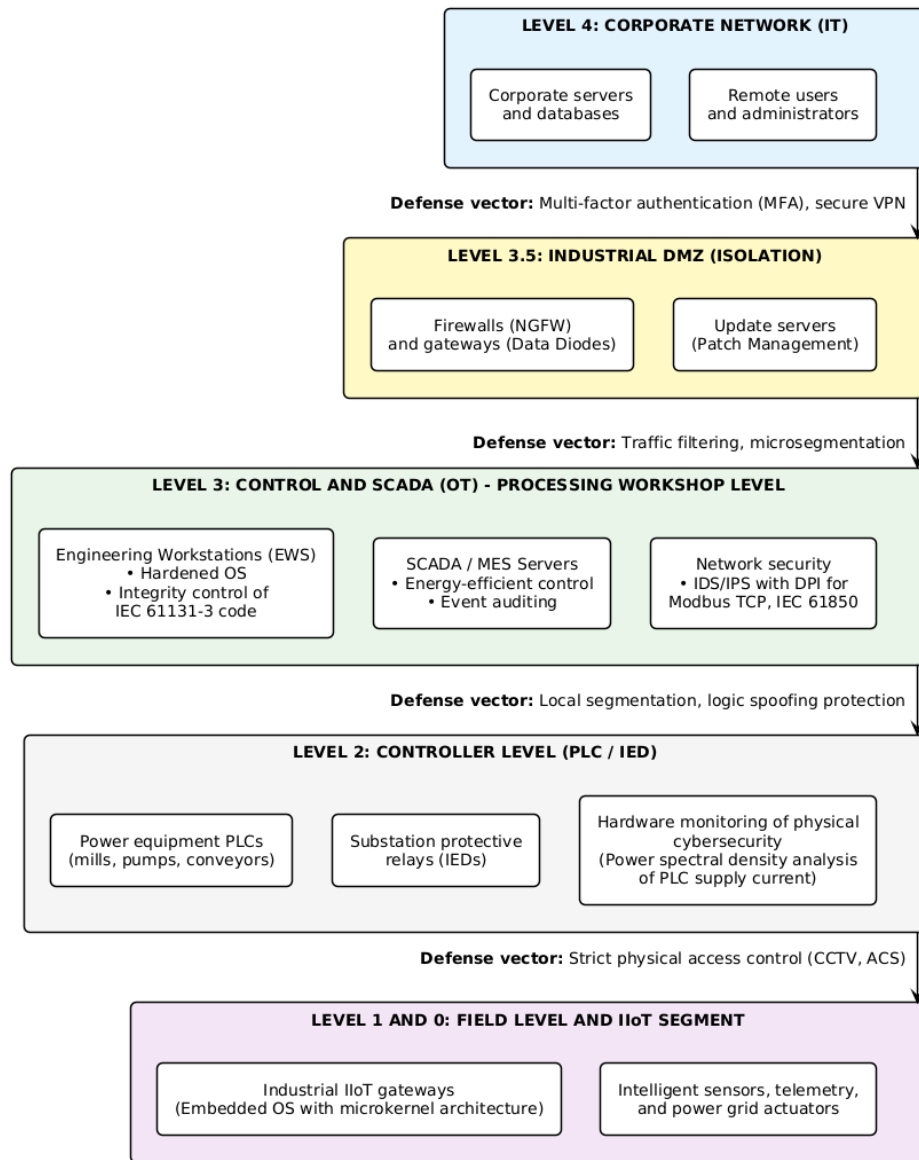


Figure 1 – Architecture of the defense-in-depth cybersecurity for the automated information system of the enterprise's electric power complex

To ensure fault tolerance at the lower (field and controller) levels of systems, it is advisable to implement physical cybersecurity monitoring. As noted in [8], analyzing PLC power signals enables the detection of operational anomalies before they affect the technological process. By evaluating the power spectral density of the consumed current, the system can identify the execution of unauthorized or malicious hardware-level software. Considering the catastrophic consequences of disrupting the energy-efficient control of energy-intensive units at technogenic facilities, this method serves as an essential predictive tool for MPPs.

Furthermore, the formulation of security policies for electric power complexes must rely on specialized risk assessment methodologies. An adapted method integrating the Kaplan-Garrick approach and fuzzy logic [2] enables the quantitative assessment of the probability of target node compromise based on the enterprise's degree of automation. The algorithm is structured in five stages:

1. Determination of the actual automation level of the technological chain (taking into account the deployment density of IIoT sensor networks).
2. Identification of priority attack targets (electrical substations, relay protection and automation systems, commercial and technical electricity metering complexes).
3. Profiling of potential intrusion execution techniques.
4. Modeling of consequences (ranging from database failures to the destruction of power equipment).
5. Calculation of the final risk coefficient for engineering decision-making.

The practical implementation of a reliable AIS for an MPP electric power complex requires implementing a comprehensive set of organizational and technical measures. A mandatory condition is the establishment of a strict vulnerability management protocol, specifically the timely updating of firmware for PLCs and Intelligent Electronic Devices (IEDs), as well as regular patch management for network services and core operating systems across all levels of the Industrial Control Systems (ICS), including industrial IIoT gateways.

For the secure integration of the industrial segment with external corporate networks, specialized security gateways or unidirectional data transfer systems (data diodes) must be used, along with secure VPN channels, to establish legitimate remote access for engineering personnel. Furthermore, hardware and software solutions must be supported by organizational measures: the development of highly specialized incident response plans coordinated with the shutdown/startup protocols of the processing equipment, and regular training of personnel in the fundamentals of cyber hygiene, as the human factor remains one of the key vectors for the compromise of control systems.

Conclusions. Ensuring the cyber resilience of AIS in electric power complexes is a multifaceted scientific and technical problem that requires comprehensive architectural solutions. The specific nature of iron ore processing dictates stringent

requirements for the continuity of the technological cycle, as a failure of power supply systems results in significant economic losses. Under these conditions, the convergence of traditionally isolated OT with corporate IT infrastructures, along with the implementation of IIoT components, exponentially expands the vulnerability landscape of energy-intensive equipment.

It has been demonstrated that the systematic enhancement of security levels must be based on integrating the IEC 62443 standard methodology and the Defense-in-Depth concept. Priority directions for engineering implementation include: deep microsegmentation of the network environment, continuous hardware monitoring of physical cybersecurity at the PLC level, integrity controls for embedded operating systems, and regular risk assessments tailored to the facility's actual level of automation. Adequate protection of the power complex serves as the foundation without which the secure implementation of energy-efficient control algorithms for ore preparation and separation processes is impossible.

For Ukrainian MPPs, which are classified as critical infrastructure facilities, additional requirements are imposed regarding the resilience of control systems. Given the permanent threat of targeted attacks on the energy sector, ICS's ability to withstand external destructive impacts is a determining factor in the economic survival of these enterprises.

The successful implementation of technical solutions is possible only if they are supplemented by organizational measures, primarily the systematic enhancement of cyber hygiene among engineering and technical personnel to mitigate the risks posed by insider threats. Prospects for further research in this direction lie in developing adaptive anomaly detection methods capable of distinguishing legitimate transient electromechanical processes in high-power drives from the consequences of targeted cyber incidents.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Nicholson A., Webber S., Dyer S., Patel T., Janicke H. SCADA security in the light of Cyber-Warfare. *Computers & Security*. 2012. Vol. 31, no. 4. P. 418–436. DOI: 10.1016/j.cose.2012.02.009
2. Tubis A.A., Werbińska-Wojciechowska S., Góralczyk M., Wróblewski A., Ziętek B. Cyber-Attacks Risk Analysis Method for Different Levels of Automation of Mining Processes in Mines Based on Fuzzy Theory Use. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 24. P. 7210. DOI: 10.3390/s20247210

3. Alsabbagh W., Langendörfer P. A Flashback on Control Logic Injection Attacks against Programmable Logic Controllers. Automation. 2022. Vol. 3, no. 4. P. 596–621. DOI: 10.3390/automation3040030
4. Piggin R. S. H. Development of industrial cyber security standards: IEC 62443 for SCADA and industrial control system security. IET Conference on Control and Automation 2013: Uniting Problems and Solutions, Birmingham, UK. 2013. DOI: 10.1049/cp.2013.0001
5. Slipachuk L., Toliupa S., Nakonechnyi V. The Process of the Critical Infrastructure Cyber Security Management using the Integrated System of the National Cyber Security Sector Management in Ukraine. 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2–6 July 2019. DOI: 10.1109/aiact.2019.8847877
6. Mazepa S., Dostalek L., Sharman O., Banakh S. Cybercrime and Vulnerability of Ukrainian Critical Information Infrastructure. 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 16–18 September 2020. DOI: 10.1109/acit49673.2020.9208965
7. Ilyenko A., Ilyenko S., Kulish T. Prospective protection methods of the Windows operating system. Cybersecurity: Education, Science, Technique. 2020. Vol. 4, no. 8. P. 124–134. DOI: 10.28925/2663-4023.2020.8.124134
8. Bichmou A., Chiocca J., Hernandez L., Hoffmann R.W., Horsham B., Lam H., McKinsey V., Bibyk S. Physical Cyber-Security of SCADA Systems. NAECON 2019 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, OH, USA, 15–19 July 2019. DOI: 10.1109/naecon46414.2019.9057860

Received 12.03.2026.

Accepted 13.04.2026.

Published 30.04.2026

УДК 004.056:681.518:621.31:622.7

Швець Д.В., Котов І.А., Карабут Н.О.

КІБЕРБЕЗПЕКА АВТОМАТИЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО- ЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

Анотація. Впровадження концепцій цифрового виробництва та інтелектуальних сенсорних мереж у гірничо-збагачувальну галузь експоненційно підвищує ризики цілеспрямованих кібератак на електроенергетичні комплекси об'єктів критичної інфраструктури.

Постановка проблеми. Електроенергетичні комплекси гірничо-збагачувальних комбінатів забезпечують живлення найбільш енергоємних стадій виробництва. В умовах конвергенції операційних та корпоративних мереж критично розширюється спектр вразливостей. Несанкціоноване втручання в алгоритми керування здатне спричинити як економічні збитки, так і масштабні техногенні аварії.

Мета дослідження полягає у розробці комплексної архітектурної моделі та інженерних рішень для підвищення кіберстійкості автоматизованих інформаційних систем електроенергетичних комплексів гірничо-збагачувальних комбінатів.

Методи дослідження. Застосовано методологію стандарту IEC 62443 та концепцію ешелонованого захисту, адаптовану до промислової ієрархії ISA-95.

Результати. Запропоновано багаторівневу інфраструктуру кіберзахисту автоматизованих інформаційних систем. Для мережевого рівня обґрунтовано впровадження мікросегментації технологічних мереж із застосуванням глибокої інспекції трафіку для базових промислових протоколів. Продемонстровано необхідність конфігураційного загартовування операційних систем інженерних станцій та використання захищених мікроядерних платформ для мережесхем шлюзів.

Висновки. Для забезпечення відмовостійкості на рівні контролерів імплементовано концепцію предиктивного моніторингу фізичної кібербезпеки. Показано, що поєднання вимог міжнародних стандартів безпеки із апаратним моніторингом струмів живлення програмованих логічних контролерів надійно запобігає програмній підміні керуючої логіки. Це ефективно нівелює вектори вторгнення та гарантує безперервність енергоефективного керування процесами переробки сировини.

Ключові слова: кібербезпека, гірничо-збагачувальний комбінат, автоматизована інформаційна система, ешелонований захист, програмовані логічні контролери, електроенергетичний комплекс, IEC 62443.

Швець Дмитро Валерійович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

Котов Ігор Анатолійович - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

Карабут Надія Олександрівна - старший викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>

Shvets Dmytro Valeriyovych - Ph.D., Associate Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

Kotov Ihor Anatoliyovych - Doctor of Sciences, Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

Karabut Nadiya Oleksandrivna - Senior Lecturer, Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>.

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF CONCRETE MIX PREPARATION AND MORTAR DELIVERY PROCESSES IN CONSTRUCTION TECHNOLOGICAL COMPLEXES

Abstract. *The research relevance is determined by the need to improve construction production technological set operational efficiency ensuring concrete mix preparation and plastering mortar delivery under variable operating conditions. The study objective is to establish relationships between mixing equipment kinematic parameters, construction medium rheological characteristics, and conveying system geometric parameters and the technological set generalized efficiency indicator. The study uses mathematical modelling methods of construction mix mixing and transportation processes considering their structural-mechanical properties and equipment energy characteristics. An extremal dependence of the generalized efficiency indicator on mixer working body rotational speed was established, and the influence of mixture rheological parameters and pipeline system geometric characteristics on pressure loss and material delivery stability was determined. The obtained results enable substantiation of rational construction mix preparation and transportation technological set operating modes considering process energy and technological indicators.*

Keywords: *concrete mix, mortar, mixing equipment, 3D printing, transportation, pump, rheology, mathematical modelling, energy efficiency, pumping.*

Problem statement. Modern construction technological sets ensuring concrete mix preparation and plastering mortar delivery are characterized by a high mixing, conveying, and auxiliary equipment integration level within a unified functional system. Such system operational efficiency is determined not only by individual machine productivity but primarily by joint operation parameter coordination affecting material delivery stability, mixture homogeneity level, and technological process energy consumption.

Traditional construction mix preparation and transportation process efficiency assessment approaches are mainly based on mixing equipment productivity, specific energy consumption, and mixture homogeneity indicator analysis. However, such approaches insufficiently consider relationships between mixer working body kinematic parameters, construction medium rheological characteristics, and subsequent delivery condition parameters to placement or application locations [1, 2].

Particular relevance is associated with concrete mix and plastering mortar delivery stability provision problems in construction technological sets operating under variable load conditions, material physical-mechanical property variation, and process energy consumption reduction requirements while maintaining specified technological process parameter. Insufficient construction mix preparation and delivery mode coordination leads to material transportation uniformity reduction, energy loss increase, and finished building structure and finishing coating operational characteristic deterioration [3, 4].

In this regard, the need arises for construction technological set concrete mix preparation and plastering mortar delivery process efficiency improvement approaches based on integrated mixing equipment kinematic parameter, construction medium rheological property, and conveying system energy characteristic consideration.

Analysis of recent studies and publications. Studies devoted to concrete mix mixing process investigation have established that homogeneous mixture structure formation efficiency is largely determined by mixer working body motion kinematic parameters, mixing chamber geometry, and component mixing mode characteristics. Considerable attention is given to mixing process intensification through mixer working body rotational speed optimization, structural parameter modification, and combined material motion mode application within the mixer working volume [5, 6].

A separate research direction is associated with pipeline transport and pumping unit concrete mix and plastering mortar delivery efficiency provision. These studies show that conveying system productivity is determined not only by pumping equipment structural parameters but also by construction medium rheological characteristics, particularly density, plastic viscosity, and yield shear

stress. Material property variation during transportation was found to significantly affect delivery stability and equipment operational energy performance [7].

Modern construction process mechanization studies indicate the feasibility of a technological set operation analysis system approach involving mixing equipment and conveying machine parameter coordination considering construction mix rheological properties and material movement modes. Such an approach enables material delivery stability improvement, process energy consumption reduction, and required mixture homogeneity level provision during transportation to placement or application locations [8, 9].

Research objective is construction technological set concrete mix preparation and plastering mortar delivery process efficiency improvement through establishment of relationships between mixing equipment kinematic parameters, construction medium rheological characteristics, and conveying system energy performance indicators. To achieve this objective, substantiation of a mixing and material delivery process parameter coordination approach ensuring mixture transportation stability improvement and technological process specific energy consumption reduction is proposed.

Presentation of the main research material. Concrete mix preparation and plastering mortar delivery processes in modern construction production are implemented within technologically interconnected machine and mechanism systems whose operation is determined by mixing equipment working body motion parameters, material structure formation conditions, and material transportation modes to application locations. The interaction character of these processes significantly affects mixture flow rate stability, structure homogeneity level, and overall technological system energy performance indicators [10, 11].

A modern construction mix preparation and delivery technological set development direction is their application in additive construction element formation systems using layer-by-layer material deposition methods. In such technologies, concrete mix and construction mortar delivery processes are implemented through specialized extrusion nozzle systems ensuring continuous building element formation without traditional formwork application. Construction 3D-printing system technological equipment operational efficiency is determined by material flow rate stability, preparation and transportation mode coordination, and

mixture rheological characteristic compliance with extrusion deposition process requirements [12].

A specific feature of construction mix delivery processes in 3D-printing technologies is increased material structure homogeneity requirement, rheological parameter stability requirement, and layer formation stage flow rate uniformity requirement. Mixing parameter mismatch with material transportation and deposition conditions leads to formed element geometric accuracy violation and building structure quality reduction. In this regard, construction technological set concrete mix preparation and plastering mortar delivery efficiency improvement becomes particularly relevant for automated material deposition system application in additive construction technologies [13].

Construction mix preparation and delivery technological sets include a mixing unit, receiving hopper, volumetric or screw-type conveying device, pipeline transportation system, and material delivery executive working body. Functional parameter interdependence of these elements is observed, since mixing unit operating characteristic variation leads to construction medium rheological property change, which subsequently determines transportation condition parameters.

Technological set productivity is determined by mixing and conveying equipment productivity ratio and can be expressed by the following relationship

$$Q = \min(Q_{3M}, Q_{TP}), \quad (1)$$

where Q – productivity of the technological set, m^3/h ;

Q_{3M} – mixing equipment productivity, m^3/h ;

Q_{TP} – material delivery system productivity, m^3/h .

The given relationship reflects the need for mixing and conveying equipment operating mode coordination, since individual system element productivity exceedance does not ensure corresponding technological process overall productivity increase.

Construction mix delivery parameter characteristics are significantly influenced by component mixing stage formed rheological properties. The main parameters determining pipeline system material movement conditions include,

belongs the density of the medium ρ , plastic viscosity μ and ultimate shear stress τ_0 , on which the value of pressure losses during transportation depends

$$\Delta p = f(\rho, \mu, \tau_0, L, D, v), \quad (2)$$

where Δp – pressure loss during the transport of the mixture, Pa;

L – pipeline length, m;

D – inner diameter of the pipeline, m;

v – average velocity of the mixture, m/s.

Construction medium characteristic formation is determined by component mixing intensity, mixing duration, and mixing equipment working body motion kinematic parameters, which necessitates mixture structural and rheological property variation relationship consideration during preparation processes.

Concrete mix and plastering mortar preparation processes are accompanied by continuous component spatial distribution change within the mixer working volume, resulting in gradual formation of homogeneous material structure with specified physical-mechanical and rheological characteristics. This process intensity is determined by mixing equipment working body motion kinematic parameters, working chamber geometry, and material mixing duration [14].

Mixing process efficiency evaluation is advisable based on mixture homogeneity coefficient characterizing component distribution uniformity degree within the mixer working volume and can be expressed by the following relationship

$$k_{oo} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (3)$$

where k_{oo} – mixture homogeneity coefficient;

σ – post mixing controlled component concentration standard deviation;

σ_0 – initial mixture component concentration standard deviation.

Mixture homogeneity coefficient variation during mixing has an exponential character and can be described by the following relationship

$$k_{oo} = 1 - \exp(-\beta t), \quad (4)$$

where β – mixing intensity factor, s^{-1} ;

t – mixing duration, s.

Mixing intensity coefficient depends on mixer working body rotational speed, mixing device structural parameters, and construction medium properties and can be represented by the following functional relationship

$$\beta = f(n, R, \rho, \mu), \quad (5)$$

where n – mixer working body rotational speed, s^{-1} ;

R – characteristic material particle displacement radius in the mixer, m;

ρ – mixture density, kg/m^3 ;

μ – viscosity of the medium, Pa·s.

With increasing mixing duration, construction mixture homogeneity degree increases, resulting in rheological characteristic stabilization and conveying system material delivery nonuniformity reduction. At the same time, required mixture structural parameter formation is accompanied by yield shear stress and effective medium viscosity variation determining subsequent pipeline or volumetric pump working body transportation conditions.

Considering these factors, pipeline system mixture mean flow velocity can be represented by the following relationship

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (6)$$

where v – average velocity of the mixture, m/s;

Q – material consumption, m^3/s ;

A – cross-sectional area of the pipeline, m^2 ,

which enables transition to construction mix delivery process energy parameter analysis considering mixing-process-formed medium rheological characteristics.

Concrete mix and plastering mortar motion in pipeline delivery systems is accompanied by hydraulic resistance occurrence determined by medium rheological properties, pipeline geometric parameters, and material transportation velocity. For construction mixtures characterized by yield shear stress presence, pressure drop–material flow velocity relationships are advisable to describe based on generalized viscoplastic medium rheological models [15].

In this case, the pressure drop during the transportation of the mixture through a pipeline with a length of L can be represented by addition

$$\Delta p = \frac{4L}{D} \left(\tau_0 + \mu \frac{8v}{D} \right), \quad (7)$$

where Δp – differential pressure along the pipeline, Pa;

L – pipeline length, m;

D – inner diameter of the pipeline, m;

τ_0 – maximum shear stress of the mixture, Pa.

Yield shear stress or plastic viscosity increase leads to pipeline system pressure loss increase and corresponding material transportation energy consumption increase, which necessitates mixing process parameter consideration when determining rational construction mix delivery operating modes.

Power required for pipeline system material transportation can be determined by the following relationship

$$N = \frac{\Delta p Q}{\eta}, \quad (8)$$

where N – drive power of the conveying system, W;

η – conveying unit efficiency coefficient.

For delivery systems using screw working bodies, conveying equipment productivity is determined by screw pair geometric parameters and rotational speed and can be represented by the following relationship

$$Q_{mp} = k \cdot n, \quad (9)$$

where k – delivery coefficient depending on working body geometric parameters and material properties;

n – rotor rotational speed, s^{-1} .

Construction mixture rheological characteristic variation after the mixing process leads to screw pump delivery coefficient change directly affecting material flow rate stability and transportation process energy performance indicators. In this regard, mixing equipment parameter coordination with conveying system operating modes ensures material delivery stability and overall technological set operational efficiency improvement.

Considering mixing and construction mix transportation process parameter interrelationships, technological set operational efficiency representation as an

integrated indicator considering system productivity, material delivery stability, and process energy consumption is advisable.

Considering mixing and construction mix transportation process parameter interrelationships, technological set operational efficiency representation as an integrated indicator considering system productivity, post-mixing material homogeneity degree, and delivery process energy consumption is advisable. Such an approach enables quantitative evaluation of mixing and conveying equipment operating mode effects on technological process resulting parameters.

Technological set overall operational efficiency indicator can be represented by the following relationship

$$K_{ef} = \frac{Q_{mp} k_{od}}{N}, \quad (10)$$

where K_{ef} – generalized indicator of the technological set efficiency;

N – drive power of the conveying system, W.

The proposed indicator enables simultaneous mixing and transportation parameter influence consideration on technological set operational performance and provides the possibility of different operating mode comparison based on an integral criterion.

Considering conveying system power determination by pipeline pressure drop and material flow rate, the integrated efficiency indicator can be represented by the following relationship

$$K_{ef} = \frac{k_{od} \eta}{\Delta p}. \quad (11)$$

The obtained relationship reflects mixing-process-formed material rheological characteristic influence on subsequent pipeline delivery system transportation energy parameters. At the same time, yield shear stress and effective medium viscosity reduction contributes to pressure loss reduction and technological set operational efficiency improvement.

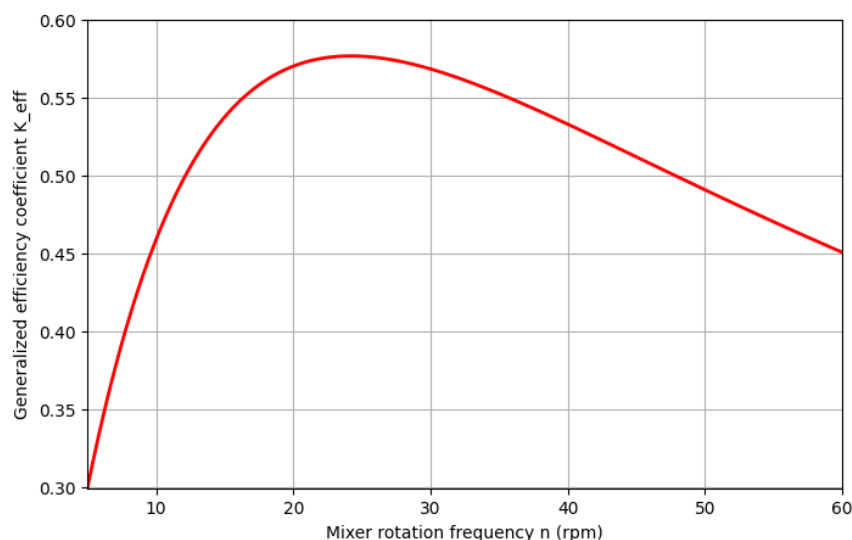


Figure 1 – Technological set integrated efficiency indicator dependence on mixer working body rotational speed

Based on the obtained analytical relationship, a technological set integrated efficiency indicator variation versus mixer working body rotational speed graph was constructed. Graphical relationship analysis shows that rotational speed increases up to a certain value results in technological set operational efficiency improvement due to mixture component mixing intensity increase and mixture homogeneity improvement. Further rotational speed increase is accompanied by mixing process energy consumption growth leading to integrated efficiency indicator reduction. The obtained relationship enables determination of a rational mixer working body rotational speed range ensuring maximum construction mix preparation and delivery process efficiency.

Considering mixture homogeneity coefficient dependence on mixing duration and mixer working body motion kinematic parameters, the integrated efficiency indicator can be represented by the following functional relationship

$$K_{ef} = f(n, t, \rho, \mu, \tau_0, L, D). \quad (12)$$

Technological set operational efficiency representation as a function of these parameters enables determination of rational mixing and conveying equipment operating modes considering construction medium properties and material delivery conditions.

Technological set operational efficiency representation as a functional dependence on mixing equipment kinematic parameters, construction medium rheological characteristics, and conveying system geometric parameters enables establishment of construction mix and plastering mortar preparation and delivery process performance variation relationships under real equipment operating conditions. The determining parameters influencing the integrated efficiency indicator value include mixer working body rotational speed, material mixing duration, mixture yield shear stress, effective viscosity, and delivery pipeline system geometric characteristics.

Mixture yield shear stress and plastic viscosity significantly influence technological set operational efficiency, since their reduction contributes to delivery pipeline system pressure loss reduction and material transportation stability improvement. Delivery pipeline length increase leads to proportional pressure loss growth, whereas pipeline diameter increase reduces mixture flow hydraulic resistance.

Conclusions. As a result of the conducted study, technological set concrete mix preparation and plastering mortar delivery operational efficiency variation relationships depending on mixing equipment kinematic parameters, construction medium rheological characteristics, and material transportation system geometric parameters were established. It is shown that the technological set integrated efficiency indicator has an extremal dependence on mixer working body rotational speed, enabling determination of rational operating modes considering required mixture homogeneity degree provision and process energy consumption minimization.

It was established that construction mixture rheological characteristics, particularly yield shear stress and effective viscosity, significantly affect delivery pipeline system pressure loss magnitude and material transportation stability. Conveying system geometric parameter influence on delivery process energy performance indicators was substantiated, enabling determination of rational pipeline parameters depending on mixture physical-mechanical properties and equipment operating conditions.

The obtained results create theoretical prerequisites for construction production technological set operational efficiency improvement through mixing

and conveying equipment operating mode coordination with material rheological characteristics and delivery system structural parameters, ensuring construction mix preparation and transportation process productivity increase with simultaneous specific energy consumption reduction.

REFERENCES

1. Nazarenko, I., & Klymenko, M. (2020). Application of general energy assessment criteria for preparing building mixtures. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2 (88), 37-42. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2020.88.2.37>.
2. Liu, L., Cao, G., Shi, Y., Jiang, S., & Deng, D. (2024). Effect of time-dependence on the concrete transportation process. *Powder Technology*, 437. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119535>.
3. Dejaeghere, I., Sonebi, M., & De Schutter, G. (2019). Influence of nano-clay on rheology, fresh properties, heat of hydration and strength of cement-based mortars. *Construction and Building Materials*, 222, 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.111>.
4. Blazhko, V., Anishchenko, A., Sayenko, L., & Hryhorkiv, O. (2024). Compact complexes for preparing various types of construction mixtures. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 104, 70-74. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2024.104.1.70>.
5. Ferrari, C., Beccati, N., & Magri, L. (2025). Numerical Mixing Index: Definition and Application on Concrete Mixer. *Fluids*. <https://doi.org/10.3390/fluids10030072>.
6. Xiao, Y., Zhang, Z., Gao, Z., Zhang, D., & , G. (2025). Simulation Study on the Operational Performance of Continuous Mixers Based on the Discrete Element Method (DEM). *Journal of Physics: Conference Series*, 2941. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2941/1/012013>.
7. Liu, L., Cao, G., Shi, Y., Jiang, S., & Deng, D. (2024). Effect of time-dependence on the concrete transportation process. *Powder Technology*. 437. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119535>.
8. Xiong, Q., Wang, X., & Jivkov, A. (2020). A 3D multi-phase meso-scale model for modelling coupling of damage and transport properties in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103545>.
9. Guo, X., & Jiao, D. (2024). Rheology as a versatile tool in concrete technology: a mini-review. *Advanced Manufacturing*. <https://doi.org/10.55092/am20240005>.
10. Buhaievskiy, M., & Petrenko, Y. (2024). Simulation of production and logistics for concrete plants. *Radioelectronic and Computer Systems*, 3 (111), 190-204. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.3.13>.
11. Rahman, J., Hasan, M., Almas, A., Azad, S., Ahmad, M., & Ahmmed, S. (2024). Optimization of Ready-Mix Concrete Operations: A Comprehensive Approach Through Practical and Simulation-Oriented Data. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://doi.org/10.46254/ba07.20240036>.
12. Paritala, S., Singaram, K., Bathina, I., Khan, M., & Jyosyula, S. (2023). Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing – A review. *Construction and Building Materials*. 402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132962>.
13. Si, W., Khan, M., & McNally, C. (2025). A Comprehensive Review of Rheological Dynamics and Process Parameters in 3D Concrete Printing. *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.3390/jcs9060299>.

14. Plugin, A., Donets, O., Trykoz, L., & Pluhin, O. (2023). Electromechanical control method of rheological and technological characteristics of building mixtures. Results in Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101419>.
15. Qiu, J., Tian, M., Zhu, D., Xiao, C., Wen, B., Bin, F., Chen, H., & Wang, D. (2023). Numerical Study of Resistance Loss and Erosive Wear during Pipe Transport of Paste Slurry. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su151511890>.

Received 16.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.928:666.972:519.876

К.І. Почка, Л.К. Поліщук, М.О. Пристайло, Р.І. Сивак

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПРИГОТУВАННЯ ТА ПОДАЧІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ І ШТУКАТУРНИХ РОЗЧИНІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ БУДІВНИЦТВА

***Анотація.** У статті досліджено вплив кінематичних параметрів змішувального обладнання, реологічних характеристик бетонних сумішей і штукатурних розчинів та геометричних параметрів систем подачі на ефективність функціонування технологічних комплексів будівництва. Особливу увагу приділено встановленню взаємозв'язку між параметрами процесів змішування матеріалу та умовами його подальшого транспортування до місця укладання або нанесення. Запропоновано узагальнений показник ефективності технологічного комплексу, який враховує продуктивність процесу приготування суміші, ступінь її однорідності після змішування та енергетичні витрати під час транспортування трубопровідними системами подачі. На основі використання аналітичних залежностей встановлено закономірності зміни показників ефективності залежно від режимів роботи змішувального і транспортуючого обладнання.*

Встановлено екстремальний характер залежності узагальненого показника ефективності від частоти обертання робочого органа змішувача та визначено вплив параметрів трубопровідної системи на втрати тиску під час подачі матеріалу. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні режими функціонування змішувального і транспортуючого обладнання та підвищити стабільність подачі будівельних сумішей у технологічних комплексах сучасного будівництва.

Ключові слова: бетонна суміш, розчин, змішувальне обладнання, 3D-друк, транспортування, насос, реологія, математичне моделювання, енергоефективність, перекачування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І.І., Клименко М.О. Застосування узагальнених критеріїв енергетичної оцінки робочого процесу перемішування будівельних сумішей. Вісник ХНАДУ. 2020. № 2 (88). Р. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2020.88.2.37>
2. Liu L., Cao G., Shi Y., Jiang S., Deng D. Effect of time-dependence on the concrete transportation process. Powder Technology. 2024. Vol. 437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119535>
3. Dejaeghere I., Sonebi M., De Schutter G. Influence of nano-clay on rheology, fresh properties, heat of hydration and strength of cement-based mortars. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 222. P. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.111>
4. Блажко В. В., Аніщенко А. І., Саєнко Л. В., Григорків О. Б.. Малогабаритні комплекси для виготовлення будівельних сумішей різноманітного призначення. Вісник ХНАДУ. 2024. № 104. Р. 70–74. DOI: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2024.104.1.70>
5. Ferrari C., Beccati N., Magri L. Numerical mixing index: definition and application on concrete mixer. Fluids. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids10030072>
6. Xiao Y., Zhang Z., Gao Z., Zhang D. Simulation study on the operational performance of continuous mixers based on the discrete element method (DEM). Journal of Physics: Conference Series. 2025. Vol. 2941. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2941/1/012013>
7. Liu L., Cao G., Shi Y., Jiang S., Deng D. Effect of time-dependence on the concrete transportation process. Powder Technology. 2024. Vol. 437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119535>
8. Xiong Q., Wang X., Jivkov A. A 3D multi-phase meso-scale model for modelling coupling of damage and transport properties in concrete. Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103545>
9. Guo X., Jiao D. Rheology as a versatile tool in concrete technology: a mini-review. Advanced Manufacturing. 2024. DOI: <https://doi.org/10.55092/am20240005>
10. Buhaievskiy M., Petrenko Y. Simulation of production and logistics for concrete plants. Radioelectronic and Computer Systems. 2024. № 3 (111). P. 190–204. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.3.13>
11. Rahman J., Hasan M., Almas A., Azad S., Ahmad M., Ahmmed S. Optimization of ready-mix concrete operations: a comprehensive approach through practical and simulation-oriented data. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2024. DOI: <https://doi.org/10.46254/ba07.20240036>
12. Paritala S., Singaram K., Bathina I., Khan M., Jyosyula S. Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing – a review. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132962>
13. Si W., Khan M., McNally C. A comprehensive review of rheological dynamics and process parameters in 3D concrete printing. Journal of Composites Science. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9060299>
14. Plugin A., Donets O., Trykoz L., Pluhin O. Electromechanical control method of rheological and technological characteristics of building mixtures. Results in Engineering. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101419>

15. Qiu J., Tian M., Zhu D., Xiao C., Wen B., Bin F., Chen H., Wang D. Numerical study of resistance loss and erosive wear during pipe transport of paste slurry. Sustainability. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151511890>

Почка Костянтин Іванович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри професійної освіти, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0355-002X>

Поліщук Леонід Клавдійович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>

Пристайло Микола Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>

Сивак Роман Іванович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

Kostiantyn Pochka Ivanovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department State Higher Educational, Kyiv National University of Construction and Architecture.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0355-002X>

Polishchuk Leonid Klavdiyovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>

Prystailo Mykola Oleksiyovych – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Construction Machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>

Sivak Roman Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

ПЕРКОЛЯЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ МІЖДЕНДРИТНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ЗАВЕРШАЛЬНІЙ СТАДІЇ ЗАТВЕРДІННЯ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Анотація. У статті розглянуто фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів. Показано, що ефективність компенсації усадки в межах *mushy zone* визначається не лише наявністю залишкової рідкої фази, а й умовами її транспорту, зокрема проникністю міждендритного простору, локальним тиском і збереженням безперервних шляхів підживлення. Проаналізовано механізми формування усадкової та газоусадкової пористості, вплив зростання частки твердої фази на звуження міждендритних каналів, зниження проникності та локалізацію потоків рідкої фази. Обґрунтовано доцільність застосування перколяційного підходу до опису зв'язності рідкої фази на пізніх стадіях затвердіння. Запропоновано інтерпретувати *mushy zone* як двофазну систему, у якій рідка фаза виконує роль транспортної мережі, а тверда фаза — обмежувального каркаса. Показано, що втрата міждендритного живлення пов'язана не з повним зникненням рідкої фази, а з руйнуванням її глобальної зв'язності та безперервного транспортного шляху. Встановлено, що перколяція рідкої фази може бути використана як критерій втрати живильності та як теоретична основа для подальшого моделювання пористості й дефектоутворення в металевих виливках.

Ключові слова: міждендритне живлення; *mushy zone*; перколяція; зв'язність рідкої фази; затвердіння металів і сплавів; усадкова пористість; газоусадкова пористість; проникність; когерентність дендритів; дефектоутворення.

Вступ

Якість металевих виливків значною мірою визначається умовами завершальної стадії затвердіння, коли у формі виникає двофазна зона *mushy zone*, а залишкова рідка фаза повинна компенсувати об'ємну усадку. У цей період міждендритне живлення є одним із ключових чинників, що впливають на щільність, суцільність і експлуатаційні властивості литого металу [1, 2].

Порушення живлення на пізніх стадіях затвердіння зумовлює формування усадкової та газоусадкової пористості, причому наявність рідкої фази сама по собі ще не гарантує компенсації усадки. Вирішальними стають умови транспортування розплаву, локальний тиск і морфологія міждендритного простору [3, 6–8].

Традиційно втрату живлення в *mushy zone* пов'язують зі зменшенням проникності, зростанням гідродинамічного опору та падінням тиску в рідкій фазі. Однак на завершальній стадії затвердіння цього опису недостатньо, оскільки визначальним чинником стає також просторова зв'язність рідкої фази. За високих часток твердої складової навіть незначні структурні зміни можуть призводити до ізоляції рідких областей і фактичного припинення живлення (рис. 1) [4, 5, 9, 10]. Тому актуальним є підхід, який дозволяє розглядати завершальну стадію затвердіння не лише як фільтрацію розплаву в пористому середовищі, а і як еволюцію зв'язності рідкої мережі в умовах формування когерентного дендритного каркаса. У цьому аспекті перколяційний підхід є перспективним, оскільки дає змогу трактувати втрату міждендритного живлення як наслідок досягнення критичного порога зв'язності рідкої фази [9–12].

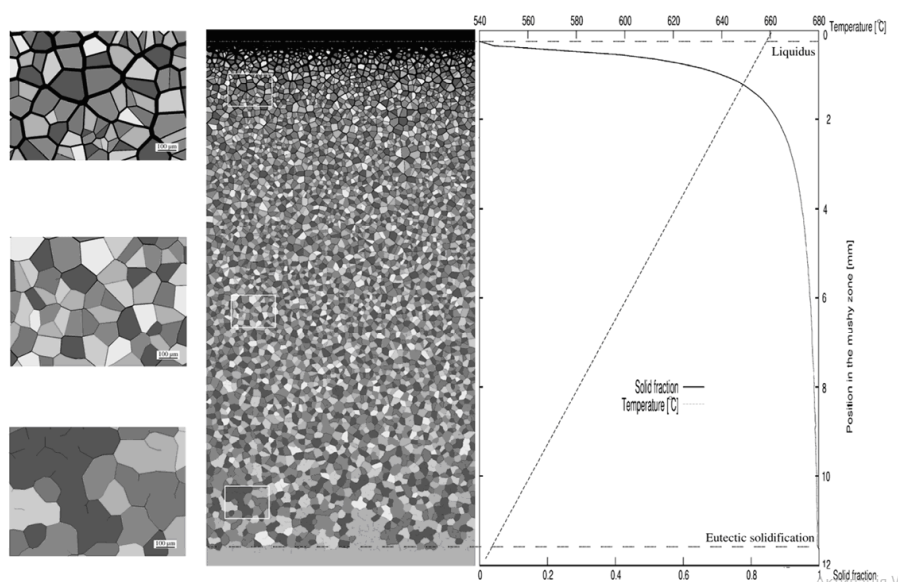


Рисунок 1 – Розрахована *mushy zone* сплаву з глобулярною структурою за температурного градієнта 100 К/см і швидкості охолодження 1 К/с [9]; ліворуч наведено збільшені фрагменти виділених ділянок, праворуч – розподіл об'ємної частки твердої фази в горизонтальних перерізах

Сучасні моделі міждендритного живлення переважно спираються на континуальний опис течії рідкої фази в пористому середовищі. У межах цього напряму сформовано *Darcy-based* моделі, де транспорт розплаву визначається градієнтом тиску, проникністю середовища та в'язкістю рідини [1, 2]. Значну увагу приділено дослідженню проникності *mushy zone*: для колончастих і рівноосних дендритних структур отримано експериментальні та чисельні залежності проникності від частки рідкої фази, морфології дендритів і характерних розмірів мікроструктури [2, 4, 5, 11]. Також розвинено *porous-medium* і трифазні моделі, в яких враховано не лише фільтраційне живлення, а й умови формування пористості за наявності газовиділення та усадки [3].

Разом із тим континуальні підходи переважно оперують усередненими характеристиками і недостатньо враховують топологічні зміни рідкої мережі. На пізніх стадіях затвердіння рідка фаза може ще зберігатися, але вже не утворювати безперервного шляху живлення. Дослідження переходу від безперервних рідких плівок до когерентного твердого стану, а також гранулярні моделі *mushy zone* показали, що у зоні високих часток твердої фази відбуваються локалізація потоків і формування критичних структурних переходів [9, 10]. Це зумовлює доцільність використання перколяційного підходу, в межах якого *mushy zone* розглядається як двофазна система зі змінною зв'язністю рідкої фази, а втрата живлення пов'язується з руйнуванням глобальної мережі рідких каналів [10, 12].

Метою статті є обґрунтування перколяційного підходу до опису міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів та встановлення ролі зв'язності рідкої фази як визначального чинника збереження живильності *mushy zone*.

Для досягнення поставленої мети необхідно: проаналізувати фізичну природу міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння; розглянути механізми формування усадкової та газоусадкової пористості в умовах обмеженого живлення; узагальнити сучасні підходи до опису течії рідкої фази в *mushy zone*, зокрема *Darcy-based* і *porous-medium* моделі; встановити обмеження континуального опису для високих часток твердої фази; обґрунтувати доцільність інтерпретації *mushy zone* як перколяційної

системи; показати, що втрата зв'язності рідкої фази може бути використана як критерій припинення міждендритного живлення.

Фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння

Міждендритне живлення як механізм компенсації усадки. На завершальній стадії затвердіння металів і сплавів у межах двофазної області *mushy zone* міждендритне живлення забезпечує компенсацію об'ємного скорочення, що супроводжує фазовий перехід із рідкого стану в твердий. У міру формування дендритного каркаса залишкова рідка фаза повинна надходити через систему міждендритних каналів до локальних зон дефіциту об'єму. Отже, ефективність живлення визначається не лише кількістю рідкої фази, а й умовами її фільтраційного транспорту в середовищі зі зростаючим гідродинамічним опором [1], [2]. Збереження живильності можливе за наявності залишкової рідини, достатньої проникності *mushy zone* та безперервних шляхів підживлення [2], [4], [5], [11].

Проблема усадкової та газоусадкової пористості. Усадкова пористість виникає тоді, коли рідка фаза вже не може компенсувати локальне об'ємне скорочення металу в процесі затвердіння. За умов недостатнього міждендритного живлення в окремих зонах формуються порожнини усадкового походження, масштаб яких визначається співвідношенням між усадкою, подачею розплаву, проникністю двофазної області та локальним тиском у рідині [3], [6]. Газоусадкова пористість має складніший механізм, оскільки поєднує дефіцит живлення з виділенням розчинених газів із розплаву. За цих умов зменшення доступу рідкої фази до усадкових зон унеможливорює компенсацію порожнин, а зниження тиску сприяє стабілізації та зростанню газових пор [3], [6]–[8]. Таким чином, усадкова й газоусадкова пористість є безпосереднім наслідком порушення міждендритного живлення.

Вплив зростання частки твердої фази на проникність *mushy zone*. Зі збільшенням частки твердої фази геометрія міждендритного простору істотно ускладнюється: канали течії звужуються, стають більш звивистими та неоднорідними. Унаслідок цього проникність *mushy zone* зменшується і перестає визначатися лише об'ємною часткою рідини, оскільки суттєвого

значення набувають морфологія дендритів, їх взаємне розташування та характер розгалуження рідких каналів [2], [4], [5], [11]. За високих часток твердої фази навіть незначне додаткове зростання твердої складової може різко обмежити фільтраційний транспорт рідини [4], [5], [11]. Це означає перехід від режиму множинних шляхів підживлення до режиму локалізації потоку в небагатьох вузьких каналах, що створює передумови для ізоляції окремих рідких ділянок і втрати живильності (рисунк 2) [5], [10], [12].

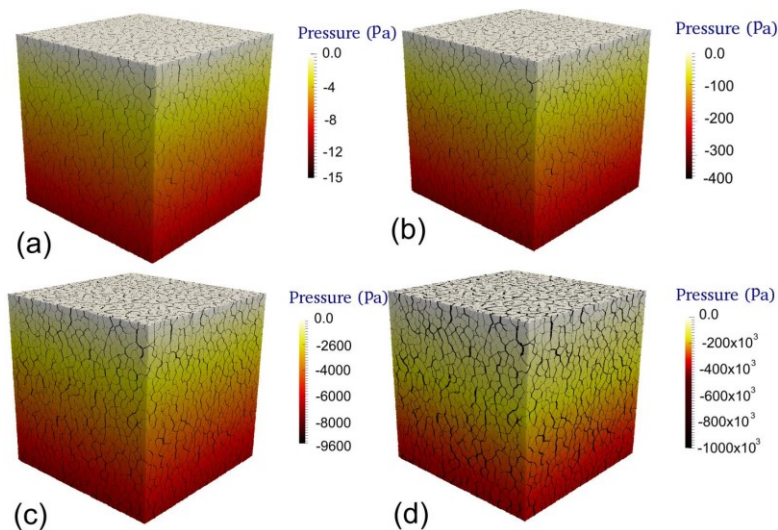


Рисунок 2 – Течія рідкої фази в елементарному об’ємі mushy zone для різних значень частки твердої фази: а) $g_s = 0.50$, б) $g_s = 0.80$, в) $g_s = 0.93$, г) $g_s = 0.98$. Ширина каналів пропорційна локальній інтенсивності потоку. [12]

Падіння локального тиску як умова втрати живлення. Рушійною силою транспорту рідкої фази в міждендритному просторі є градієнт тиску, який забезпечує переміщення розплаву до зон усадки [1], [2]. Зі зменшенням проникності mushy zone для підтримання того самого потоку потрібен більший перепад тиску, що підвищує ймовірність виникнення локальних зон недостатнього живлення [1], [2], [11]. На завершальній стадії затвердіння втрати тиску мають виразно локальний характер: у вузьких і звивистих міждендритних каналах вони посилюються, а частина рідкої фази може ставати фактично гідродинамічно ізолюваною. У межах трифазних моделей це безпосередньо пов’язується з формуванням пористості, оскільки падіння локального тиску одночасно перешкоджає компенсації усадки та сприяє виділенню газової фази [3], [6]. Тому дефектоутворення на пізніх стадіях

затвердіння доцільно розглядати як наслідок поєднаної дії деградації транспортної мережі й критичного зниження локального тиску в рідині [3], [6].

Точка когерентності дендритів і перехід до обмеженого живлення. Ключовим етапом еволюції mushy zone є досягнення точки когерентності дендритів, коли тверда фаза вперше формує просторово зв'язний каркас. До цього моменту рідка фаза займає відносно безперервний об'єм і забезпечує порівняно вільний перерозподіл розплаву. Після формування когерентного твердого каркаса рідина зберігається переважно у вигляді тонких каналів і плівок, обмежених дендритною структурою, а її транспортні можливості різко знижуються [9], [10]. Дослідження переходу від безперервних рідких плівок до когерентного твердого стану, а також гранулярні моделі рівноосних mushy zone показали, що саме поблизу когерентності починається перехід від відносно вільного до обмеженого живлення [9], [10]. У цій області спостерігаються локалізація потоків у небагатьох збережених каналах, підвищення чутливості системи до перекриття рідких шляхів і швидке наближення до стану втрати живильності [9], [10], [12]. Отже, точку когерентності слід розглядати як фізичну межу, після якої ризик утворення усадкових і газоусадкових дефектів істотно зростає.

Перколяційний підхід до опису зв'язності рідкої фази

Основні положення теорії перколяції. Теорія перколяції є фундаментальним підходом статистичної фізики для опису появи або втрати глобальної зв'язності в невпорядкованих дискретних системах [13]–[15]. У її межах система розглядається як сукупність відкритих і закритих елементів, а сукупність взаємопов'язаних відкритих елементів формує перколяційний кластер. Якщо такий кластер охоплює систему від одного граничного боку до іншого, виникає глобальна зв'язність, що забезпечує макроскопічний транспорт. Ключовим поняттям є поріг перколяції – критичне значення частки провідної фази, при якому система переходить від локальних ізольованих кластерів до безперервної мережі. Поблизу цього порога навіть незначні структурні зміни можуть спричинити якісну зміну транспортних властивостей середовища [13], [14].

Порогова поведінка зв'язності поблизу критичного стану. У критичній області система втрачає надлишковість транспортних шляхів, а

перенесення концентрується в обмеженій кількості каналів, що формують каркас перколяційного кластера [13]–[15]. Руйнування навіть невеликої частини таких зв'язків може призвести до розпаду безперервного шляху на ізольовані фрагменти. Для двофазних систем це означає, що провідна фаза може ще зберігатися в помітному об'ємі, але вже не брати участі в реальному транспорті, якщо її мережа втрачає наскрізну зв'язність [14], [15]. Саме перехід до ізольованих рідких областей є характерною ознакою втрати перколяції на завершальній стадії затвердіння (рисунк 3) [9], [10], [12].

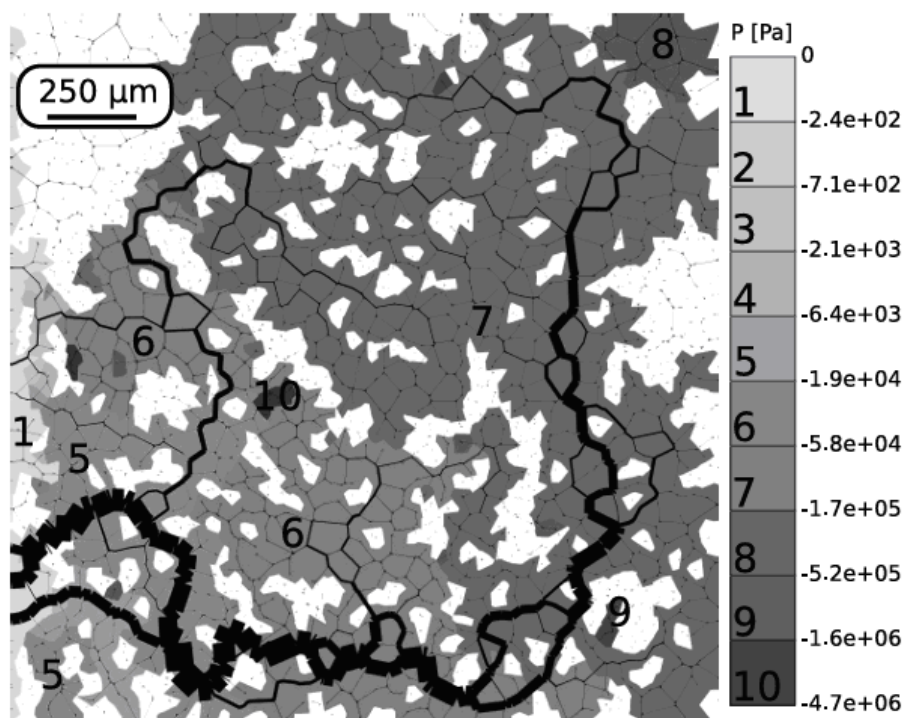


Рисунок 3 – Профіль тиску та потік рідкої фази, зумовлений усадкою, в елементі mushy zone при високій частці твердої фази; товщина каналів пропорційна локальному потоку, а градація тону відповідає локальному тиску. Рисунок ілюструє локалізацію живлення та значний перепад тиску вздовж основного шляху підживлення [10]

Інтерпретація *mushy zone* як двофазної перколяційної системи. На завершальній стадії затвердіння mushy zone доцільно розглядати як двофазну систему, в якій рідка фаза утворює транспортну мережу, а тверда фаза формує обмежувальний каркас [9], [10], [12]. На ранніх стадіях рідка фаза займає значну частину міждендритного простору й утворює відносно безперервну систему

каналів і плівок. У міру зростання частки твердої фази дендритні елементи зближуються, контактують між собою та формують когерентну структуру, що змінює топологію рідкої мережі [9], [10]. За такого підходу рідка фаза трактується не лише як залишковий розплав, а як система транспортних зв'язків, через яку реалізується міждендритне живлення [2], [5], [9], [10].

Зв'язний рідкий каркас як умова реального транспорту. Міждендритне живлення можливе лише за наявності безперервного рідкого шляху між джерелом живлення та локальною зоною дефіциту об'єму [1], [2], [10], [12]. Сам факт існування залишкової рідини ще не означає збереження транспортної функції, якщо рідка фаза розпадається на ізольовані кишені або непов'язані фрагменти. Отже, транспортні можливості *mushy zone* визначаються не лише об'ємною часткою рідкої фази, а передусім її топологічною цілісністю [10], [12], [15]. Гранулярні та тривимірні моделі показують, що поблизу завершення затвердіння рідка фаза локалізується в міжзернових каналах, а живлення концентрується в небагатьох збережених шляхах [10], [12]. Утрата зв'язності цих шляхів призводить до ізоляції локальних ділянок і створює передумови для неможливості компенсації усадки [9], [10], [12].

Перколяція рідкої фази як критерій живильності. У контексті завершальної стадії затвердіння перколяція рідкої фази може бути розглянута як фізично обґрунтований критерій живильності *mushy zone*. Якщо рідка фаза формує глобально зв'язний кластер, міждендритне живлення ще можливе, хоча й за зростаючого гідродинамічного опору. Якщо ж цей кластер руйнується, система втрачає здатність до макроскопічного перенесення розплаву, а отже — і до компенсації усадки [9], [10], [12], [14]. Отже, межею припинення живлення є не повне зникнення рідкої фази, а втрата її глобальної зв'язності [10], [12], [14], [15]. Такий критерій дозволяє розрізняти геометричну наявність рідини та її ефективну транспортну функцію, що є принциповим для опису переходу до дефектоутворення [9], [10], [12].

Зв'язок перколяції з локалізацією шляхів живлення на пізній стадії затвердіння. На пізній стадії затвердіння звуження міждендритних каналів, зростання частки твердої фази та формування когерентного каркаса спричиняють локалізацію живлення в окремих вузьких шляхах [5], [9], [10], [12].

Це є характерною ознакою наближення системи до порога перколяції: рідка мережа втрачає надлишковість, а транспорт відбувається лише по незначній кількості критично важливих каналів [10], [12], [14]. Їх руйнування або перекриття призводить до ізоляції окремих зон виливка від джерел живлення. Саме в цих ділянках виникають умови для локального падіння тиску, втрати живильності та зародження усадкової або газоусадкової пористості [3], [6], [10], [12]. Тому перколяційний підхід доцільно розглядати як теоретичну основу для інтерпретації переходу від структурної перебудови рідкої мережі до дефектоутворення.

Обговорення результатів

Теоретичне значення перколяційного підходу. Перколяційний підхід має важливе теоретичне значення для опису міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння, оскільки дозволяє перейти від усередненого опису *mushy zone* до аналізу топології рідкої мережі. На відміну від континуальних моделей, де ключовими параметрами є проникність, тиск і частка рідкої фази, у цьому підході визначальним чинником виступає зв'язність рідкої фази [2], [13]–[15]. Це дає змогу трактувати втрату живильності не лише як наслідок зниження проникності, а як структурний перехід до стану руйнування глобального транспортного шляху [9], [10], [12].

Новизна такого підходу полягає в тому, що він розмежовує наявність рідкої фази та її здатність забезпечувати підживлення. Система може містити залишковий розплав, але вже не бути живильною через втрату наскрізного зв'язного кластера [9], [10]. Порівняно з континуальними моделями перколяційний підхід краще пояснює локалізацію потоків у зоні високих часток твердої фази та пов'язує морфологічну еволюцію дендритного каркаса з переходом до усадкового і газоусадкового дефектоутворення [3], [6], [10], [12]. Отже, він є перспективною теоретичною основою для подальшого розвитку моделей затвердіння і пористості [10], [12], [14].

Обмеження підходу. Перколяційний підхід має низку обмежень, пов'язаних передусім зі спрощенням реальної *mushy zone*, яка є багатофізичною та багатомасштабною системою. У межах перколяційної інтерпретації складна структура двофазної області зводиться до схеми зв'язних

і незв’язних елементів, що не відображає повною мірою різноманіття реальних мікроструктурних станів [13]–[15].

Крім того, такий опис не враховує в повному обсязі тривимірну геометрію міждендритного простору, зокрема звивистість, анізотропію та локальні особливості рідких каналів [5], [9], [12]. Тому його доцільно поєднувати з мікроструктурними моделями, здатними відтворювати еволюцію дендритного каркаса та геометрію міжзернових каналів [9], [10], [12]. Важливим залишається і питання експериментальної верифікації: для практичного використання необхідно встановити кількісний зв’язок між перколяційними критеріями та реальними умовами втрати живильності в конкретних сплавах [4], [5], [8], [12]. Отже, обмеження підходу не зменшують його концептуальної цінності, але визначають напрями його подальшого розвитку [10], [12], [14].

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом є інтеграція перколяційного підходу з методами *cellular automata*, що дозволить простежувати формування критичного стану системи в процесі еволюції дендритної мікроструктури [9], [10], [12]. Це дасть змогу безпосередньо пов’язати втрату зв’язності рідкої фази з локальними особливостями росту зерен і руйнуванням рідких каналів.

Іншим важливим напрямом є поєднання перколяційної інтерпретації з тепловими та гідродинамічними моделями, де одночасно враховуються температура, частка твердої фази, проникність, тиск і швидкість течії рідкої фази [2], [3], [11]. Особливий інтерес становить використання такого підходу для прогнозування пористості: встановлення кількісного зв’язку між втратою глобальної зв’язності рідкої фази, падінням локального тиску та зародженням пор дасть змогу застосовувати перколяційний критерій для ідентифікації дефектонебезпечних зон у виливках [3], [6], [7], [12]. Таким чином, подальші дослідження доцільно спрямувати на поєднання перколяційного аналізу з мікроструктурним, тепловим і гідродинамічним моделюванням, а також на розроблення кількісних схем прогнозування пористості [9], [10], [12], [14].

Практичне значення роботи полягає в тому, що перколяційний підхід до опису міждендритного живлення може бути використаний для подальшого розвитку моделей прогнозування усадкової та газоусадкової пористості, а

також для виявлення умов втрати живильності на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів.

Висновки

У роботі узагальнено фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів. Показано, що ефективність компенсації усадки визначається не лише наявністю залишкової рідкої фази, а й умовами її транспорту в межах *mushy zone*. Зі зростанням частки твердої фази відбуваються звуження міждендритних каналів, зменшення проникності, локалізація шляхів живлення та посилення локальних втрат тиску, що створює умови для формування усадкової та газоусадкової пористості.

Обґрунтовано доцільність використання перколяційного підходу для опису структурної еволюції рідкої фази на пізніх стадіях затвердіння. Показано, що межею припинення міждендритного живлення є не повне зникнення рідкої фази, а втрата її глобальної зв'язності та руйнування безперервного транспортного шляху.

Отримані результати підтверджують доцільність перколяційного підходу для подальшого моделювання процесів затвердіння та дефектоутворення, а також для розроблення критеріїв прогнозування дефектонебезпечних зон у виливках.

REFERENCES

1. Mehrabian, R., Keane, M., & Flemings, M. C. (1970). Interdendritic fluid flow and macrosegregation; influence of gravity. *Metallurgical Transactions*, 1(5), 1209–1220. <https://doi.org/10.1007/BF02900233>
2. Poirier, D. R. (1987). Permeability for flow of interdendritic liquid in columnar-dendritic alloys. *Metallurgical Transactions B*, 18(1), 245–255. <https://doi.org/10.1007/BF02658450>
3. Kuznetsov, A. V., & Vafai, K. (1995). Development and investigation of three-phase model of the mushy zone for analysis of porosity formation in solidifying castings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(14), 2557–2567. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00012-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00012-X)
4. Nielsen, Ø., Arnberg, L., Mo, A., & Thevik, H. J. (1999). Experimental determination of mushy zone permeability in aluminum-copper alloys with equiaxed microstructures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(9), 2455–2462. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0254-y>
5. Brown, S. G. R., Spittle, J. A., Jarvis, D. J., & Walden-Bevan, R. (2002). Numerical determination of liquid flow permeabilities for equiaxed dendritic structures. *Acta Materialia*, 50(6), 1559–1569. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00014-9)

6. Sigworth, G. K., & Wang, C. (1993). Mechanisms of porosity formation during solidification: A theoretical analysis. *Metallurgical Transactions B*, 24(2), 349–364. <https://doi.org/10.1007/BF02659138>
7. Lee, P. D., & Hunt, J. D. (1997). Measuring the nucleation of hydrogen porosity during the solidification of aluminium-copper alloys. *Scripta Materialia*, 36(4), 399–404. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(96\)00411-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(96)00411-3)
8. Lee, P. D., & Hunt, J. D. (1997). Hydrogen porosity in directional solidified aluminium-copper alloys: In situ observation. *Acta Materialia*, 45(10), 4155–4169. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00081-5)
9. Vernède, S., & Rappaz, M. (2006). Transition of the mushy zone from continuous liquid films to a coherent solid. *Philosophical Magazine*, 86(24), 3779–3794. <https://doi.org/10.1080/14786430500228705>
10. Vernède, S., Jarry, P., & Rappaz, M. (2006). A granular model of equiaxed mushy zones: Formation of a coherent solid and localization of feeding. *Acta Materialia*, 54(15), 4023–4034. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.04.035>
11. Han, Q., Viswanathan, S., & Duncan, A. J. (2003). Permeability measurements of the flow of interdendritic liquid in equiaxed aluminum-silicon alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 34(1), 25–28. <https://doi.org/10.1007/s11663-003-0051-8>
12. Sistaninia, M., Phillion, A. B., Drezet, J.-M., & Rappaz, M. (2012). Three-dimensional granular model of semi-solid metallic alloys undergoing solidification: Fluid flow and localization of feeding. *Acta Materialia*, 60(9), 3902–3911. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.036>
13. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation and conduction. *Reviews of Modern Physics*, 45(4), 574–588. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574>
14. Hunt, A. G. (2001). Applications of percolation theory to porous media with distributed local conductances. *Advances in Water Resources*, 24(3–4), 279–307. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00058-0)
15. King, P., & Masihi, M. (2009). Percolation in porous media. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of complexity and systems science* (pp. 6565–6579). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_389

Received 19.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.94:621.74:669.017

Tatjana Selivyorstova

PERCOLATION APPROACH TO THE DESCRIPTION OF INTERDENDRITIC FEEDING AT THE FINAL STAGE OF SOLIDIFICATION OF METALS AND ALLOYS

Abstract. *The paper examines the physical foundations of interdendritic feeding during the final stage of solidification of metals and alloys. It is shown that the efficiency of shrinkage compensation within the mushy zone is determined not only by the presence of residual liquid phase, but also by the conditions of its transport through the interdendritic space. Particular attention is paid to the role of permeability, local pressure gradients, morphology of liquid channels, and preservation of continuous feeding paths in ensuring the transport capacity of the liquid phase. The mechanisms of*

shrinkage and gas-shrinkage porosity formation are analyzed, and it is emphasized that the appearance of such defects is directly related to the degradation of the liquid feeding network at high solid fractions.

The study summarizes the influence of increasing solid fraction on the narrowing of interdendritic channels, reduction in permeability, localization of liquid flow, and growth of local hydraulic resistance. It is shown that, as the dendritic skeleton evolves toward a coherent solid framework, the liquid phase gradually loses its ability to form a continuous transport network. Under such conditions, even if some amount of liquid remains in the mushy zone, it may no longer participate in real feeding because of topological isolation. This circumstance indicates the limitations of conventional continuum approaches, which mainly operate with averaged characteristics such as permeability, pressure, or liquid fraction, but do not fully capture the structural transformation of the liquid network at the final stage of solidification.

To overcome these limitations, the applicability of the percolation approach is substantiated. Within this interpretation, the mushy zone is considered as a two-phase system in which the liquid phase acts as a transport network and the solid phase forms a constraining framework. It is argued that the loss of interdendritic feeding should be associated not with the complete disappearance of the liquid phase, but with the destruction of its global connectivity and the disappearance of a continuous feeding path. Thus, liquid-phase percolation is proposed as a physically meaningful criterion for feeding loss in the mushy zone. The obtained results confirm that the percolation-based interpretation provides a promising theoretical framework for further modeling of solidification processes, localization of feeding paths, and prediction of shrinkage-related defect formation in metallic castings.

Keywords: *interdendritic feeding; mushy zone; percolation; liquid-phase connectivity; solidification of metals and alloys; shrinkage porosity; gas-shrinkage porosity; permeability; dendrite coherency; defect formation.*

Селівьорстова Тетяна Віталіївна, кандидат технічних наук, доцент, Кафедра інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій. <https://orcid.org/0000-0002-2470-6986>

Selivyorstova Tatjana, candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, Ukrainian state university of science and technologies. <https://orcid.org/0000-0002-2470-6986>

Янов О.О., Клименко О.М.

Розробка типової архітектури побудови цифрових двійників в автоматизованому виробництві при керуванні очисними спорудами

Yanov O., Klymenko O.

Development of a reference architecture for building digital twins in automated production for wastewater treatment plant control.....3

Балаханова Т.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Ковзель М.А., Дементьєва Ж.А.

Методика аналізу зміни геометрії після випробувань на ударно-абразивне зношування

Balakhanova T., Kononenko G., Podolskyi R., Kovzel M., Dementieva Z.

Methodology for analyzing geometry changes after impact–abrasive wear testing.....13

Мішалкін А.П., Петренко В.О., Камкіна Л.В., Фонарьова Т.А., Селегей А.М.

Інтеграція функціоналу комплаєнс-управління в систем у декарбонізованого розвитку металургійного виробництва

Mishalkin A., Petrenko V., Kamkina L., Fonarova T., Selegei A.

Integration of compliance management functionality into the system of decarbonized development of metallurgical production.....30

Тиханський М.П., Тиханська А.М., Курганов І.Д.

Визначення діагностичних ознак технічного стану роликів та їх ресурсу важкого стрічкового конвеєра

Tykhanskyi M., Tykhanska A., Kurhanov I.

Determination of diagnostic indicators of the technical condition of idlers and their service life in a heavy belt conveyor.....56

Картамишев Д.О.

Програмна реалізація імпедансного Рі-регулятора системи керування дугової сталеплавильної печі на мові GO

Kartamyshev D.

Software implementation of an impedance Pi controller for an electric arc furnace control system using the GO programming language.....69

Бармін О.Є., Григор'єва С.В.

Кінетика дифузійного насичення бором інструментальної сталі У8

Hryhorieva S., Barmin O.

Boron diffusion saturation kinetics of tool steel U8.....88

Божко С.А., Бондаренко О.В., Курінний В.П., Шевченко О.І.

Можливості перерозподілу наявних в обігу ресурсів вольфраму між галузями використання

Bozhko S., Bondarenko O., Kurinnyi V., Shevchenko O.

Possibilities of redistribution of available tungsten resources in circulation between industries of use. 102

Honchar V. A., Rudyk O. Yu.

Investigation of the wear resistance of nitrided SHKH15 steel in an abrasive environment

Гонча В., Рудик О.

Дослідження зносостійкості азотованої сталі ШХ15 в абразивному середовищі 116

Hrechanyi O.M., Vasilchenko T.O., Vlasov A.O., Sheyko S.P., Harus D.

Analysis of equipment for obtaining a high-strength heat-resistant alloy with reduced density in laboratory conditions

Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Власов А.О., Шейко С.П., Гарус Д.В.

Аналіз обладнання для отримання в лабораторних умовах високоміцного жаростійкого сплаву зі зниженою щільністю 127

Ivanova L.X., Selivorstov V.Yu., Khytko O.Yu., Bilyi O.P.

Системний підхід до встановлення впливу рідкісноземельних металів на структуру валкових чавунів

Ivanova L., Selivorstov V., Khytko O., Bilyi O.

System approach to determining the effect of rare-earth metals on the structure of roll cast irons 140

Kontorovich D.R., Ovcharuk A.M., Lednyov M.S.

Мультиагентна архітектура м'яких сенсорів на базі глибокого навчання для проактивного управління енергоефективністю рудовідновлювальних печей

Kontorovych D.R., Ovcharuk A.M., Lednov M.S.

Multi-agent architecture of soft sensors based on deep learning for proactive energy efficiency management of submerged arc furnaces..... 157

Korotych Yu.Yu.

Вплив температури гумових віброопор на амплітуду вертикальних коливань вібраційного столу

Korotych Y. Y.

Influence of rubber vibration mount temperature on vibrating table vertical vibration amplitude 168

Kreytser K.O., Kozishkurt E.M.

Застосування комп'ютерних систем управління у процесі лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому обладнанні

Kreytser K., Kozishkurt Y.

Application of computer control systems in the high-pressure die casting process of aluminum alloys on modernized equipment 181

Kuznetsov V., Nikolenko A., Stopkin V., Martyntsev V., Tuhushy R., Teslenko I.

Dynamic modeling of induction motor performance under power quality disturbances

Кузнецов В., Ніколенко А., Стъопкін В., Мартинцев В., Тугуши Р., Тесленко І.

Динамічне моделювання робочих характеристик асинхронного двигуна за умов погіршення якості електроенергії 190

Ларіонов Г.І., Земляна Ю.В., Буліч Ю.Ю., Хворостян В.О.

Про доцільність попереднього навантаження анкерних штанг в умовах України

Larionov H., Zemliana Y., Hovorostyan V., Bulych Y.

On the feasibility of pretention rebar in Ukrainian conditions. 220

Пирлик М.О., Нестеренко М.М.

Умови оптимального режиму доущільнення бетонної суміші та критерії ефективності вібрації

Pyrylyk M., Nesterenko M.

Conditions for the optimal re-compaction mode of a concrete mixture and criteria for vibration efficiency 237

Редчиць Д.О., Моїсєєнко С.В., Адаменко Д.С., Кремнева К.В., Акіменко О.В.

Використання математичного моделювання для вдосконалення процесу селективного лазерного плавлення для 3D-друку

Redchyts D., Moiseienko S., Adamenko D., Kremneva K., Akimenko O.

Mathematical modeling for applications the selective laser melting process in 3D printing 248

Семенов В. К., Цапар В. С.

Впровадження RFID-технології для ідентифікації об'єктів у рітейлі: оптимізація автоматизованих ліній сортування

Vladyslav Sementsov, Vitaliy Tsapar

Implementation of RFID technology for object identification in retail: optimization of automated sorting lines 267

Скоромний А.Л.

Спрощений метод розрахунку інтегральних енергетичних показників металургійної продукції на основі наскрізних витратних коефіцієнтів

Skoromnyi A.

A simplified method for calculating integral energy indicators of metallurgical products using through consumption coefficients 284

Тутова О.В., Пінчук В.О.

Термодинамічний аналіз формування енергетичного оптимуму газифікації вугілля

Tutova O., Pinchuk V.

Thermodynamic analysis of energy optimum formation in coal gasification 304

Березюк М.О., Гуда А.І.

Метод побудови кризово-контекстного датасету для верифікації adaptive IRM

Guda A., Bereziuk M.

Method for constructing a crisis-context dataset for adaptive IRM verification 319

Гавріков В.В., Бугрова Т.М.

Динаміка глибинного вібратора з урахуванням поступального та кутового руху робочого органа

Havrikov V., Buhrova T.

Dynamics of an internal vibrator considering the translational and angular motion of the working body 337

Shvets D.V., Kotov I.A., Karabut N.O.

Cybersecurity of automated information systems of electric power complexes in the mining and processing industry

Швець Д.В., Котов І.А., Карабут Н.О.

Кібербезпека автоматизованих інформаційних систем електроенергетичних комплексів

підприємств гірничо-збагачувальної галузі.....352

Pochka K.I., Polishchuk L.K., Prystailo M.O., Sivak R.I.

Efficiency improvement of concrete mix preparation and mortar delivery processes in construction technological complexes

Почка К.І., Поліщук Л.К., Пристайло М.О., Сивак Р.І.

Підвищення ефективності процесів приготування та подачі бетонних сумішей і штукатурних розчинів у технологічних комплексах будівництва 362

Селівьорстова Т.В.

Перколяційний підхід до опису міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів

Selivyorstova T.

Percolation approach to the description of interdendritic feeding at the final stage of solidification of metals and alloys..... 오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.

УДК 004.94:628.32

Янов О. О., Клименко О. М. **Розробка типової архітектури побудови цифрових двійників в автоматизованому виробництві при керуванні очисними спорудами.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.3-12

У статті запропоновано типову багаторівневу архітектуру побудови цифрових двійників в автоматизованому виробництві при керуванні очисними спорудами. Архітектура включає п'ять рівнів: фізичний, рівень прийому даних, рівень збереження та обробки даних, рівень моделювання та імітації, аналітичний і прикладний рівень. Сформульовано принципи модульності, відкритості, масштабованості, простоти старту та поетапного забезпечення безпеки. Визначено стратегію поетапного впровадження цифрового двійника очисних споруд з використанням існуючої інфраструктури PLC/SCADA та детермінованих фізичних моделей на першому етапі з подальшим переходом до гібридних технік моделювання.

Бібл. 6. Іл. 1.

UDC 004.94:628.32

Yanov O., Klymenko O. **Development of a reference architecture for building digital twins in automated production for wastewater treatment plant control.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 3– 12.

The article proposes a reference multi-layer architecture for building digital twins in automated production for wastewater treatment plant control. The architecture comprises five layers: Physical, Data Ingestion, Data Management, Modeling and Simulation, and Analytics and Application. The principles of modularity, openness, scalability, simplicity of initial deployment, and incremental security are formulated. A strategy for the phased implementation of a digital twin for wastewater treatment plants is defined, utilizing existing PLC/SCADA infrastructure and deterministic physics-based models at the initial stage, with subsequent transition to hybrid modeling techniques.

Ref. 6. fig. 1.

УДК 621.793.3:621.785.5:620.179

Балаханова Т. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Ковзель М. А., Дементьєва Ж. А. **Методика аналізу зміни геометрії після випробувань на ударно-абразивне зношування.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.13-19

Проаналізовано впровадження цифрових технологій у методи дослідження, що підвищує точність вимірювань і розширює можливості аналізу властивостей матеріалів. Метою роботи є підвищення інформативності випробувань на ударно-абразивне зношування шляхом цифровізації результатів. Запропоновано доповнити традиційне визначення втрати маси застосуванням 3D-сканування для кількісної оцінки змін геометрії поверхні та пластичної деформації. Це дозволяє отримувати карту глибин і профілограми, що характеризують опір матеріалу деформуванню. Запропонований підхід забезпечує перехід до двовимірної оцінки зносостійкості та розширює можливості порівняльного аналізу, прогнозування поведінки матеріалів і верифікації моделей зношування.

Бібл. 35, іл. 3.

UDC 621.793.3:621.785.5:620.179

Balakhanova T., Kononenko G., Podolskyi R., Kovzel M., Dementieva Z. **Methodology for Analyzing Geometry Changes after Impact-Abrasive Wear Testing.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 13– 29.

The modern development of materials science is associated with the integration of digital technologies into research methods, which improves measurement accuracy and expands the possibilities for analyzing material properties. The aim of this work is to enhance the informativeness of impact-abrasive wear testing through the digitalization of results. It is proposed to supplement the traditional determination of mass loss with 3D scanning to quantitatively assess changes in surface geometry and plastic deformation. This approach enables the generation of depth maps and profilograms that characterize the material's resistance to deformation. The proposed method provides a transition to a two-dimensional assessment of wear resistance and expands the possibilities for comparative analysis, prediction of material behavior, and validation of wear models.

Ref. 35, Fig. 3.

УДК 669.1:504.06:658.562

Мишалкін А.П., Петренко В.О., Камкіна Л.В., Фонарьова Т.А., Селегей А.М. **Інтеграція функціоналу комплаєнс-управління в систему декарбонізованого розвитку металургійного виробництва** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.30-55

У статті визначено основні напрями інтеграції складових комплаєнс-функціоналу в систему технологічного розвитку чорної металургії, узгоджену з сучасними концепціями декарбонізації, циркулярної економіки та ESG-

орієнтованого управління. Розглянуто механізми та способи підвищення екологічної чистоти основних металургійних процесів шляхом використання вторинних ресурсів (шлами, шлаки, пил, дисперсні відходи вапняного виробництва), фізичної теплоти газів-продуктів виробництва та хімічної енергії CO–H₂-сумішей. Обґрунтовано концептуальні підходи до інтеграції інструментів комплаєнс-управління до системи управління енергоефективністю та ресурсоефективністю металургійного виробництва, що дає змогу підвищити прозорість матеріальних та енергетичних потоків та контролювати вуглеродомісткість основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі. Доведено що інтеграція інструментів комплаєнс-управління до процесів декарбонізації дозволяє контролювати вуглецевий слід, мінімізувати антропогенний вплив на навколишнє середовище та підвищувати економічну стабільність підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та екологічно безпечного виробництва.

Бібл. 30, табл. 1.

UDC 669.1:504.06:658.562

Mishalkin A., Petrenko V., Kamkina L., Fonarova T., Selegei A. **Determination of diagnostic indicators of the technical condition of idlers and their service life in a heavy belt conveyor**// Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 30– 55

This article identifies the main directions for integrating compliance functions into the technological development of the ferrous metallurgy sector, in line with contemporary concepts of decarbonisation, the circular economy and ESG-oriented management. It examines mechanisms and methods for improving the environmental performance of key metallurgical processes through the use of secondary resources (sludge, slag, dust, and dispersed waste from lime production), the latent heat of production gases, and the chemical energy of CO–H₂ mixtures. Conceptual approaches to integrating compliance management tools into the energy and resource efficiency management system of metallurgical production are substantiated, enabling increased transparency of material and energy flows and control of the carbon intensity of the main stages of the end-to-end steel production process. It has been demonstrated that the integration of compliance management tools into decarbonisation processes enables the control of the carbon footprint, minimises anthropogenic impact on the environment, and enhances the economic stability of enterprises. The role of improving existing technologies in the implementation of the concept of sustainable and environmentally safe production has been substantiated.

Ref. 30, table 1.

УДК 622.647.2:681.518.54

Тиханський М.П., Тиханська А.М., Курганов І.Д. **Визначення діагностичних ознак технічного стану роликів та їх ресурсу важкого стрічкового конвеєра** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.56-68

Стану роликів та їх ресурсу важкого стрічкового конвеєра обґрунтовано інформативні параметри для виявлення дефектних роликів та оцінювання їх ресурсу в умовах гірничого виробництва. Проаналізовано вплив статичних і динамічних навантажень на підшипниковий вузол як найменш надійний елемент конструкції. Запропоновано підхід до оцінювання пошкодженості підшипників за повний оберт стрічки та метод виявлення нерухомих роликів шляхом порівняння амплітуд вібросигналу. Визначено, що основними діагностичними ознаками є характеристики вібрації, температурні індикатори та опір обертанню, що дозволяє прогнозувати міжремонтний ресурс у системах автоматизованого моніторингу.

Бібл. 19, іл. 3.

UDC 622.647.2:681.518.54

Tykhanskyi M. P., Tykhanska A. M., Kurhanov I. D. **Determination of diagnostic features for the technical condition and service life of heavy-duty belt conveyor idlers.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 56– 68

Informative parameters for detecting defective idlers and evaluating their service life under mining production conditions are substantiated. The influence of static and dynamic loads on the bearing unit as the least reliable structural element is analyzed. An approach for assessing bearing damage over a full belt revolution and a method for detecting seized idlers by comparing vibration signal amplitudes are proposed. It is determined that the primary diagnostic features include vibration characteristics, thermal indicators, and rotational resistance, enabling the prediction of the inter-repair resource within automated monitoring systems.

Ref. 19, fig. 3.

УДК 621.365:681.5

Картамишев Д.О. **Програмна реалізація імпедансного PI-регулятора системи керування дугової сталеплавильної печі на мові Go.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.69-87

Розглядається задача програмної реалізації імпедансного PI-регулятора для системи керування електродами дугової сталеплавильної печі. В основу покладено рівняння Кассі-Майра та дискретну форму PI-регулятора з механізмом anti-windup. Реалізацію виконано мовою Go у вигляді модульної програмної системи з експортом результатів у форматі CSV. За результатами моделювання час встановлення становить 0,15-0,2 с, статична похибка – 2-3%. Показано перспективність застосування мови Go для розробки алгоритмів керування в системах автоматизації ДСП.

Бібл. 20, іл. 4.

UDC 621.365:681.5

Kartamyshev D.O. **Software implementation of an impedance PI controller for an electric arc furnace control system using the Go programming language.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 69– 87

The paper addresses software implementation of an impedance PI controller for the electrode control system of an electric arc furnace. The approach is based on the Cassie-Mayr arc equations and a discrete-time PI controller with an anti-windup mechanism. The implementation is developed in Go as a modular software system with CSV-based result logging. Simulation results show a settling time of 0.15-0.2 s and a steady-state error of 2-3%. The viability of Go for developing control algorithms in EAF automation systems is demonstrated.

Ref. 20, fig. 4.

УДК 621.785

Бармін О.Є., Григор'єва С.В. **Кінетика дифузійного насичення бором інструментальної сталі У8**// Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.88-101

Досліджено вплив температури та тривалості порошкового борування на товщину, мікроструктуру та мікротвердість дифузійного шару на інструментальній сталі У8. Встановлено, що ріст боридного шару підпорядковується параболическому закону дифузії, характерному для дифузійно-керованих процесів. Визначено фундаментальні кінетичні параметри дифузії бору. Дисперсійний аналіз підтвердив домінуючий вплив температури над тривалістю процесу на товщину шару. На основі методології поверхні відгуку побудовано регресійну модель, придатну для прогнозування товщини боридного шару залежно від режимів обробки без проведення додаткових експериментів.

Бібл. 15, іл. 4, табл. 5.

UDC 621.785

Barmin O.Ye., Hryhorieva S.V. **Boron diffusion saturation kinetics of tool steel U8** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 88– 101

The effect of boriding temperature and holding time on the thickness, microstructure, and microhardness of the diffusion layer on tool steel U8 was investigated using powder pack boriding. It was established that boride layer growth follows a parabolic diffusion law, confirming diffusion-controlled saturation kinetics. The fundamental kinetic parameters of boron diffusion in this system were determined. Analysis of variance confirmed the dominant influence of temperature over process duration on layer thickness. A second-order regression model based on response surface methodology was developed, enabling reliable prediction of boride layer thickness as a function of treatment parameters without additional experimentation.

Bible 15, ill. 4, tab. 5.

УДК 620.1:621.7

Божко С.А., Бондаренко О.В., Курінний В.П., Шевченко О.І. **Можливості перерозподілу наявного в обігу ресурсів вольфраму між галузями використання.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.102-115

Досліджуються галузі та форми застосування вольфраму, аналізуються способи переробки матеріалів, які містять вольфрам, з точки зору можливості перерозподілу наявного ресурсу між сферами його застосування. Встановлено, що з цієї точки зору найбільшим є виробі з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму; На території України щорічно знаходиться в обігу приблизно від однієї до двох тисяч тон виробів з твердих сплавів. Способи переробки відходів твердих сплавів, які не передбачають відновлення вольфраму з карбіду, характеризується мінімальними витратами енергії, але обмеженими можливостями щодо перерозподілу наявного ресурсу вольфраму між сферами його використання. Способи переробки відходів твердих сплавів, які передбачають відновлення вольфраму, створюють найширші можливості для перерозподілу наявного в обігу ресурсу вольфраму між різними сферами його використання.

Бібл. 18, іл. 3

UDK 620.1:621.7

Bozhko S.A., Bondarenko O. V., Kurinnyi V. P., Shevchenko O. I. **Possibilities of redistribution of available tungsten resources in circulation between industries of use.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 102– 115

The areas and forms of application of tungsten are studied, methods of processing materials containing tungsten are analyzed from the point of view of the possibility of redistributing the available resource between its areas of application. It has been established that from this point of view, the largest are products made of hard alloys based on tungsten carbide; Approximately one to two thousand tons of products made of hard alloys are in circulation in Ukraine annually. Methods of processing waste of hard alloys that do not involve the recovery of tungsten from carbide are characterized by minimal energy consumption, but limited possibilities for the redistribution of the available resource of tungsten between its areas of use. Methods of processing waste of hard alloys that involve the recovery of tungsten create the widest possibilities for the redistribution of the available resource of tungsten between its different areas of use.

Ref. 18, il. 3

УДК 621.891

Гонча В., Рудик О. **Дослідження зносостійкості азотованої сталі ШХ15 в абразивному середовищі** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.116-126

Досліджено зносостійкість азотованої сталі ШХ15 в абразивному середовищі після азотування в тліючому розряді у безводневих азотно-аргонових середовищах. Проаналізовано вплив технологічних параметрів, зокрема тиску та вмісту аргону, на товщину, твердість, фазовий склад і градієнт твердості азотованих шарів із використанням двофакторного рототабельного планування. Розроблено емпіричні математичні моделі, що описують властивості азотованого шару та процес зношування. Експериментально встановлено, що зносостійкість, твердість поверхні та товщину азотованого шару можна керовано змінювати й оптимізувати шляхом варіювання режимів азотування. Найвищу зносостійкість досягнуто за оптимальних параметрів азотування, що суттєво перевищує показники гартованої сталі.

Ключові слова: зносостійкість, азотовані шари, тліючий розряд, абразивне середовище.

Бібл. 4, іл. 6, табл. 4.

UDC 621.891

Honchar V. A., Rudyk O. Yu. **Investigation of the wear resistance of nitrided ShKh15 steel in an abrasive environment**// Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 116– 126

The study investigates the wear resistance of nitrided ShKh15 steel in an abrasive environment after glow-discharge nitriding in hydrogen-free nitrogen–argon atmospheres. The influence of technological parameters, including pressure and argon content, on the thickness, hardness, phase composition, and hardness gradient of nitrided layers was analyzed using a two-factor rotatable design. Empirical mathematical models describing nitrided layer properties and wear behavior were developed. Experimental results showed that wear resistance, surface hardness, and layer thickness can be controlled and optimized by varying nitriding conditions. The highest wear resistance was achieved under optimal nitriding conditions, significantly exceeding that of quenched steel.

Keywords: wear resistance, nitrided layers, glow-discharge nitriding, abrasive environment.

Ref. 4, ill. 6, tab. 4.

УДК 621.78.04

Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Власов А.О., Шейко С.П., Гарус Д.В. **Аналіз обладнання для отримання в лабораторних умовах високоміцного жаростійкого сплаву зі зниженою щільністю** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.127-139

Проведено комплексний аналіз сучасного електротермічного обладнання, яке може бути використане для отримання високоміцних жаростійких сплавів на основі нікелю зі зниженою щільністю в лабораторних умовах. Обґрунтовано актуальність розробки нових матеріалів для авіабудування, що здатні працювати при високих температурах, циклічних навантаженнях та агресивних газових середовищах. Виконано порівняльну оцінку можливостей електродугових печей, вакуумно-дугового переплаву, електрошлакового переплаву, вакуумно-індукційних та електронно-променевих установок з урахуванням критеріїв чистоти металу, точності легування, енергоспоживання та придатності для лабораторних умов.

Бібл. 29, іл. 2 табл. 1,

UDC 621.78.04

Hrechanyi O.M., Vasilchenko T.O., Vlasov A.O., Sheyko S.P., Harus D.V. **Analysis of equipment for obtaining a high-strength heat-resistant alloy with reduced density in laboratory conditions** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 127– 139

A comprehensive analysis of modern electrothermal equipment has been carried out, which can be used to obtain high-strength heat-resistant nickel-based alloys with reduced density in laboratory conditions. The relevance of the development of new materials for aircraft construction that are capable of operating at high temperatures, cyclic loads and aggressive gas environments has been substantiated. A comparative assessment of the capabilities of electric arc furnaces, vacuum arc remelting, electroslag remelting, vacuum induction and electron beam installations has been carried out, taking into account the criteria of metal purity, alloying accuracy, energy consumption and suitability for laboratory conditions.

Ref. 29, fig. 2, table 1

УДК 621.74:669.131.7

Іванова Л.Х., Селівьорстов В.Ю., Хитко О.Ю., Білий О.П. Системний підхід до встановлення впливу рідкісноземельних металів на структуру валкових чавунів // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.140-156

У статті розглядається вплив рідкісноземельних металів на мікроструктуру валкових чавунів. Наведено аналіз сучасного стану вальцеливарного виробництва та питання у обраному напрямку дослідження. Протягом багатьох років у вальцеливарному виробництві ведуться роботи із заміни магнію іншими модифікаторами. Аналіз наявних досліджень і публікацій охоплює питання, що зосереджені на окремих складниках, тоді як модель модифікування чавунних валків РЗМ потребує подальшого дослідження та узагальнення. Метою статті є встановлення карбідотворюючої здатності різних РЗМ у білих валкових чавунах. Для досягнення цієї мети була поставлена наступна задача – установити вплив хімічних елементів церієвої та ітрієвої підгруп РЗМ на мікроструктуру валкового чавуну.

Бібл. 19, іл. 2 табл. 2

UDC 621.74:669.131.7

Ivanova L., Selivorstov V., Khytko O., Bilyi O. **System approach to determining the effect of rare-earth metals on the structure of roll cast irons** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 140– 156

This article examines the influence of rare-earth metals on the microstructure of continuous cast iron. It presents an analysis of the current state of continuous casting production and the issues within the chosen field of research. For many years, work has been underway in continuous casting production to replace magnesium with other modifiers. An analysis of existing studies and publications covers issues focused on individual components, whilst the model for modifying cast iron rolls with rare earth elements requires further research and generalisation. The aim of this article is to determine the carbide-forming ability of various rare earth elements in white roll cast iron. To achieve this aim, the following objective was set: to establish the influence of chemical elements from the cerium and yttrium subgroups of rare earth elements on the microstructure of roll cast iron.

Ref. 19, fig. 2, table 2

УДК 621.365.5:004.8:66.041

Конторович Д.Р., Овчарук А.М., Ледньов М.С. Мультиагентна архітектура м'яких сенсорів на базі глибокого навчання для проактивного управління енергоефективністю рудовідновлювальних печей. // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.157-167

Запропоновано концепцію інтелектуальної системи управління рудовідновлювальною піччю на основі мультиагентної архітектури з використанням мережі «м'яких сенсорів». Розроблено структуру спеціалізованих агентів, що базуються на гібридних нейромережевих моделях (LSTM, PINN) для проактивного прогнозування електричного та термічного стану ванни печі. Доведено можливість переходу до випереджального управління з горизонтом прогнозування 1–3 години, що забезпечує стабілізацію технологічного процесу та зниження питомих витрат електроенергії.

Бібл. 9, рис. 1.

UDC 621.365.5:004.8:66.041

Kontorovich D.R., Ovcharuk A.M., Lednov M.S. **Multi-agent architecture of soft sensors based on deep learning for proactive energy efficiency management of submerged arc furnaces**. // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 157– 167

The concept of an intelligent control system for a submerged arc furnace based on a multi-agent architecture using a network of "soft sensors" is proposed. A structure of specialized agents based on hybrid neural network models (LSTM, PINN) has been developed for proactive forecasting of the electrical and thermal state of the furnace bath. The feasibility of transitioning to predictive control with a forecasting horizon of 1–3 hours is proven, ensuring stabilization of the technological process and reduction of specific electricity consumption.

Ref. 9, fig. 1.

УДК 624.04

Коротич Ю. Ю. **Вплив температури гумових віброопор на амплітуду вертикальних коливань вібраційного столу.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.168-180

Проводиться дослідження вібраційного обладнання для віброформування бетонних виробів по визначенню температурних режимів роботи гумових віброопор. Виявлено залежність амплітуди коливань зі збільшенням температури гуми, яка втрачає жорсткість, що призводить до поступового підвищення амплітуди коливань. Виконано аналіз результатів досліджень з метою оцінки впливу досліджуваних параметрів на ефективність роботи обладнання. Наведено практичні рекомендації щодо експлуатації та удосконалення віброформувального обладнання з гумовими пружними віброопорами з урахуванням отриманих результатів.

Бібл. 11, іл. 4, табл. 1.

UDC 624.04

Korotych Y. Y. **Influence of rubber vibration mounts temperature on vibrating table vertical vibration amplitude.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 168– 180

A study of vibration equipment for vibroforming concrete products is carried out to determine the temperature operating conditions of rubber vibration mounts. A relationship between the oscillation amplitude and the increase in rubber temperature has been identified: as the temperature rises, the rubber loses stiffness, which leads to a gradual increase in oscillation amplitude. An analysis of the research results was performed to evaluate the influence of the studied parameters on the efficiency of equipment operation. Practical recommendations for the operation and improvement of vibroforming equipment with elastic rubber vibration mounts are provided, taking into account the obtained results.

Ref. 11, fig. 4, tab. 1.

УДК 669.14:004.9

Крейцер К.О., Козішкурт Є.М. **Застосування комп'ютерних систем управління у процесі лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому обладнанні** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.181-189

У статті висвітлено результати впровадження комп'ютеризованої системи керування процесом лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому виробничому обладнанні. Описано практичну реалізацію керування подачею розплаву, тиском ущільнення та охолодженням форми в режимі реального часу з урахуванням температурно-швидкісних параметрів кожного циклу. Завдяки алгоритмам адаптивного регулювання вдалося скоротити тривалість технологічного циклу на 10 %, знизити енерговитрати, а також зменшити частку дефектних виробів із пористістю та тріщинами. Встановлено, що використання комп'ютерного моніторингу дозволяє точніше виявляти критичні зони в прес-формі, де відбуваються перегріву або недостатнє заповнення.

Бібл. 10, іл. 2, табл. 1.

UDC 669.14:004.9

Kreytser K., Kozishkurt Y. **Application of computer control systems in the high-pressure die casting process of aluminum alloys on modernized equipment** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 181– 189

This article presents the results of implementing a computerised control system for the die-casting of aluminium alloys on modernised production equipment. It describes the practical implementation of real-time control of melt feed, compaction pressure and mould cooling, taking into account the temperature and speed parameters of each cycle. Thanks to adaptive control algorithms, it was possible to reduce the duration of the production cycle by 10%, lower energy consumption, and also reduce the proportion of defective products with porosity and cracks. It has been established that the use of computerised monitoring allows for more accurate identification of critical zones in the mould where overheating or insufficient filling occurs.

Ref. 10, fig. 2, tab. 1.

УДК 621.316.925

Кузнецов В., Ніколенко А., Стьопкін В., Мартинцев В., Тугуши Р., Тесленко І. **Динамічне моделювання робочих характеристик асинхронного двигуна за умов погіршення якості електроенергії** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.190-219

У статті представлено динамічну електромагнітну модель трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, розроблену для моделювання його роботи в умовах реальних порушень якості електроенергії. Актуальність даної роботи зумовлена зростаючим впливом проблем електромагнітної сумісності та енергетичних втрат у промислових системах, що піддаються впливу асиметрії напруги та гармонічних спотворень — умов, типових для мереж з нелінійними навантаженнями, такими як зварювальне обладнання, дугові печі та перетворювачі частоти. Традиційні моделі двигунів, які передбачають ідеальні умови живлення, є

недостатніми для точного прогнозування погіршення характеристик у разі таких збурень. Щоб усунути це обмеження, запропонована модель базується на просторово-часових комплексах та розширеній формі рівнянь Парка–Горева.

Бібл. 27, іл. 7, табл. 2.

UDC 621.316.925

Kuznetsov V., Nikolenko A., Stopkin V., Martyntsev V., Tuhushy R., Teslenko I. **Dynamic modeling of induction motor performance under power quality disturbances** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 190– 219

The paper presents a dynamic electromagnetic model of a three-phase squirrel-cage asynchronous motor developed to simulate its operation under real power quality disturbances. The relevance of this work is driven by the increasing impact of electromagnetic compatibility issues and energy losses in industrial systems exposed to voltage asymmetry and harmonic distortion—conditions typical for networks with nonlinear loads such as welding equipment, arc furnaces, and frequency converters. Traditional motor models, which assume ideal supply conditions, are not sufficient for accurately predicting performance degradation under such disturbances. To address this limitation, the proposed model is based on space-time complexes and an extended form of the Park–Gorev equations.

Ref. 27, fig. 7, tab. 2.

УДК 622.8.1/.8:519.65:539.3

Ларіонов Г.І., Земляна Ю.В., Буліч Ю.Ю., Хворостян В.О. **Про доцільність попереднього навантаження анкерних штанг в умовах України.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.220-236

В роботі наведено результати проведеного, сумісно з американськими фахівцями, промислового експерименту, який полягав у порівнянні двох технологій кріплення гірничих виробок вугільних шахт (на прикладі шахти Білоріченська Луганської області). Особливість американської технології у кріпленні виробок базувалась на застосуванні пружної шайби для створення попереднього навантаження штанги металополімерного анкера на відміну від української технології за якої попереднє навантаження створювалось з допомогою бурового обладнання. Наведено результати порівняння.

Бібл. 10, іл. 8.

УДК 622.8.1/.8:519.65:539.3

Larionov H., Zemliana Yu., Bulych Yu., Hvorostyan V. **On the feasibility of pretension rebar in Ukrainian conditions.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 220– 236

The paper presents the results of an industrial experiment conducted jointly with American specialists, which consisted in comparing two technologies for fastening mining workings of coal mines (using the example of the Belorichensk mine in Luhansk region). The peculiarity of the American technology in fastening workings was based on the use of an elastic washer to create a pretension for the metal-polymer rebar, in contrast to the Ukrainian technology, in which the pretension was created using drilling equipment. The results of the comparison are presented.

Ref. 10, fig. 8

УДК 666.9.033

Пирлик М.О., Нестеренко М.М. **Умови оптимального режиму доущільнення бетонної суміші та критерії ефективності вібрації** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.237-247

У статті розглянуто умови реалізації оптимального режиму доущільнення бетонної суміші у вібраційній машині з просторовим збудженням. Побудовано аналітичний підхід до оцінювання ефективності процесу, який ґрунтується на визначенні дисипованої енергії у вертикальному та горизонтальному каналах деформування, а також на врахуванні порогових умов активного ущільнення за динамічним тиском і зсувними напруженнями. Встановлено, що найбільш ефективний режим досягається за умови узгодження параметрів вертикальних і горизонтальних коливань, максимізації енергії, що передається бетонній суміші, та підтримання квазірезонансного стану системи в процесі ущільнення. Одержані результати можуть бути використані для вибору параметрів привантажувача і режимів роботи віброзбуджувачів при проектуванні та вдосконаленні вібраційних установок для формування бетонних виробів.

Бібл. 7, іл. 1

UDC 666.9.033

Pyrlyk M.O., Nesterenko M.M. **Conditions for the Optimal Re-Compaction Mode of a Concrete Mixture and Criteria for Vibration Efficiency** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 237– 247

The article considers the conditions for implementing the optimal re-compaction mode of a concrete mixture in a vibration machine with spatial excitation. An analytical approach to evaluating the efficiency of the process has been

developed, based on determining the dissipated energy in the vertical and horizontal deformation channels, as well as taking into account the threshold conditions of active compaction according to dynamic pressure and shear stresses. It has been established that the most efficient mode is achieved under the condition of coordination of the parameters of vertical and horizontal oscillations, maximization of the energy transferred to the concrete mixture, and maintenance of the quasi-resonant state of the system during the compaction process. The obtained results can be used to select the parameters of the surcharge device and the operating modes of vibration exciters in the design and improvement of vibration installations for forming concrete products.

Refs. 7, Fig. 1

УДК 621.7:004.94

Редчиць Д.О., Моїсеєнко С.В., Адаменко Д.С., Кремнева К.В., Акіменко О.В. **Використання математичного моделювання для вдосконалення процесу селективного лазерного плавлення для 3D-друку** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.248-266

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності прогнозування процесів селективного лазерного плавлення металевих порошків в адитивному виробництві. Метою роботи є розробка узагальненої фізико-математичної моделі та ефективного чисельного алгоритму з урахуванням теплообміну, гідродинаміки та еволюції вільної поверхні. Використано метод скінченних об'ємів і ітераційний розрахунковий блок GMRES. У результаті отримано розподіл поля температури в розрахунковій області з виділенням зони ліквідусу. Побудовано залежності ширини та глибини ванни розплаву від швидкості руху лазера та діаметру лазерної плями. Зроблено висновок про адекватність моделі та її придатність для інженерних розрахунків.

Бібл. 15, іл. 3

UDC 621.7:004.94

Redchys D., Moiseienko S., Adamenko D., Kremneva K., Akimenko O. **Mathematical modeling for applications the selective laser melting process in 3D printing** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 248– 266

The relevance of this study stems from the need to improve the accuracy of predicting selective laser melting processes for metal powders in additive manufacturing. The aim of this work is to develop a generalised physical-mathematical model and an effective numerical algorithm that takes into account heat transfer, hydrodynamics and the evolution of the free surface. The finite volume method and the GMRES iterative calculation block were employed. As a result, the temperature field distribution in the computational domain was obtained, with the liquidus zone identified. Dependencies of the width and depth of the molten pool on the laser velocity and the laser spot diameter were established. It was concluded that the model is adequate and suitable for engineering calculations.

Refs. 15, Fig. 3

УДК 004.942:621.396.67:658.78

Семенцов В.К., Цапар В.С. **Впровадження RFID-технології для ідентифікації об'єктів у ритейлі: оптимізація автоматизованих ліній сортування** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.267-283

Досліджено інтеграцію систем радіочастотної ідентифікації УВЧ-діапазону у високошвидкісні конвеєрні лінії складів. Обґрунтовано архітектурні рішення для мінімізації впливу радіоперешкод на зчитування пасивних міток. Розроблено гібридну математичну модель обробки колізій, що поєднує методи Query Tree та DFSA стандарту EPCglobal Gen2. За допомогою цифрового двійника в MATLAB Simulink доведено можливість досягнення надійності ідентифікації 99.2% при швидкості конвеєра 3.0 м/с. Запропоновано використання Edge Computing для перетворення даних у формат ALE, що знижує затримку системи до 42 мс. Результати підтверджують ефективність моделі для оптимізації логістичних процесів у ритейлі.

Бібл. 10, іл. 2.

UDC 004.942:621.396.67:658.78

Sementsov V.K., Tsapar V.S. **Implementation of RFID technology for object identification in retail: optimization of automated sorting lines** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 267– 283

The study investigates the integration of UHF RFID systems into high-speed conveyor lines of retail warehouses. Architectural solutions are justified to minimize the impact of radio interference on passive tag reading. A hybrid mathematical collision processing model combining Query Tree and DFSA methods of the EPCglobal Gen2 standard is developed. Using a digital twin in MATLAB Simulink, the possibility of achieving 99.2% identification reliability at a conveyor speed of 3.0 m/s is proven. The use of Edge Computing for data conversion into ALE format is proposed, reducing system latency to 42 ms. The results confirm the model's effectiveness for optimizing retail logistics processes.

Ref. 10, ill. 2.

УДК 628.511:620.9

Скоромний А.Л. **Спрощений метод розрахунку інтегральних енергетичних показників металургійної продукції на основі наскрізних витратних коефіцієнтів** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.284-303

В роботі проаналізовано підходи до визначення інтегральних енергетичних показників металопродукції. На основі методики наскрізної енергоємності розроблено спрощений метод їх розрахунку з використанням наскрізних витратних коефіцієнтів. Валідація методу шляхом порівняння результатів із повною розрахунковою схемою та обмеженим LCA показала його високу точність (розбіжність із повною схемою не перевищує 1,0–1,5 %) і перевагу над обмеженим LCA, який в окремих випадках дає відхилення до 38 %. Запропонований метод може бути використаний при виробничому плануванні, технічному переозброєнні, а також для розрахунку вуглецевої інтенсивності продукції.

Бібл. 16, іл. 7.

UDC 628.511:620.9

Skoromnyi A.L. **A simplified method for calculating integral energy indicators of metallurgical products using through consumption coefficients** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 284– 303

This paper examines approaches to determining integral energy indicators of metallurgical products. Using the through-plant energy intensity methodology, it proposes a simplified calculation method based on through consumption coefficients. Validation against the full calculation scheme and limited LCA confirmed the high accuracy of the method: the deviation from the full scheme does not exceed 1.0–1.5%. The comparison also showed an advantage over limited LCA, which in some cases gives deviations of up to 38%. The proposed method can be used in production planning, technical modernization, and in calculating product carbon intensity.

Ref. 16, ill. 7.

УДК 662.764

Тутова О.В., Пінчук В.О. **Термодинамічний аналіз формування енергетичного оптимуму газифікації вугілля** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.304-318

У роботі застосовано рівноважне термодинамічне моделювання для аналізу газифікації вугілля залежно від коефіцієнта витрати окисника. Показано, що параметри процесу змінюються узгоджено та формують тристадійну структуру: область неповного перетворення, раціональних режимів та надлишкового окислення. Встановлено, що енергетично оптимальний режим реалізується при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 та відповідає максимуму сумарної горючої складової і мінімуму продуктів окислення. Запропоновано інтегральний енергетичний показник, який враховує вихід генераторного газу та його теплоту згоряння. Показано, що цей показник має максимум при оптимальному режимі.

Бібл. 18, іл. 6.

UDC 662.764

Tutova O.V., Pinchuk V.O. **Thermodynamic analysis of energy optimum formation in coal gasification** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 304– 318

Equilibrium thermodynamic modeling was applied to analyze coal gasification as a function of the oxidizer consumption coefficient. It is shown that process parameters change in a coordinated manner and form a three-stage structure: a region of incomplete conversion, a region of rational operating conditions, and a region of excessive oxidation. It is established that the energy-optimal regime is achieved at an oxidizer consumption coefficient of about 0.3 and corresponds to the maximum of the total combustible fraction and the minimum of oxidation products. An integral energy indicator accounting for both gas yield and heating value is proposed. This indicator exhibits a maximum under optimal conditions.

Ref. 18, ill. 6.

УДК 004.8

Гуда А.І., Березюк М.О. **Метод побудови кризово-контекстного датасету для верифікації Adaptive IRM** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.319-336

У статті запропоновано метод побудови кризово-контекстного датасету для верифікації Adaptive IRM у задачах прихованої контекстної адаптації великих мовних моделей. Запропоновано підхід перетворення повідомлень NumAID у пари «абстрактний запит — кризово-залежна відповідь» без явних маркерів лиха. Реалізовано генеративний pipeline із primary, retry та fallback етапами. Сформовано датасет обсягом 41 152 записи за п'ятьма категоріями подій. Запропоновано план подальшої валідації та експериментального оцінювання моделей.

Бібл. 21, іл. 1, табл. 2, лист. 3.

UDC 004.8

Guda, A., Bereziuk M. **Method for constructing a crisis-context dataset for Adaptive IRM verification**// Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 319– 336

The paper proposes a method for constructing a crisis-context dataset to verify Adaptive IRM in hidden context adaptation tasks of large language models. A transformation approach is introduced to convert HumAID messages into “abstract query — crisis-dependent answer” pairs without explicit disaster markers. A generative pipeline with primary, retry, and fallback stages is implemented. A dataset of 41,152 records across five crisis categories is created. A plan for further validation and experimental evaluation is outlined.

Refs. 21, Fig. 1, Table 2, Listings 3.

УДК 621.928.23

Гавріков В.В., Бугрова Т.М. **Аналітичне дослідження коливального режиму вібраційного конвеєра з двома інерційними вібробуджувачами**// Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.337-351

У статті розглянуто глибинний вібратор для ущільнення бетонних сумішей та побудовано аналітичний підхід до дослідження його динаміки з урахуванням поступального переміщення центра мас, кутових коливань корпусу і взаємодії робочого органа з бетонною сумішшю.

Одержано аналітичні залежності для визначення відцентрових сил дебалансних вантажів, результуючого моменту, приведеної маси системи, амплітуди поступальних коливань центра мас та амплітуди кутових коливань корпусу, що дало змогу оцінити особливості формування просторового руху глибинного вібратора.

Встановлено, що характер руху робочого органа істотно залежить від кута розвороту дебалансних вантажів, частоти обертання вала, моменту інерції корпусу та приєднаної маси бетонної суміші, а зміна цих параметрів дозволяє регулювати співвідношення між поступальною та кутовою складовими коливань.

Одержані результати можуть бути використані для вибору раціональних параметрів глибинного вібратора, обґрунтування режимів ущільнення бетонних сумішей, зменшення ризику їх розшарування та подальшої оптимізації форми робочого органа.

Бібл. 9, рис. 2.

UDC 621.928.23

Havrikov V., Buhrova T. **Dynamics of an internal vibrator considering the translational and angular motion of the working body** Method for constructing a crisis-context dataset for Adaptive IRM verification// Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 337– 351

The article considers an internal vibrator for compacting concrete mixtures and develops an analytical approach to studying its dynamics, taking into account the translational displacement of the center of mass, angular oscillations of the housing, and the interaction of the working body with the concrete mixture.

Analytical dependencies are obtained for determining the centrifugal forces of unbalanced masses, the resulting moment, the reduced mass of the system, the amplitude of translational oscillations of the center of mass, and the amplitude of angular oscillations of the housing, which made it possible to assess the specific features of the spatial motion formation of the internal vibrator.

It is established that the motion pattern of the working body significantly depends on the phase angle of the unbalanced masses, the shaft rotation frequency, the moment of inertia of the housing, and the added mass of the concrete mixture, while changing these parameters makes it possible to regulate the ratio between the translational and angular components of oscillations.

The obtained results can be used to select rational parameters of the internal vibrator, substantiate compaction modes for concrete mixtures, reduce the risk of their segregation, and further optimize the shape of the working body.

Refs. 9, Fig. 2.

УДК 004.056:681.518:621.31:622.7

Швець Д.В., Котов І.А., Карабут Н.О. **Кібербезпека автоматизованих інформаційних систем електроенергетичних комплексів підприємств гірничо-збагачувальної галузі.** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.352-361

Впровадження концепцій цифрового виробництва на гірничо-збагачувальних комбінатах суттєво підвищує ризик цілеспрямованих кібератак на їхні електроенергетичні комплекси. Це може призвести до техногенних аварій та зупинки енергоємного обладнання. Для вирішення цієї актуальної проблеми у дослідженні розроблено комплексну архітектурну модель кіберзахисту на базі концепції ешелонованого захисту та міжнародного стандарту ІЕС 62443. Запропоновано багаторівневу мікросегментацію мереж, глибоку інспекцію трафіку та використання мікроядерних операційних систем. Показано, що інтеграція цих архітектурних рішень із предиктивним апаратним моніторингом струмів живлення програмованих логічних контролерів надійно запобігає програмній підміні керуючої

логіки. Це гарантує безперервність енергоефективного керування процесами переробки сировини на об'єктах критичної інфраструктури.

Бібл. 8, іл. 1.

UDC 004.056:681.518:621.31:622.7

Shvets D.V., Kotov I.A., Karabut N.O. **Cybersecurity of automated information systems of electric power complexes in the mining and processing industry.** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 352– 361

Implementing digital manufacturing concepts at mining and processing plants significantly increases the risk of targeted cyberattacks on their electric power complexes, potentially causing technogenic disasters and shutdowns of energy-intensive equipment. To address this, the study develops a comprehensive cybersecurity model based on the Defense-in-Depth concept and the IEC 62443 standard. It proposes multi-level network microsegmentation, deep packet inspection, and microkernel operating systems. It is shown that integrating these solutions with predictive hardware monitoring of programmable logic controller supply currents reliably prevents control-logic spoofing, guaranteeing continuous, energy-efficient control of raw material processing at critical infrastructure facilities.

Ref. 8, fig. 1.

УДК 621.928:666.972:519.876

Почка К.І., Поліщук Л.К., Пристайло М.О., Сивак Р.І. **Підвищення ефективності процесів приготування та подачі бетонних сумішей і штукатурних розчинів у технологічних комплексах будівництва** // Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.362-375

У статті досліджено вплив кінематичних параметрів змішувального обладнання, реологічних характеристик бетонних сумішей і штукатурних розчинів та геометричних параметрів систем подачі на ефективність функціонування технологічних комплектів будівництва. Особливу увагу приділено встановленню взаємозв'язку між параметрами процесів змішування матеріалу та умовами його подальшого транспортування до місця укладання або нанесення.

Запропоновано узагальнений показник ефективності технологічного комплексу, який враховує продуктивність процесу приготування суміші, ступінь її однорідності після змішування та енергетичні витрати під час транспортування трубопроводними системами подачі. На основі використання аналітичних залежностей встановлено закономірності зміни показників ефективності залежно від режимів роботи змішувального і транспортуючого обладнання.

Бібл 15, іл. 1

UDC 621.928:666.972:519.876

Pochka K.I., Polishchuk L.K., Prystailo M.O., Sivak R.I. **Efficiency improvement of concrete mix preparation and mortar delivery processes in construction technological complexes** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 362– 375

This article investigates the influence of the kinematic parameters of mixing equipment, the rheological characteristics of concrete mixes and plastering mortars, and the geometric parameters of delivery systems on the operational efficiency of construction process units. Particular attention is paid to establishing the relationship between the parameters of material mixing processes and the conditions of its subsequent transport to the site of laying or application.

A generalised efficiency indicator for the technological unit is proposed, which takes into account the productivity of the mixture preparation process, the degree of its homogeneity after mixing, and the energy consumption during transport via pipeline supply systems. Based on the use of analytical dependencies, patterns of change in efficiency indicators depending on the operating modes of the mixing and transport equipment have been established.

Ref. 15, fig. 1.

УДК 004.94:621.74:669.017

Селівьорстова Т.В. **Перколяційний підхід до опису міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів**// Сучасні проблеми металургії, № 29 – 2026. С.376-388

У статті розглянуто фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів. Показано, що ефективність компенсації усадки визначається не лише наявністю рідкої фази, а й її зв'язністю, проникністю міждендритного простору та умовами транспорту. Обґрунтовано доцільність застосування перколяційного підходу до опису *mushy zone* як двофазної системи, у якій рідка фаза виконує роль транспортної мережі, а тверда — обмежувального каркаса. Встановлено, що втрата міждендритного живлення пов'язана з руйнуванням глобальної зв'язності рідкої фази. Запропонований підхід може бути використаний для подальшого моделювання пористості та прогнозування дефектонебезпечних зон у виливках на основі урахування структурної еволюції *mushy zone*, локалізації потоків і падіння тиску рідини.

Бібл 15, іл. 3

UDC 004.94:621.74:669.017

Selivyorstova T. **Percolation Approach to the Description of Interdendritic Feeding at the Final Stage of Solidification of Metals and Alloys** // Modern problems of metallurgy, № 29 – 2026. P. 376– 388

The article examines the physical prerequisites of interdendritic feeding at the final stage of solidification of metals and alloys. It is shown that the efficiency of shrinkage compensation is determined not only by the presence of a liquid phase, but also by its connectivity, the permeability of the interdendritic space, and transport conditions. The applicability of the percolation approach to describing the *mushy zone* as a two-phase system is substantiated, in which the liquid phase acts as a transport network and the solid phase as a constraining framework. It is established that the loss of interdendritic feeding is associated with the destruction of the global connectivity of the liquid phase. The proposed approach can be used for further modeling of porosity and prediction of defect-prone zones in castings based on the structural evolution of the *mushy zone*, flow localization, and liquid pressure drop.

Ref. 15, fig. 3.

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

НАУКОВІ ВІСТІ

№ 29

Технічна редакція: Островська К.Ю.
Комп'ютера верстка: Бімалов Д.В., Селівьорстова Т.В.

Здано в набір 07.03.26. Підписано до друку 30.04.26.
Формат А4. Гарнітура Шкільна. Тираж 300. Зам. № 07/26.

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»
49005, Дніпро
st@nmetau.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684