

Шапуров О.О.

доктор економічних наук,
професор кафедри інформаційної економіки,
підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Стоєв В.В.

кандидат економічних наук,
доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Муратов Ю.В.

магістр,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Shapurov Olexandr, Stoiev Volodymyr, Muratov Yurii

Engineering Educational and Scientific Institute named by Yuriy Potebni
Zaporizhzhia National University

**ОРГАНІЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСАМИ
ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

**ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF BUSINESS PROCESSES
OF INDUSTRIAL ENTERPRISES ON THE BASE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Зростаюче використання штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МЛ) в металургійній галузі відкриває нові можливості для підвищення ефективності виробництва, оптимізації процесів і вдосконалення управління ресурсами. На основі сучасних досліджень та практичних прикладів розглянуто роль ШІ та МЛ у досягненні стійкого розвитку металургійного сектору, зокрема через покращення моніторингу якості та форми виробів, підтримку технічного обслуговування обладнання та оптимізацію матеріальних властивостей. Інтеграція розумного обслуговування та концепції Індустрії 4.0 сприяє підвищенню енергоефективності, ефективному використанню ресурсів та зменшенню впливу на навколишнє середовище, що відповідає Цілям сталого розвитку ООН до 2030 року та Європейському зеленому курсу, запущеному у 2020 році. Водночас існують як технологічні, так і нетехнологічні бар'єри для повноцінного впровадження ШІ у металургійну галузь, зокрема обмеження в інфраструктурі, потреба в розвинених обчислювальних ресурсах, а також питання кібербезпеки та довіри до ШІ-рішень. Важливим аспектом залишається інвестиція в «людський капітал» через підвищення кваліфікації працівників, запровадження навчальних програм та залучення молодих спеціалістів, оскільки ефективне використання ШІ вимагає нових компетенцій та міждисциплінарних знань. Аналіз також відзначає, що інноваційні рішення, такі як розробка софт-сенсорів, моделювання поведінки матеріалів і прогнозування механічних властивостей за допомогою алгоритмів МЛ, можуть заповнити прогалини в існуючих знаннях і покращити керування ресурсами на всіх етапах виробничого циклу. Впровадження ШІ у металургію має потенціал сприяти циркулярній економіці та промислому симбіозу, що підвищує сталість галузі, забезпечуючи не лише економічні, але й екологічні та соціальні вигоди для всього суспільства.

Ключові слова: металургійний сектор, машинне навчання, штучний інтелект, циркулярна економіка, промисловий симбіоз.

The growing use of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) in the metallurgical industry opens up new opportunities for increasing production efficiency, optimizing processes and improving resource management. On the basis of modern research and practical examples, the role of AI and ML in achieving sustainable development of the metallurgical sector is considered, in particular through the improvement of monitoring of the quality and shape of products, support of technical maintenance of equipment and optimization of material properties. The integration of smart service and Industry 4.0 concepts contributes to increased energy efficiency, efficient use of resources and reduced environmental impact, which is in line with the UN Sustainable Development Goals until 2030 and the European Green Deal launched in 2020. At the same time, there are both technological and non-technological barriers to the full implementation of AI in the metallurgical industry, including infrastructure limitations,

the need for advanced computing resources, as well as issues of cyber security and trust in AI solutions. An important aspect remains the investment in "human capital" through improving the qualifications of employees, introducing training programs and attracting young specialists, since the effective use of AI requires new competencies and interdisciplinary knowledge. The analysis also notes that innovative solutions, such as the development of soft sensors, modeling of material behavior and prediction of mechanical properties using ML algorithms, can fill gaps in existing knowledge and improve resource management at all stages of the production cycle. The implementation of AI in metallurgy has the potential to promote a circular economy and industrial symbiosis, which increases the sustainability of the industry, providing not only economic, but also environmental and social benefits for the whole society. Research and practical examples show that AI and ML play an important role in improving product quality and product monitoring accuracy, which can reduce waste and increase overall production efficiency. The implementation of smart service technologies and Industry 4.0 approaches, such as digital twins and predictive analytics, helps reduce energy consumption and optimize resources. At the same time, there is a growing need to train qualified personnel capable of adapting to technological changes and working with interdisciplinary tools, which provides a more sustainable and innovative environment for the development of the industry. This approach not only strengthens the competitiveness of metallurgical enterprises, but also contributes to the achievement of environmental goals established by the UN Sustainable Development Goals and the European Green Deal.

Keywords: metallurgical sector, machine learning, artificial intelligence, circular economy, industrial symbiosis.

Постановка проблеми. В обробній промисловості розрізняють два основних типи: дискретні галузі, до яких належать виробництво машин і устаткування, та обробні галузі, що охоплюють ключові сировинні сфери, такі як нафтохімічна, металургійна, виробництво будівельних матеріалів і енергетика. Саме металургійна галузь є фундаментальною складовою національної економіки та вагомим фактором стабільного економічного розвитку та підтримки світової економіки. Дискретне виробництво ґрунтується на фізичному процесі, а його продукцію можна розрахувати окремо, що спрощує цифровізацію для задоволення індивідуальних запитів і забезпечення гнучкості виробництва. Водночас у обробних галузях є специфічні виробничі особливості, які складно оцифрувати, оскільки вони включають змінну сировину, процеси з фізичними й хімічними реакціями, а також складні механізми. Виробничий процес є безперервним і не може бути зупинений, і проблеми у будь-якій частині процесу неминуче вплинуть на всю виробничу лінію та якість кінцевої продукції. Склад сировини, стан обладнання, параметри процесу та якість продукції деяких галузей неможливо виміряти в режимі реального часу або всебічно виміряти. Вищезазначені особливості переробної промисловості виявляються у труднощах вимірювання, моделювання, контролю та оптимізації, а також прийняття рішень. Одним з основних каталізаторів розвитку гірничо-металургійного комплексу є промислова революція та її інструменти цифровізації. Цифрові технології – це потужні інновації, які можуть сприяти вдосконаленню операцій, а також соціальній та екологічній стійкості. Розвиток інструментів промислової революції та їх впровадження у виробництво дає фінансовий та соціальний ефект суб'єктам металургійного сектору

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та методологічні аспекти використання штучного інтелекту в організації та управлінні біз-

нес-процесами промислових підприємств використовували у своїх наукових працях наступні вчені: Н. Тамура, К. Мацуда, М. Коніші, М. Такамі, К. Кадогучі [1], К. Олдріч, Дж.С.Дж. Ван Девентер, М.А. Ройгер [2], Ю.І. Кім, К.К. Місяць, Б.С. Кан, К.С. Чанг [3], К. Хан, К. Сон, Дж. Лі, Х. Хван, В. Чон, Х. Ян, І. Сон, Ю. Кім, Х. Ум [5], С. Чанг, К. Чжао, Й Лі, М. Чжоу, К. Фу, Х. Цяо, М. [7] Ванноччі, А. Рітакко, А. Кастеллано, Ф. Галлі, М. Ваннуччі, В. Янніно, В. Колла [8], С. Фале, Т. Глейзер [9], М. Маккі [10], А. Саху, Р. Чахар [11], Н. Колокас [12], О. Ісаєв [13], П. Гейлхофер [15].

Метою статті є обґрунтування організації та управління бізнес-процесами промислових підприємств на основі штучного інтелекту. Для обґрунтування визначеної мети вирішені наступні завдання: розглянуто безперервний онлайн моніторинг жорстких процесів з використанням штучного інтелекту; доведено необхідність моніторингу форм та якості поверхні виробів з використанням цифрових процесів; визначено необхідність технічного обслуговування металургійного обладнання з використанням інструменту промислової революції 4.0; рекомендовано оптимізацію властивостей матеріалів та проектування матеріалів з використанням штучного інтелекту; розкрито необхідність сталого розвитку промислових підприємств з використанням інструментів цифровізації.

Виклад основного матеріалу. Запровадження інноваційних рішень із використанням штучного інтелекту розпочалося понад двадцять років тому, коли з'явилися перші системи комплексного управління процесами в режимі реального часу, що передбачили майбутній розвиток Індустрії 4.0. Так, ще в 1990-х роках був створений прототип ІІІ-системи для управління доменною піччю [1]. У той же час штучні нейронні мережі почали застосовувати для моделювання процесів вилучення свинцю і цинку з промислового пилу, а також для синтезу цинку на

установках вторинної переробки алюмінію [2]. Одні з перших застосувань нейронних мереж у виробництві були пов'язані з керуванням нагрівальними печами у сталеливарній промисловості [3]. Паралельно з цим металурги почали використовувати методи машинного навчання (ML) для аналізу механічних властивостей виробів [4]. На початку 2000-х розпочалося промислове використання автоматизованих систем контролю поверхні (ASIS) на основі нейронних мереж для виявлення дефектів, що зробило сталеливарну промисловість лідером у цій сфері, а незабаром такі інновації були прийняті й в інших галузях.

Основні напрями досліджень у металургії охоплюють такі аспекти: безперервний онлайн-моніторинг інтенсивних процесів; контроль форми та якості поверхні продукції; обслуговування металургійного обладнання; оптимізація та проектування матеріалів; забезпечення екологічної стійкості. Безперервний онлайн-моніторинг жорстких процесів (наприклад, плавильних, рафінувальних або повторного нагрівання печей) є особливо важливим. Машинне навчання відіграє ключову роль у розробці софт-сенсорів, які надзвичайно корисні там, де суворі умови перешкоджають використанню традиційних датчиків, що часто трапляється у металургійній промисловості. Нещодавні дослідження у галузі софт-сенсорів, заснованих на ML, у сталевому виробництві зосереджені на таких показниках, як висота спінювання шлаку в електродуговій печі (EAF) [5], обсяг і склад шлаку EAF [6], а також хімічний склад розплаву на кінцевому етапі в конвертері [7].

Моніторинг форми та якості поверхні стає дедалі надійнішим, потужнішим та універсальнішим завдяки застосуванню машинного навчання та глибинного навчання (DL) для обробки зображень. Дефекти форми часто контролюються за допомогою профілометрів та інших вимірювальних систем, дані яких використовуються для створення 2D-карт і подальшої обробки з метою виділення відповідних характеристик. Машинне навчання значно полегшує цей процес, як у випадку аналізу дефектів плоскості в гарячекатаних сталевих смугах [8], так і для виявлення дефектів овальної форми під час радіально-осьового кільцевого прокатування [9].

У недавньому дослідженні [10] проаналізовано сучасну еволюцію таких концепцій, як електронне обслуговування та інтелектуальне технічне обслуговування, з акцентом на розвиток технологій розумного обслуговування та обслуговування 4.0, особливо в контексті сталеливарної промисловості. У наукових джерелах дедалі частіше наводяться приклади практичного застосування штучного інтелекту для технічного обслуговування металургійного

обладнання, зокрема для аналізу роботи сталеливарних підприємств [11] та діагностики несправностей у процесі виробництва алюмінію [12].

Методи машинного навчання все частіше використовуються для прогнозування властивостей матеріалів завдяки їх здатності виявляти складні нелінійні залежності з даних без необхідності повної попередньої інформації, заповнюючи прогалини в розумінні механізмів, які пов'язують, наприклад, хімічний склад матеріалу та параметри процесу з властивостями напівфабрикатів або готової продукції. Наразі стрімко розвивається міждисциплінарна дослідницька галузь – матеріалознавча інформатика, яка об'єднує матеріалознавство і науку про дані, розширюючи можливості відкриття і розробки нових матеріалів за допомогою машинного та глибинного навчання (ML і DL) [13]. Аналіз, представлений у [14], охоплює такі аспекти, як деформаційні властивості та руйнування металів і сплавів, а також пов'язані з ними розробки, що становлять важливий напрямок застосування матеріалознавчої інформатики.

Металургійна галузь має підвищувати свою стійкість, орієнтуючись на економічні, екологічні та соціальні аспекти, що відображені в Цілях сталого розвитку (ЦСР) до 2030 року, затверджених усіма країнами-членами ООН у 2015 році в рамках Порядку денного сталого розвитку. Враховуючи це, Європейський Союз у 2020 році запустив Європейський зелений курс – комплекс ініціатив, спрямованих на досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року. Штучний інтелект та цифрові технології розглядаються як потужні інструменти для зменшення екологічного впливу, впровадження чистих виробничих процесів, підвищення енергоефективності, раціонального використання ресурсів, а також для розвитку циркулярної економіки (CE) та промислового симбіозу (IS). Сучасні дослідження [15] підтверджують, що застосування штучного інтелекту в поєднанні з концепціями Індустрії 4.0 сприяє ефективнішому використанню ресурсів, енергії та матеріалів у промисловості.

Висновки. Зростає використання штучного інтелекту та машинного навчання в металургії було розглянуто через практичні приклади, а також обговорено пов'язані з цим проблеми та перспективи. Для успішного та прибуткового впровадження штучного інтелекту в металургійну галузь майбутні ініціативи повинні враховувати як технологічні, так і нетехнологічні бар'єри. Це потребує значних інвестицій не лише в обладнання та технології, але й у «людський капітал» – зокрема, в підвищення кваліфікації персоналу та залучення молодих спеціалістів, що є важливою умовою для розвитку громадянського суспільства.

Список літератури:

1. Tamura, N., Matsuda, K., Konishi, M., Takami, M., Kadoguchi, K. (1991) Application of artificial intelligence to operation control of blast furnace, IFAC Symp. Series, Proc. *Triennial World Congress*, no. 4, pp. 63–68.
2. Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., Reuter, M.A. (1994) The application of neural nets in the metallurgical industry. *Minerals Engineering*, no. 7 (5–6), pp. 793–809.
3. Kim, Y.I., Moon, K.C., Kang, B.S., Han, C., Chang, K.S. (1998) Application of neural network to the supervisory control of a reheating furnace in the steel industry. *Control Engineering Practice*, no. 6 (8), pp. 1009–1014.
4. Mukherjee, A., Schmauder, S., Rühle, M. (1995) Artificial neural networks for the prediction of mechanical behavior of metal matrix composites. *Acta Metallurgica Et Materialia*, no. 43 (11), pp. 4083–4091.
5. Son, K., Lee, J., Hwang, H., Jeon, W., Yang, H., Sohn, I., Kim, Y., Um, H. (2021) Slag foaming estimation in the electric arc furnace using machine learning based long short-term memory networks, *J. Mat. Res. Tech.*, no. 12, pp. 555–568.
6. Murua, M., Boto, F., Anglada, E., Cabero, J.M., Fernandez, L. (2020) A slag prediction model in an electric arc furnace process for special steel production. *Procedia Manufacturing*, no. 54, pp. 178–183.
7. Chang, S., Zhao, C., Li, Y., Zhou, M., Fu, C., Qiao, H. (2021) Multi-channel graph convolutional network based end-point element composition prediction of converter steelmaking. *IFAC-PapersOnLine*, no. 54 (3), pp. 152–157.
8. Vannocci, M., Ritacco, A., Castellano, A., Galli, F., Vannucci, M., Iannino, V., Colla, V. (2019) Flatness Defect Detection and Classification in Hot Rolled Steel Strips Using Convolutional Neural Networks, *Lecture Notes in Computer Science*, 11507 LNCS, pp. 220–234.
9. Fahle, S., Glaser, T., Kneißler, A., Kuhlenkötter, B. (2021). Improving quality prediction in radial-axial ring rolling using a semi-supervised approach and generative adversarial networks for synthetic data generation, *Production Engineering*.
10. Macchi, M., Roda, I., Fumagalli, L. (2020) On the focal concepts of Maintenance in the Digital era. *IFAC-PapersOnLine*, no. 53 (3), pp. 84–89.
11. Sahu, A., Chahar, R., Olivar, S., Balasubramanian, R., Gupta, A., Ahn, H. (2021) Building a scalable intelligent system to advise predictive maintenance operations in a steel mill, *AISTech – Iron & Steel Tech. Conf.*, pp. 156–1163.
12. Kolokas, N., Vafeiadis, T., Ioannidis, D., Tzovaras, D. (2020) A generic fault prognostics algorithm for manufacturing industries using unsupervised machine learning classifiers, *Simulation Modelling Practice & Theory*, no. 103.
13. Isayev, O.; Tropsha, A.; Curtarolo, S. (2019) *Materials Informatics: Methods, Tools, and Applications*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
14. Reyes, K.G.; Maruyama, B. (2019) The machine learning revolution in materials?, *MRS Bulletin*, no. 44 (7), pp. 530–537.
15. Gailhofer, P., Herold, A., Schemmel, J.P., Scherf, C.-S., Urrutia, C., Köhler, A.R., Braungardt, S. (2021) The role of Artificial Intelligence in the European Green Deal, European Parliament. Available at [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662906/IPOL_STU\(2021\)662906_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662906/IPOL_STU(2021)662906_EN.pdf)