

СТРАТЕГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СУПУТНИХ ПРОДУКТІВ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

STRATEGIC PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF RELATED PRODUCTS OF THE METALLURGICAL INDUSTRY IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY

У статті розглянуто розвиток світового виробництва металургійної продукції в системі сформованої циркулярної економіки. Доведено, що циркулярна економіка металургійної галузі ґрунтується на ефективному використанні ресурсів підприємства та дотриманні показників сталості. Визначено інноваційний процес перетворення лінійної моделі металургійного сектору на модель кругової економіки (економіки замкненого циклу). Стратегії вторинної переробки, відновлення та повторного виробництва направлені на подовження терміну служби продуктів. Циркулярна економіка металургійного сектору не містить етапів утилізації та поняття «відходи», нова модель базується на цифрових інструментах підвищення енергоефективності та зниження матеріаломісткості, використання систем декарбонізації, використанні супутніх продуктів. Визначена концепція 3R + co-P (reduce, reuse, recycle, co-products), тобто рівні: скорочення, повторне використання, переробка, побічні продукти. Рівень co-P включає в себе використання супутніх продуктів (шлам, пил, шлак, емульсії та відпрацьовані олії, технологічні гази, хімічні речовини). Рівень скорочення відповідає за підвищення ефективності виробництва, зменшення витрат. Рівень повторного використання характеризує довговічність сталі, дозволяє повторно використовувати багато виробів після закінчення терміну служби, окрім продовження терміну служби продукту, повторне використання дозволяє уникнути необхідності транспортування та переплавлення сталі. Побічні гази (конверторний, коксовий, доменний газ) та вода теж належать до повторних ресурсів. Виплавка сталевого брухту з виробів після закінчення терміну їх експлуатації третій рівень циркулярної економіки у сталеплавильному виробництві. Завдяки магнітним властивостям сталь легко і доступно витягується практично з будь-якого потоку відходів. Металевий лом є матеріальним інструментом металургії, який зберігає ресурсний потенціал гірничодобувного сектору. Розкрито ефективність супутніх продуктів металургійного виробництва та доведено їх необхідність для основних стратегічних галузей національної економіки (будівництво, машинобудування, хімічна промисловість)

Ключові слова: циркулярна економіка, супутні продукти, декарбонізація, цифровізація, металевий брухт.

The article examines the development of global metallurgical production within the framework of a formed circular economy system. It demonstrates that the circular economy of the metallurgical industry is based on efficient resource utilization within enterprises and adherence to stability indicators. An innovative transformation process from a linear model of the metallurgical sector to a circular economy model (a closed-loop economy) has been identified. Strategies for secondary processing, restoration, and re-production aim to extend the service life of products. The circular economy of the metallurgical sector eliminates stages of disposal and the concept of "waste." Instead, this new model relies on digital tools to enhance energy efficiency, reduce material intensity, employ decarbonization systems, and utilize by-products. The concept of 3R + co-P (reduce, reuse, recycle, co-products) has been defined, encompassing actions such as reduction, reuse, recycling, and co-products. The co-products level involves the use of by-products (sludge, dust, slag, emulsions, used oils, technological gases, chemical substances). The reduction level is responsible for enhancing production efficiency and reducing costs. The reuse level characterizes the durability of steel, allowing for multiple product reuses after their service life. Besides extending the product's lifespan, reuse helps avoid the need for transportation and steel remelting. By-products such as converter gas, coke oven gas, blast furnace gas, and water also belong to the category of reusable resources. Melting steel scrap from products after their service life constitutes the third level of the circular economy in steelmaking production. Due to the magnetic properties of steel, it can be easily and readily extracted from almost any waste stream. Scrap metal serves as a material resource for metallurgy, preserving the resource potential of the mining sector. The article reveals the efficiency of by-products in metallurgical production and underscores their necessity for fundamental strategic sectors of the national economy (construction, mechanical engineering, chemical industry).

Key words: circular economy, related products, decarbonization, digitalization, metal scrap.

УДК 330.342

DOI: <https://doi.org/10.32782/infrastruct75-9>

Шапуров О.О.

д.е.н., професор,
професор кафедри
інформаційної економіки,
підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут
імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Shapurov Olexandr

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

Постановка проблеми. Металургія охоплює широкий спектр процесів, включаючи видобувну металургію (методи, які витягують метал з комерційно життєздатних джерел: руди, брухту, проміжних продуктів і металургійних залишків) і переробну металургію. Кожен з них генерує багато різних типів побічних продуктів [1]. Множинність електронного обладнання, автомобілів, іншої техніки є потенційним ресурсом металургійної

галузі. Їх різноманіття ускладнює детальну характеристику, що призводить до нечисленних і слабо розроблених концепцій переробки, доступних на сьогоднішній день. Також можна з переконанням стверджувати, що крім наявного потенційного ресурсу можливе оптимізоване використання побічних продуктів як вторинної сировини, що обмежує формуванню потенційно небезпечних відходів та забезпечує збереження цінних

первинних ресурсів [2]. Виходячи з обґрунтованості використання потенційних та супутніх продуктів, актуальним питанням сучасності постають питання стратегічного розвитку цих ринків. Саме розвиток ринків супутніх продуктів забезпечить виконання головних цілей сталого розвитку, сформує новий вектор циркулярної економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останнє десятиліття металургійний сектор прийняв кілька стратегій зі скорочення використання первинної енергії та матеріалів, таких як оптимізація вхідних потоків енергії та матеріалів, коригування процесів, пов'язаних з енергетикою, і підвищення цінності технологічних залишків [3]. Однак потенціал подальшого підвищення ефективності використання енергії та ресурсів обмежений, якщо він спирається лише на традиційні методи [4]. Тому нові та інноваційні технології терміново необхідні для досягнення суворих екологічних цілей, встановлених Європейським зеленим курсом. Наприклад:

- розробка технологій CCS (carbon capture and storage), що забезпечує на регіональному та на міжнародному рівні довгострокову стратегію (до 2050 р.) скорочення викидів більш ніж на 117 млн.т [5];

- імпорт екологічно чистого первинного заліза, який може сформувати вектор розвитку зеленої електроенергетики в ЄС, знизивши ціни на електроенергію та підвищивши енергетичну безпеку (даний процес передбачає співробітництво між ЄС та ПАР шляхом формування міжрегіональної стратегії декарбонізації) [6].

Крім зазначених пропозицій науковців слід відмітити праці Й. Антрековича, який зазначає, що побічні продукти, такі як шлаки, шлами або пил, стають дедалі важливішими для європейської промисловості, оскільки ці залишки містять значну кількість цінних речовин. Через відсутність технологій, яких бракує, і загальноприйнятого керівництва з оцінки матеріалу, що утилізується, цей потенціал все ще залишається незадіяним [7].

Серед чисельності інших досліджень заслуговує на увагу: концепція скоординованого контролю викидів забруднювачів повітря та вуглекислого газу, метою якої є подальша реформа екологічної та економічної політики, включно із Законом про ЕРТ (базується на синергії контролю за скороченням забруднення (PR) та скороченням викидів вуглецю (CR)) [8]; пілотна політика низьковуглецевих міст та її вплив на синергетичну ефективність управління викидами вуглецю та смогу [9].

Виходячи з вищезгаданого кожне дослідження розкриває та обґрунтовує окремий елемент замкнутого циклу металургійної галузі, немає системного підходу до розвитку супутніх ринків, відсутні визначені прогностичні перспективи реалізованих заходів, відсутній аналіз застосування

концепції циркулярної економіки в металургійному секторі.

Метою роботи. Метою дослідження є формування концепції супутніх продуктів в контексті циркулярної економіки. Дослідження було спрямовано на вирішення наступних завдань: визначення вектору циркулярної економіки та відмінності від лінійної моделі; формування основних рівнів економіки замкнутого циклу в металургійній промисловості, обґрунтування супутніх продуктів, визначення концепції 3 R + co-P.

Основна частина. У центрі уваги циркулярної економіки ефективність використання ресурсів та сталість. Основною стратегічною метою економіки замкнутого циклу є відокремлення економічного росту від споживання ресурсів, акцентуючи увагу на тривалість виробничого циклу, можливості повторного використання та переробки продукції. Для досягнення цієї мети необхідні інноваційні підходи до дизайну, виробництва та споживання, що виходять за межі звичайної лінійної моделі. В парадигмі кругової економіки ресурси розглядаються як невід'ємні цінності, які слід зберігати в обігу якнайдовше (стратегії вторинної переробки, відновлення та повторного виробництва, спрямовані на подовження терміну служби продуктів та матеріалів).

На відміну від лінійної моделі, де відходи є невідминним наслідком, економіка замкнутого циклу прагне зменшити генерацію відходів. За допомогою розробки продуктів для демонтажу та переробки підприємства можуть значно зменшити негативний екологічний вплив своєї діяльності. Заохочення довговічності та можливості ремонту є основним принципом кругової економіки. Продукти повинні бути спроєктовані з урахуванням можливості подовження їх функціонального терміну служби, а ремонт та обслуговування повинні бути легко доступні.

Науково-практичним прикладом переходу від лінійної до циркулярної моделі в металургійному секторі може бути європейський проєкт H2020 CIRMET (Інноваційне та ефективне рішення на основі модульних, універсальних, інтелектуальних технологічних установок для забезпечення гнучкості енергоспоживання та ресурсів у високоенергоємних процесах) Циклічне рішення, запропоноване CIRMET, полягає в розробці циркулярного процесу, який представляє собою комбінацію різних модульних установок (пірометалургійного процесу і установки рекуперації тепла) (див. рис. 1) [10].

Зазначимо, що кругова економіка формує спільне користування власністю. Платформи обміну дозволяють кільком користувачам одночасно скористатися одним продуктом, тим самим зменшуючи загальний попит на ресурси. Окрім матеріальних циклів кругова економіка враховує

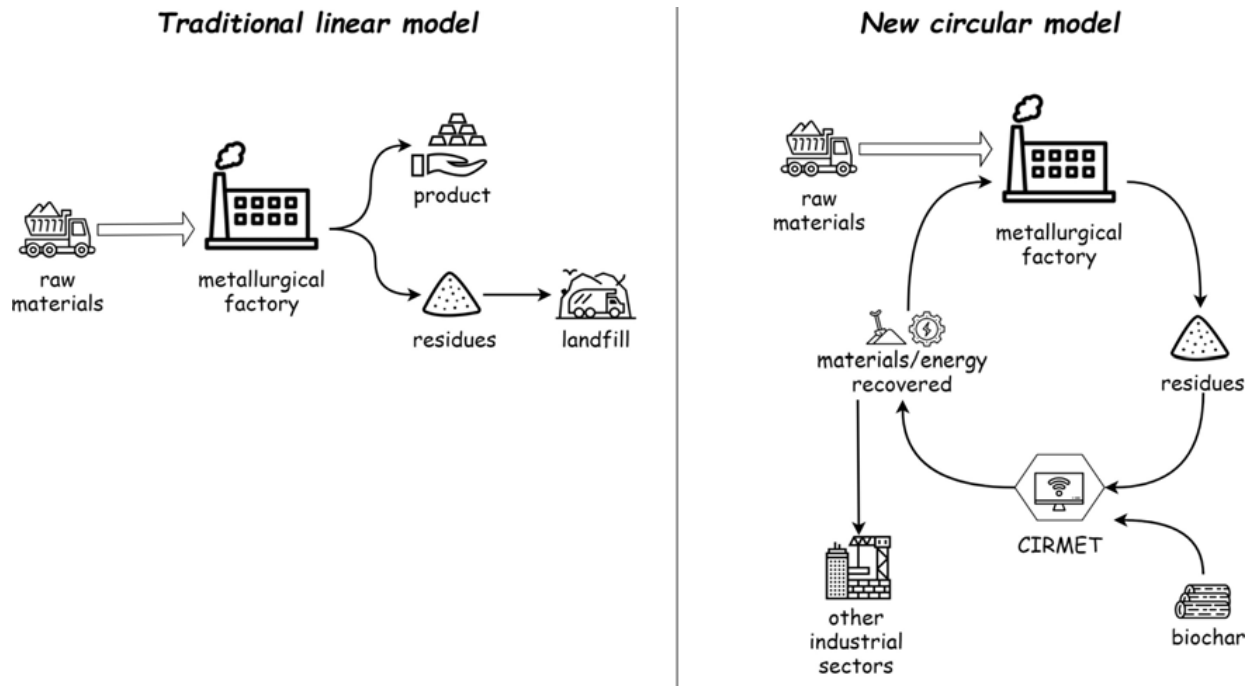


Рис. 1. Науково-практичним прикладом переходу від лінійної до циркулярної моделі в металургійному секторі [10]

біологічні цикли. Це означає використання біорозкладних матеріалів та органічних відходів для відновлення природних систем, ефективно замикаючи обіг як біологічних, так і технічних поживних речовин.

Виходячи з обґрунтованих наукових досліджень економіка замкненого циклу має чотирирівневу структуру: повторне використання (повторне використання, ремонт); відновлення і перепрофілювання; переробку, компостування та анаеробне зброджування; управління відходами та їх відновлення [11].

Рівень відновлення і перепрофілювання (*remanufacture*) більш притаманний споживачу металургійної продукції – автомобільній промисловості: Toyota Motors приймає назад вживані деталі з сегменту європейської роздрібної мережі, повернуті деталі перевіряються та відновлюються у відновлювальному центрі; Volkswagen, Volkswagen Commercial Vehicles, Audi, SEAT і ŠKODA також приймають назад багато використаних деталей двигунів, трансмісій або електроніки; General Motors – GM Middle East використовує різні відновлені деталі, як-то коробки передач, рульові механізми, генератори, двигуни, бампери, фари [12].

Адаптуючи рівні до металургійної галузі доцільно виділити концепцію 3 R + co-P (*reduce, reuse, recycle, co-products*). Рівень co-P включає в себе використання супутніх продуктів (шлам, пил, шлак, емульсії та відпрацьовані олії, технологічні гази, хімічні речовини).

За останнє століття повторне перероблення сталі дало економію 33 млрд.т. залізної руди

та 16 млрд.т. вугілля. Також за рахунок впровадження інноваційних заходів виробництво сталі збільшилось у 10 разів, при цьому споживання енергії залишилось на 40% обсязі 1960 р. (рис. 2).

Тому можна дійсно стверджувати, що металургійна галузь має чіткий напрям скорочення (*reduce*) матеріаломісткості та енергомісткості сталі [13].

Довговічність сталі дозволяє повторно використовувати багато виробів після закінчення терміну служби (*reuse*). Окрім продовження терміну служби продукту, повторне використання дозволяє уникнути необхідності транспортування та переплавлення сталі, а також створення нових виробів. Це має значні переваги для навколишнього середовища та максимізує використання ресурсів. Наприклад, високошвидкісні залізничні колії можуть бути сконструйовані таким чином, що після того, як вони зношені до певного моменту і більше не придатні для використання на високошвидкісних лініях, вони стають придатними для низькошвидкісних колій.

У металургійній промисловості викиди вуглекислого газу (CO_2) здебільшого пов'язані з побічним газом, включно з витоком побічного газу, а також спалюванням або іншим використанням побічних газів. Коксовий газ (COG), конвертерний газ (LDG) і доменний газ є трьома основними побічними металургійними газами. Побічні гази в якості енергії використовують для технологічних цілей та як паливо невеликих енергетичних станцій, також воді ресурси, які повторно використовують належать до визначеного рівня циркулярної економіки [14].

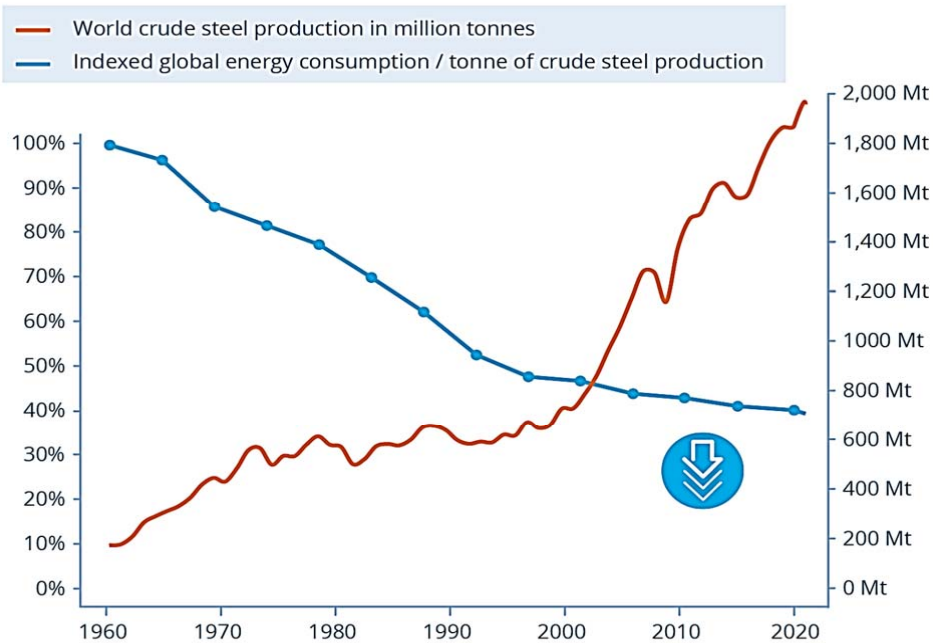


Рис. 2. Динаміка енергоспоживання металургійної галузі [13]

Виплавка сталевих брухтів з виробів після закінчення терміну їх експлуатації третій рівень циркулярної економіки у сталеплавильному виробництві. Завдяки магнітним властивостям сталь легко і доступно витягується практично з будь-якого потоку відходів. Ось чому сталь є найбільш перероблюваним матеріалом у світі. Щорічно для виробництва сталі споживається близько 650 млн тонн брухту на рік (порівняно із загальним обсягом виробництва нерафінованої сталі близько 1,9 млрд.т. на рік). Це дає змогу уникнути викидів приблизно 975 млн.т. CO² на рік і значно знижує використання інших природних ресурсів, таких як залізна руда, вугілля і вапняк.

Теоретично вся нова сталь може бути виготовлена з переробленої сталі. Однак наразі це нездійснено через брак брухту. Це пов'язано з тривалим терміном служби сталевих виробів, враховуючи міцність і довговічність сталі. Середній термін служби сталевих продуктів коливається від кількох тижнів для сталевих упаковок до 100 років для будівель та інфраструктури.

Середній термін служби сталевих виробів становить 40 років. Це означає, що між виробництвом сталі та її подачею на переробку проходить значна затримка. Тривале зростання попиту на сталь означає, що перехід галузі на виробництво, повністю засноване на металобрухті, навряд чи буде можливий у цьому столітті [15].

Супутні продукти сталеливарної промисловості мають багато застосувань у самій галузі, в інших галузях промисловості та в суспільстві в цілому. Можна сформулювати загальний перелік застосування супутніх продуктів сталеливарної промисловості: доменний шлак – замітник клінкеру

в цементній промисловості; сталеплавильний шлак – заповнювачі в дорожньому будівництві, поліпшенні ґрунтів; пил і шлам – внутрішнє і зовнішнє застосування оксидів заліза і легуючих елементів; нафтохімія з коксохімічного виробництва – дьоготь, аміак, фенол, сірчана кислота і нафталін для хімічної промисловості; емульсії з млинів і відпрацьоване масло – відновник в доменних печах або використовується на коксохімічних підприємствах.

Ряд супутніх продуктів з високим вмістом заліза утворюється протягом усього сталеплавильного процесу. До них відносяться пил і шлам з мокрого і сухого сповільнюваного обладнання, млинова окалина з стану гарячої прокатки, а також залізна руда і агломераційна дрібниця. Дьоготь є супутнім продуктом коксування, який використовується як матеріал для покриття ущільнювачів у будівельному секторі, а також для виробництва фарб і синтетичних барвників. Дьоготь можна додатково переробляти та використовувати в таких споживчих продуктах, як мило та шампунь для лікування лупи та шкірних захворювань (псоріазу). Сірка використовується для вулканізації каучуку та виробництва сірчаної кислоти, а також використовується в інсектицидах та добривах [13].

Висновки. Перехід від лінійної моделі виробництва металургійного сектору до циркулярної передбачає розвиток чотирьох рівнів та відповідних закріплених за ними ринків. Реалізація стратегічного вектору енергозбереження та зниження матеріаломісткості можливе за рахунок реалізації інструментів промислової революції 4.0. (Blockchain technology, BigData, IIoT, artificial intelligence). Відповідно до розрахунків Бостонської

після брухту в сталеливарній циркулярній економіці, що направлені на максимізацію доданої вартості побічних продуктів сталі в національній економіці [18].

REFERENCES:

1. Fox, M.A. (1999). Metallurgical By-Products. У *Glossary for the Worldwide Transportation of Dangerous Goods and Hazardous Materials*. Springer Berlin Heidelberg. 147–150. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-11890-0_48
2. Antrekowitsch, J., & Hanke, G. (2022). Efficient Steel Mill Dust Recycling – Aiming for Zero Waste. У *The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer International Publishing. pp. 303–310. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5_32
3. Johansson, M.T., & Söderström, M. (2011). Options for the Swedish steel industry – Energy efficiency measures and fuel conversion. *Energy*, 36(1), pp. 191–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.053>
4. Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2020). The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase. *Climate Policy*, 21(1), pp. 78–92. DOI: <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1803040>
5. Kanudia A., Berghout N., Boavida D., M.van den Broek. (2013) CCS Infrastructure Development Scenarios for the Integrated Iberian Peninsula and Morocco Energy System. *Energy Procedia*, vol. 37. pp. 2645-2656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.149>
6. Trollip H, McCall B., Bataille C. (2022) How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization. *Climate Policy*, vol. 22, no. 2, pp. 236-247. DOI: <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123>
7. Schatzmann, W., & Antrekowitsch, J. (2019). Assessment of by-products – from waste to values. У *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities III*. CRC Press. pp. 506–511. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429289798-80>
8. Gao, X., Liu, N., & Hua, Y. (2022). Environmental Protection Tax Law on the synergy of pollution reduction and carbon reduction in China: Evidence from a panel data of 107 cities. *Sustainable Production and Consumption*, 33, pp. 425–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.07.006>
9. Li, Z., Bai, T., & Tang, C. (2022). How does the low-carbon city pilot policy affect the synergistic governance efficiency of carbon and smog? Quasi-experimental evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 133809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133809>
10. Di Maria, A., Merchán, M., Marchand, M., Eguizabal, D., De Cortázar, M. G., & Van Acker, K. (2022). Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 131790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131790>
11. Morsetto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
12. Kanellou, E., Alexakis, K., Kapsalis, P., Kokkina-kos, P., & Askounis, D. (2021). The DigiPrime KPIs' framework for a circular economy transition in the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 54, pp. 302–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.09.003>
13. World Steel. Steel – the permanent material in the circular economy. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/worldsteel-circular-economy.pdf>
14. Sui, P., Ren, B., Wang, J., Wang, G., Zuo, H., & Xue, Q. (2023). Current situation and development prospects of metallurgical by-product gas utilization in China's steel industry. *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.050>
15. World Steel. Blog: The future of global scrap availability. Available at: <https://worldsteel.org/media-centre/blog/2018/future-of-global-scrap-availability/>
16. Ganerwalla A., Harnathka S., Voigt N. (2021) Racing Toward a Digital Future in Metals and Mining. BCG. P. 1–8. URL: <https://web-assets.bcg.com/65/43/b63e686f453d82fb46f6a0702e2d/bcg-racing-toward-a-digital-future-in-metals-and-mining-feb-2021.pdf>
17. Arastoa A., Tsuparia E., Kärkia J., Sihvononb M., Liljab J. (2013) Costs and Potential of Carbon Capture and Storage at an Integrated Steel Mill, *Energy Procedia*, vol. 377, pp. 117–7124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.648>
18. ESTEP. Highlights ESTEP 2021. Available at: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/ESTEP-AR2021-Final-v2.pdf>