

Хаустова Вікторія Євгенівна¹, д.е.н., професор,
директор з наукової роботи
Губарева Ірина Олегівна¹, д.е.н., професор,
заступник директора з наукової роботи
Салашенко Тетяна Ігорівна¹, д.е.н., старший
дослідник, завідувач відділу промислової політики
та енергетичної безпеки

Котляров Євген Іванович¹, к.е.н., доцент,
завідувач сектору енергетичної безпеки та
енергозбереження

Ляш Ольга Ігорівна¹, д.е.н., професор, завідувач
сектору макроекономічного аналізу та
прогнозування

¹Науково-дослідний центр індустріальних проблем
розвитку НАН України (м. Харків, Україна)

Khaustova Viktoriia¹, Doctor of Sciences (Economics), Professor,
Director of Research, <https://orcid.org/0000-0002-5895-9287>

Hubarieva Iryna¹, Doctor of Sciences (Economics), Professor,
Deputy Director, <https://orcid.org/0000-0002-9002-5564>

Salashenko Tetiana¹, Doctor of Sciences (Economics), Senior
Researcher, Head of the Department of Industrial Policy and Energy
Security, <https://orcid.org/0000-0002-1822-5836>

Kotliarov Yevhen¹, Candidate of Sciences (Economics), Associate
Professor, Head of Sector of Energy Security and Energy Efficiency of
Department of Industrial Policy and Energy Security,
<https://orcid.org/0000-0002-6366-6729>

Ilyash Olha¹, Doctor of Sciences (Economics), Professor, Head of the
Sector for Macroeconomic Analysis and Forecasting,
<https://orcid.org/0000-0002-7882-3942>

¹Research Center for Industrial Problems of Development of the
National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv, Ukraine),

ТРАНСФОРМАЦІЯ СВІТОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ ЗАЛІЗА В КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНОЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ¹

TRANSFORMATION OF GLOBAL IRON METALLURGY IN THE CONTEXT OF GLOBAL DECARBONIZATION AND ENERGY TRANSITION

Хаустова В. Є., Губарева І. О., Салашенко Т. І., Котляров Є. І.,
Ляш О.І. Трансформація світової металургії заліза в
контексті глобальної декарбонізації та енергетичного
переходу. *Український журнал прикладної економіки та
техніки*. 2026. Том 11. № 1. С. 425 – 435.

Khaustova V., Hubarieva I., Salashenko T., Kotliarov Y., Ilyash
O. Transformation of global iron metallurgy in the context of
global decarbonization and energy transition. *Ukrainian
Journal of Applied Economics and Technology*.
2026. Volume 11. № 1. pp. 425 – 435.

У статті досліджено трансформацію світової металургії заліза в умовах глобальної декарбонізації та енергетичного переходу. Метою дослідження є ідентифікація ключових напрямів структурної перебудови галузі та її переходу до низьковуглецевої моделі розвитку на основі системного аналізу ресурсної бази, виробничих процесів, світової торгівлі та технологічних змін. Встановлено, що розвиток металургії супроводжується одночасним розширенням запасів залізрудної сировини та погіршенням їх якісних характеристик, що підвищує значення високосортної руди як критичного ресурсу низьковуглецевого виробництва. Виявлено посилення концентрації світового ринку як у сфері видобутку, так і у зовнішній торгівлі, що зумовлює зростання залежності від обмеженого кола країн-постачальників і підвищує чутливість до цінових та геополітичних коливань. Показано, що після пікового зростання у 2021 р. ціни на залізну руду перейшли до фази стабілізації в умовах зміни балансу попиту і пропозиції. Обґрунтовано, що ключовою тенденцією є поступовий перехід від традиційного вуглецево-інтенсивного виробництва сталі на основі чавуну до низьковуглецевих технологій, що базуються на прямому відновленні заліза та електричному сталеплавильному виробництві, які формують основу «зеленої» металургії. Встановлено асиметричність цього процесу: країни Азії зберігають домінуючі позиції у виробництві, тоді як розвинені економіки скорочують вуглецево-інтенсивні потужності, а країни Близького Сходу та Африки формують нові центри зростання низьковуглецевої металургії завдяки доступу до енергетичних ресурсів. Зроблено висновок, що світова металургія заліза переходить до технологічно-енергетичної моделі низьковуглецевого розвитку, в якій конкурентоспроможність визначається якістю сировини, доступом до енергії та інтеграцією у нові виробничі ланцюги. Для України ці процеси створюють передумови для структурної модернізації галузі на засадах низьковуглецевого розвитку та її інтеграції до європейського ринку сталі.

Ключові слова: металургія заліза, декарбонізація, низьковуглецевий розвиток, залізрудна сировина, пряме відновлення заліза, електросталеплавильне виробництво, енергетичний перехід.

The article examines the transformation of the global iron and steel industry in the context of decarbonization and the ongoing energy transition. The aim of the study is to identify the key directions of structural restructuring and the industry's shift toward a low-carbon development model based on a systemic analysis of the resource base, production processes, global trade, and technological change. The findings indicate that the development of the iron and steel industry is accompanied by a simultaneous expansion of iron ore reserves and a deterioration in their quality, which increases the importance of high-grade ore as a critical resource for low-carbon production. The study reveals a growing concentration of the global market in both extraction and international trade, leading to increased dependence on a limited number of supplier countries and heightened sensitivity to price fluctuations and geopolitical risks. It is shown that, following the price peak in 2021, iron ore markets have entered a stabilization phase driven by changes in the balance of supply and demand. The results substantiate that a key trend is the gradual transition from traditional carbon-intensive steel production based on blast furnace technology to low-carbon pathways, particularly direct reduced iron (DRI) and electric arc furnace (EAF) technologies, which form the foundation of green steel production. The study also identifies the asymmetrical nature of this transition: Asian countries maintain dominant positions in production, while developed economies are reducing carbon-intensive capacities, and countries in the Middle East and Africa are emerging as new growth centers for low-carbon steel due to their access to energy resources. It is concluded that the global iron and steel industry is shifting toward a techno-energy model of low-carbon development, where competitiveness is increasingly determined by raw material quality, access to energy, and integration into new production value chains. For Ukraine, these processes create opportunities for structural modernization of the industry based on low-carbon principles and its integration into the European steel market.

Keywords: iron and steel industry; decarbonization; low-carbon development; iron ore; direct reduced iron; electric arc furnace; energy transition.



This is an Open Access article
distributed under the terms of
the Creative Commons CC-BY 4.0

© Хаустова Вікторія Євгенівна,
Губарева Ірина Олегівна,
Салашенко Тетяна Ігорівна,
Котляров Євген Іванович,
Ляш Ольга Ігорівна, 2026

Вступ

Світова металургія заліза перебуває у стані структурної трансформації через глобальну декарбонізацію й енергетичний перехід. Металургійна промисловість генерує 7–9 % світових CO₂-викидів [1; 2] і відіграє важливу роль

¹ Статтю підготовлено за рахунок бюджетних коштів, спрямованих на забезпечення проведення державними науковими установами наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами державної атестації.

у досягненні кліматичних цілей. Відповідно до положень Паризької угоди, для стримування потепління на рівні 1,5°C [3] потрібно скоротити викиди від виробництва сталі приблизно на 90 % [1; 4], що потребує радикальної трансформації її виробничих моделей. У цьому контексті традиційна модель чорної металургії, що базується на вуглецево-інтенсивному циклі «доменна піч – кисневий конвертер» (BF/BOF), зазнає зростаючого регуляторного та економічного тиску, пов'язаного із впровадженням механізмів ціноутворення на викиди, посиленням екологічних стандартів та зміною інвестиційних пріоритетів [5; 6]. Водночас виробничий цикл на основі заліза прямого відновлення та електросталеплавильного виробництва (DRI/EAF) визнаний найбільш реалістичним шляхом до декарбонізації галузі [1; 7].

Попри значну кількість наукових досліджень, присвячених декарбонізації металургійної промисловості, проблематика системної трансформації економічної моделі металургії заліза залишається недостатньо розкритою. Зокрема, Дж. Кім, З. Фан, М. Шахабуддін, В. Фогл основну увагу зосереджують на технологічних шляхах зниження викидів, включаючи впровадження водневої металургії, електрифікацію процесів та використання технологій уловлювання вуглецю [8–11]. Дослідження М. Фішедік, А. Батай, С. Паулік акцентують на сценаріях глибокої декарбонізації та ролі інноваційних технологій у трансформації галузі, проте здебільшого розглядають їх із позиції кліматичної політики та технологічного розвитку [12–14]. Водночас у роботах Т. Ватарі, К. Накаджима підкреслюється обмеженість ресурсних факторів (енергії, сировини, металообробку) у забезпеченні декарбонізації галузі, однак відсутня інтеграція цих аспектів із ринковими механізмами [11; 15]. В українському науковому дискурсі проблеми розвитку металургійної промисловості, зокрема її структурної трансформації в умовах декарбонізації, досліджуються у працях В. Венгера, Ю. Драчука, А. Зеркаль, О. Сталінської, Л. Тубольцева, А. Даценко [16–21]. У зазначених роботах основна увага приділяється підвищенню енергоефективності виробництва, впровадженню низьковуглецевих технологій, адаптації до механізмів вуглецевого регулювання та формуванню державної політики підтримки галузі. Водночас існуючі підходи переважно фокусуються на окремих елементах галузі – технологіях, енергетичних ресурсах або екологічній політиці – і не забезпечують комплексного бачення трансформації металургії заліза як інтегрованої ланки, що передбачає взаємозв'язок ресурсної бази, ринкової структури та енергетичних чинників в умовах енергетичного переходу.

Формулювання цілей статті

Метою статті є ідентифікація ключових напрямів трансформації світової металургії заліза під впливом енергетичного переходу на основі системного аналізу динаміки видобутку залізорудної сировини, географічного перерозподілу виробничих потужностей та розвитку технологій прямого відновлення заліза. Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що під впливом декарбонізації та енергетичного переходу світова металургія заліза трансформується від ресурсно-орієнтованої до технологічно-енергетичної моделі, де ключовими факторами конкурентоспроможності є якість сировини, доступ до низьковуглецевої енергії та інтеграція у DRI/EAF-ланцюги.

Виклад основного матеріалу дослідження

Структура основної частини статті побудована за логікою системного аналізу трансформацій світової металургії заліза та охоплює зміни ресурсної бази, географію виробництва, ринкову динаміку та розвиток низьковуглецевих технологій сталі.

Глобальний ринок залізорудної сировини характеризується високою концентрацією та погіршенням якісних параметрів ресурсної бази. Світові запаси у 2024 р. оцінювалися приблизно у 200 млрд т, збільшившись на 20 млрд т порівняно з 2021 р., однак це зростання супроводжувалося зниженням середнього вмісту заліза з 47 % до 44 % [22–25]. Запаси розподілені нерівномірно: провідні позиції займають Австралія (29,5 %), рф (17,8 %) та Бразилія (17,3 %), частка України становить 3,3 % світових запасів [25]. Основний приріст ресурсної бази забезпечено за рахунок рф та Австралії, що посилює концентрацію пропозиції. Водночас якісні характеристики запасів суттєво відрізняються між країнами: у Китаї (34,5 %) та Україні (35,4 %) вміст заліза залишається відносно низьким, тоді як у США (63,9 %) та Індії (61,8 %) – значно вищим [25]. Це свідчить про те, що розширення ресурсної бази відбувається переважно за рахунок залучення бідніших руд, що підвищує потребу в їх збагаченні, збільшує енергоємність виробництва та посилює залежність галузі від обмеженого кола постачальників високоякісної сировини. Введення в експлуатацію родовища Сіманду (Гвінея) може частково компенсувати дефіцит високосортної руди, однак загальна тенденція до зниження якості ресурсної бази зберігається [26].

Світовий видобуток залізної руди у 2021–2024 рр. характеризувався нестабільною динамікою з тенденцією до скорочення, що зумовлено як глобальними викликами, так і структурними змінами у металургійній промисловості. У 2021–2024 рр. світовий видобуток залізної руди скорочувався через глобальні виклики та зміни в металургії. У 2024 році обсяг придатної руди зменшився на 100 млн тонн, а заліза – на 40 млн тонн (табл. 1).

На цьому тлі відбувається перерозподіл глобального видобутку на користь великих експортних постачальників. Австралія та Бразилія не лише зберігають домінуючі позиції, але й наростили видобуток (приблизно на 20–40 млн т), забезпечуючи понад 60 % світового видобутку. Водночас Китай скоротив видобуток (до 90 млн т) у межах переорієнтації на імпорт більш якісної сировини, тоді як Україна втратила до 50 % обсягів (–39 млн т) внаслідок воєнних руйнувань. Попри загальне скорочення обсягів видобутку, якість видобувної сировини зростає: середній вміст заліза підвищився з 61,5 % до 62,4 %. Це відображає витіснення з ринку бідніших руд і зростання попиту на високоякісну сировину. Зокрема, у Китаї вміст заліза зріс з 61,1 % до 64,4 %, тоді як у рф знизився з 71,0 % до 58,6 %. В Україні, попри втрати, якість руди залишилася близькою до середньосвітового рівня (62,1 %).

ISSN 2415-8453. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2026 рік. Том 11. № 1.

Таблиця 1. Динаміка видобутку сирової залізної руди в світі у 2021–2024 рр.

Країна	2021			2022			2023			2024		
	млн т	Частка %	% Fe	млн т	Частка %	% Fe	млн т	Частка %	% Fe	млн т	Частка %	% Fe
Австралія	900	34,6	62,2	944	37,8	59,9	953	37,7	61,3	930	37,2	62,4
Бразилія	380	14,6	63,2	435	17,4	62,8	440	17,4	62,7	440	17,6	63,6
Китай	360	13,8	61,1	272	10,9	90,4	278	11,0	61,2	270	10,8	64,4
Індія	240	9,2	62,5	251	10,0	67,3	278	11,0	56,1	270	10,8	63,7
Іран	50	1,9	66,0	78,3	3,1	61,2	85,4	3,4	60,1	90	3,6	62,1
рф	100	3,8	71,0	84,2	3,4	79,2	90,9	3,6	61,4	91	3,6	58,6
США	47,5	1,8	61,1	39	1,6	77,2	44,7	1,8	62,6	48	1,9	62,5
Україна	81	3,1	63,0	34,1	1,4	88,3	41,7	1,6	51,1	42	1,7	62,1
Світ	2600	100,0	61,5	2500	100,0	65,2	2530	100,0	60,9	2500	100,0	62,4

Джерело: сформовано авторами за [22–25]

Таким чином, трансформація видобутку має не лише кількісний, а й якісний характер: ключовим фактором стає не обсяг, а якість сировини та її придатність до використання у низьковуглецевих технологіях.

Світова торгівля залізною рудою характеризується суттєвим скороченням вартості, зумовленим як зниженням обсягів видобутку, так і падінням світових цін, структура глобальних потоків якої у 2023 р. представлена на рис. 1.

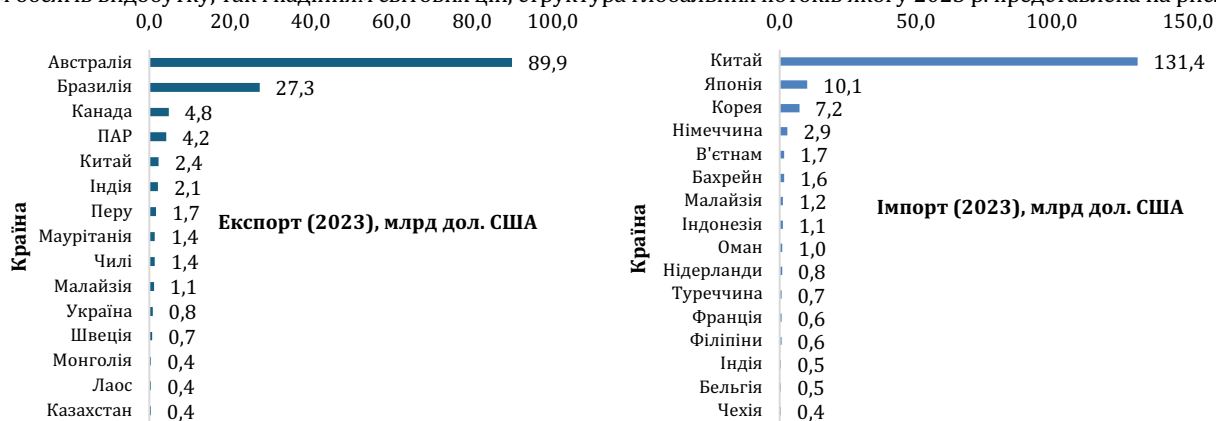


Рис. 1. ТОП-15 експортерів та імпортерів залізної руди в 2023 р. Джерело: сформовано авторами за [27]

Динаміка світового експорту залізної руди у 2021–2024 рр. характеризується суттєвим скороченням вартості на 25,4 % (з 188,2 до 140,5 млрд дол. США), що зумовлено зниженням обсягів видобутку та падінням світових цін. Попри незначне зростання кількості країн-експортерів (з 75 до 77), ринок залишається висококонцентрованим: Австралія та Бразилія забезпечують понад 80 % світового експорту, посилюючи олігополістичну структуру. Динаміка інших країн є неоднорідною: Китай скоротив експорт, водночас підвищивши позицію у рейтингу; ПАР наростила поставки, тоді як Індія, Перу та Мавританія зберегли відносно стабільність. Україна зазнала значних втрат: експорт скоротився з 3,9 до 0,8 млрд дол. США, а позиція у світовому рейтингу знизилася з 4-го до 11-го місця внаслідок порушення виробничих і логістичних ланцюгів через війну. Загалом скорочення експорту за збереження високої концентрації ринку посилює залежність глобальної металургії від обмеженого кола постачальників і підвищує її чутливість до цінових та геополітичних шоків.

Світовий імпорт залізної руди у вартісному вираженні скоротився на 29 % – з 244,2 млрд дол. США у 2021 р. до 173,2 млрд дол. США у 2023 р., що зумовлено корекцією світових цін та звуженням географії попиту (кількість країн-імпортерів зменшилася зі 106 до 96). Ринок імпорту залишається висококонцентрованим із домінуванням Китаю, частка якого зросла з 72,4 % до 75,9 %, визначаючи ключові параметри світової торгівлі. Водночас провідні промислові імпортери (Японія, Південна Корея, Німеччина) суттєво скоротили імпорт, тоді як окремі країни Азії та Близького Сходу демонструють відносну стійкість, поступово посилюючи свою роль у формуванні попиту.

Ціни на залізну руду на світовому ринку формуються на основі спотових котировань із поставкою до китайського порту Тяньцзінь і характеризуються високою залежністю від попиту з боку китайської металургії. У 2021–2024 рр. їх динаміка відзначалася значною волатильністю з подальшим формуванням низхідного тренду (рис. 2).

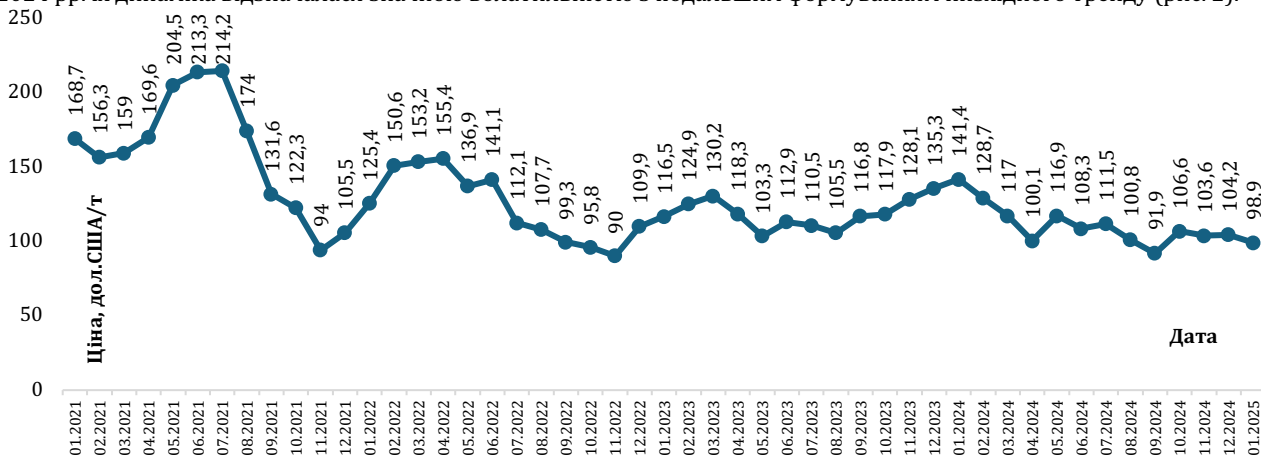


Рис. 2. Динаміка спотових цін на залізну руду в 2021–2024 рр. Джерело: сформовано авторами за [28]

У 2021 р. ціни на залізну руду досягли пікових значень (у середньому 159,4 дол. США/т, максимум – 214,2 дол. США/т) на тлі постпандемічного відновлення попиту, однак уже в другій половині року різко знизилася до 94,0 дол. США/т через обмеження виробництва сталі в Китаї. У 2022 р. сформувався стійкий низхідний тренд: середня ціна впала до 123,1 дол. США/т під впливом слабого попиту та надлишкової пропозиції. У 2023–2024 рр. ринок перейшов у фазу відносної стабілізації: ціни частково відновилися до 118,4 дол. США/т у 2023 р., але знову знизилася до 110,9 дол. США/т у 2024 р. через слабку кон'юнктуру сталеливарної галузі. Загалом, після піку 2021 р. сформувався новий рівноважний діапазон цін на рівні 90–110 дол. США/т, який, імовірно, збережеться у середньостроковій перспективі під впливом зростання пропозиції, зокрема, запуску великих проектів, таких як Сіманду (Гвінея).

Виявлені тенденції розвитку ресурсної бази та якості сировини безпосередньо впливають на формування моделей металургійного виробництва. Традиційна модель базується на інтегрованому циклі «домenna піч – кисневий конвертер» (BF/BOF), у межах якого відновлення залізної руди здійснюється з використанням вуглецевих матеріалів із подальшим виробництвом чавуну. Натомість низьковуглецевий цикл ґрунтується на технологіях прямого відновлення заліза та електросталеплавильного виробництва (DRI/EAF), що забезпечує суттєве скорочення викидів завдяки електрифікації процесів і заміщенню вуглецю, зокрема воднем.

Традиційний цикл BF/BOF, заснований на чавуні, зберігає перевагу у прямих витратах і залишається найдешевшим способом виробництва сталі [29]. Світове виробництво чавуну досягло піку 1,35 млрд т у 2021 р., після чого у 2022–2024 рр. спостерігалось його поступове скорочення, що корелює зі зниженням виробництва сталі та відображає макроекономічні. Світове виробництво чавуну характеризується не лише уповільненням зростання, але й чітким географічним зміщенням центрів виробництва вуглецево-інтенсивної продукції, що відображає загальну трансформацію металургійної галузі в умовах декарбонізації.

Структурні зрушення у рейтингу ТОП-15 виробників чавуну у період 2021–2024 рр. полягали у прискоренні географічної концентрації виробництва в Азії та технологічного зсуву в розвинених країнах світу, тоді як геополітичні потрясіння спричинили перерозподіл торговельних потоків та посилення ролі нових виробників (рис. 3).

Глобальний ринок чавуну характеризується екстремальною асиметрією виробництва, де Китай залишається безумовним лідером, забезпечуючи 64,3 % світового виробництва у піковому 2021 р. та 65,8 % у 2024 р. Проте орієнтація на внутрішнє споживання чавуну обмежує його прямий вплив на світовий ринок, динаміка якого визначається змінами у виробництві інших країн. Ключовою структурною зміною є посилення ролі Індії (+12,4 млн т за 3 роки або +5,0 %/рік на протязі останніх 10 років), чия частка у світовому виробництві чавуну зросла з 5,7 % у 2021 р. до 7,0 %. Екстремальне зростання виробництва чавуну було також зафіксовано у В'єтнамі (з 1,4 млн т у 2014 р. до 13,1 млн т у 2024 р.) завдяки швидкій індустріалізації та будівництву нових потужностей.

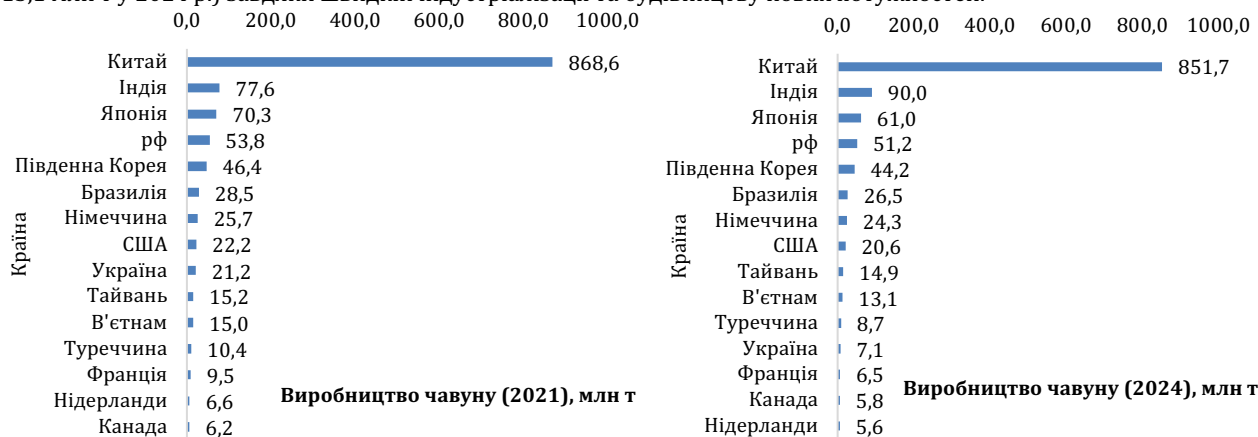


Рис. 3. ТОП-15 країн-виробників чавуну в 2021 р. та 2024 р. Джерело: сформовано авторами за [30; 31]

Водночас у 2014–2024 рр. розвинені економіки, зокрема країни Європи, Північної Америки та Японія, прагнуть до скорочення виробництва чавуну (СТП): Франція (–5 %/рік), Велика Британія (–11 %/рік), Японія (–3,1 %/рік), США (–3,5 %/рік), що є наслідком стратегічного галузевого переходу до менш вуглецево-інтенсивних виробництв.

Геополітична криза 2022 р. призвела до суттєвої дестабілізації світового ринку чавуну, про що свідчить скорочення загального обсягу експорту з 13,7 млн т у 2021 р. до 12,0 млн т у 2023 р., що становить падіння на 12,6 %. Найбільш різкі зміни в рейтингу були спричинені геополітичними факторами, що призвели до розриву традиційних ланцюгів постачання: виробництво України зазнало катастрофічного падіння (на 69,8 % у 2022 р.), що призвело до її зміщення з 10-го у 2021 р. на 16-те місце у 2023 р. у світовому рейтингу експортерів, і санкційне скорочення виробництва в рф на –14,8 %, що створило критичний вакуум на світовому ринку товарного чавуну. Проте українська металургія продемонструвала стійкість та відновлення у 2024 р., зафіксувавши найвищі у світі темпи зростання та повернувшись на 13-те місце у світовому рейтингу, що разом із відновленням морської логістики посилює її роль як важливого експортера на ринки США та ЄС. Таким чином, обидва найбільші постачальники Чорноморського регіону одночасно зазнали обвалу експортних показників, що і стало причиною глобального перерозподілу. Як наслідок, Бразилія наростила свій експорт на 19,5 % (до 3,9 млн т), очоливши світовий рейтинг. Паралельно відбулося стрімке входження нових гравців, зокрема ОАЕ, які збільшили експорт майже у 23 рази, посівши 4-те місце з обсягом 728 тис. т. Також відбулося суттєве нарощування обсягів експорту Іраном (на 70 % – 8-ме місце у рейтингу 2023 р.) та Японією (у 2,6 рази, 10-те місце у рейтингу 2023 р.) [30; 31].

Регіональна переорієнтація світових торговельних потоків товарного чавуну обумовила суттєві рейтингові зрушення серед ключових країн-імпортерів. США, Італія та Туреччина продемонстрували найбільшу стійкість, зберігши своє лідерство за попитом на чавун, незважаючи на коливання обсягів. Китай здійснив найбільший стрибок у рейтингу (+8 позицій) і продемонстрував перехід від масового імпорту чавуну до його витіснення внутрішніми джерелами та альтернативною продукцією. Водночас Південна Корея втратила 4 позиції. Промислово розвинуті країни суттєво втратили свої позиції серед ключових імпортерів, зокрема Німеччина (–5 позицій) та Бельгія (–4), Південна Корея (–4), тоді як Японія, Таїланд та Мексика вибули з рейтингу. Індонезія та ОАЕ стали новими великими імпортерами чавуну – 7-ме та 12-те місця серед ТОП-15 імпортерів в 2023 р. Це засвідчує тенденцію до переміщення виробництва чавуну до Південно-Східної Азії.

Традиційний цикл BF/BOF, що базується на вугіллі та коксі, є високоінтенсивним за викидами CO₂. Для забезпечення відповідності глобальному кліматичному шляху 1,5 °C та досягнення майже нульових викидів, викиди від виробництва сталі мають бути знижені на 90 % [32]. Виробничий цикл від заліза прямого відновлення для електросталеплавильного виробництва (цикл DRI/EAF) вважається найбільш реалістичним шляхом до декарбонізації. Залізо прямого відновлення (Direct Reduced Iron, DRI) є високоякісним проміжним продуктом, а його ущільнена форма, гарячебрикетоване залізо (Hot Briquetted Iron, HBI) є ключовим експортним товаром. Висока чистота DRI/HBI продуктів, що зазвичай досягає 90–94 % вмісту заліза (Fe), є критичною для виробництва високоякісних марок сталі [33].

Світовий ринок DRI/HBI демонструє стабільну траєкторію зростання, зумовлену процесами декарбонізації та розширенням виробничого циклу «залізо прямого відновлення – електросталеплавильне виробництво» (DRI/EAF), однак його регіональна динаміка залишається неоднорідною. Загальний світовий обсяг виробництва DRI зріс з 82,5 млн т у 2021 р. до 144,1 млн т у 2024 р., демонструючи середньорічний темп приросту у 5,7% за період 2014–2024 рр. Понад 61 % нових потужностей у сталеплавильній промисловості вводиться через електросталеплавильний маршрут, у якому DRI/HBI використовується як високоякісний замітник металобрухту [34]. За прогнозами [35], ринок

DRI/HBI (у грошовому вимірі) зростає з приблизно 21,5 млрд дол. США у 2024 р. до 39,4 млрд дол. США до 2033 р., що відповідає СТП 6,2 % (2025–2033 рр.). Ринок HBI, який є ключовим експортним товаром, оцінювався в 4,4 млрд дол. США у 2024 р. та, за прогнозами, досягне 8,1 млрд дол. США до кінця 2035 р. при СТП у 5,8 % [35].

Історично Близький Схід є світовим центром виробництва DRI/HBI із часткою у 35 % від світового виробництва в 2024 р. та СТП у 5,6 % на рік протягом останніх 10 років. Його домінування обумовлене наявністю значних запасів дешевого природного газу, який використовується для газових технологій виробництва DRI/HBI. Азія є найбільшим регіональним центром виробництва DRI/HBI у світі, утримуючи близько 39 % світової частки при СТП 7,8 % на рік завдяки прискореній урбанізації та інфраструктурному розвитку. У 2023 р. азієцьке виробництво обігнало близькосхідне. Африка демонструє найвищий СТП – 10,4 % у 2014–2024 рр., що відображає активні інвестиції у великі проекти відповідно до концепції «зелених залізних коридорів», а також наявність високоякісної руди та значний потенціал для розвитку конкурентоспроможної відновлюваної енергії [36].

Північна Америка має низький СТП у 0,9 % на рік, але високі стабільні обсяги (12–14 млн т на рік). США є найбільш зрілим ринком електросталі у світі, де 70 % сталі вже виробляється електросталеплавильним способом. Низький показник СТП свідчить про те, що основна хвиля переходу на виробничий цикл DRI/EAF вже відбулася. Поточні обсяги підтримуються експлуатацією сланцевого газу (починаючи з 2012 р.) та державними ініціативами, як от Закон про інвестиції в інфраструктуру (IIJA), що стимулює попит на електросталь [37].

ЄС-27 має найбільш негативний СТП у –17,3 % та найменші обсяги. Це відображає історичну відсутність масових інвестицій у DRI через брак конкурентоспроможних залізородних та газових ресурсів. Проте ЄС є головним світовим рушієм попиту на низьковуглецеву сталь і регіон активно інвестує у нові потужності H₂-DRI (проекти H₂ Green Steel у Швеції та Salzgitter у Німеччині) [38; 39].

У СНД виробництво заліза прямого відновлення локалізовано в РФ, яка у 2018–2024 рр. вийшла на плато у 7,8–8 млн т. Однак інші країни регіону активно інвестують у нове покоління H₂-ready HBI-потужностей (наприклад, проект ERG у Казахстані [40]).

Південна Америка, незважаючи на помітне зниження обсягів виробництва DRI (СТП –8,6 %), зберігає довгостроковий стратегічний потенціал як майбутній глобальний хаб для «зеленого» заліза завдяки наявності високоякісної залізної руди та конкурентоспроможної відновлюваної енергії [36].

Виробництво DRI ґрунтується на кількох комерційно перевірених технологіях, які класифікуються за типом використовуваного відновлювача (редуктанта). Світова структура виробництва DRI демонструє домінування газових процесів, хоча частка вугільних технологій зростає, особливо в Азії (рис. 4).

Газові процеси використовують природний газ для виробництва відновлювального газу (який складається з H₂ та CO), забезпечують виробництво DRI з нижчими викидами CO₂ і є основою для майбутнього переходу на чистий водень. У 2024 р. приблизно 65,7 % світового виробництва DRI було побудовано на використанні природного газу. Дві ключові технології, що домінують у цьому сегменті: MIDREX є безумовним світовим лідером, охоплюючи 54,1 % світового виробництва DRI у 2024 р.; HYL/Energiron становить 11,1 % світового виробництва DRI у 2024 р.

Вугільні процеси (Rotary Kiln) використовують вугілля як основний редуктант, який є технічно і

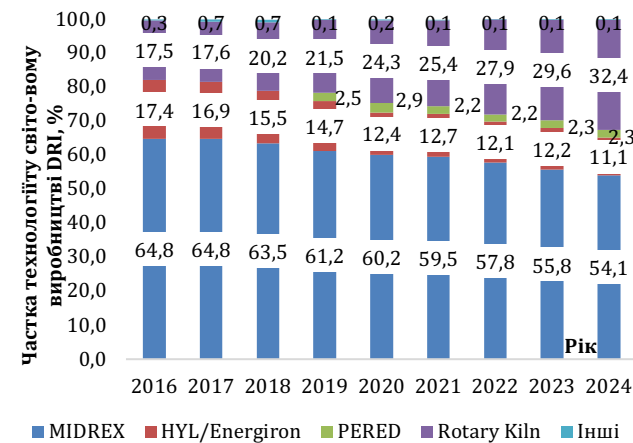


Рис. 4. Структура виробництва DRI за технологіями в 2016–2024 рр. Джерело: сформовано авторами за [25–28]

комерційно перевіреним, але вважається більш вуглецево-інтенсивним.

Менша частка світового виробництва припадає на інші технології, включаючи PERED (2,3 % світового виробництва у 2024 р.) та інші процеси (FINMET, CIRCORED, FIOR), та інші методи.

Виробництво заліза прямого відновлення здійснюється у трьох формах [29–31]: CDRI – звичайний DRI, охолоджений до 50–200 °C і поданий у виді грудок, вразливих до окиснення та самозаймання, тому виробляється поруч із EAF; HDRI – DRI, поданий у піч гарячим 600–700 °C без охолодження, краща енергетоефективність та металізація, низькі втрати, виробляється на єдиному DRI → EAF майданчику; HBI – гарячопресовані брикети DRI, які мають високу щільність та низьку пористість, тому є безпечними для транспортування, зберігання і основною формою для міжнародного експорту DRI.

Динаміка виробництва DRI чітко відображає стратегічний зсув у світовій металургії заліза: відбувається прискорена інтеграція CDRI та HDRI у національні ланцюги виробництва сталі, проте існують уповільнені тенденції щодо виробництва його експортної форми HBI (рис. 5).

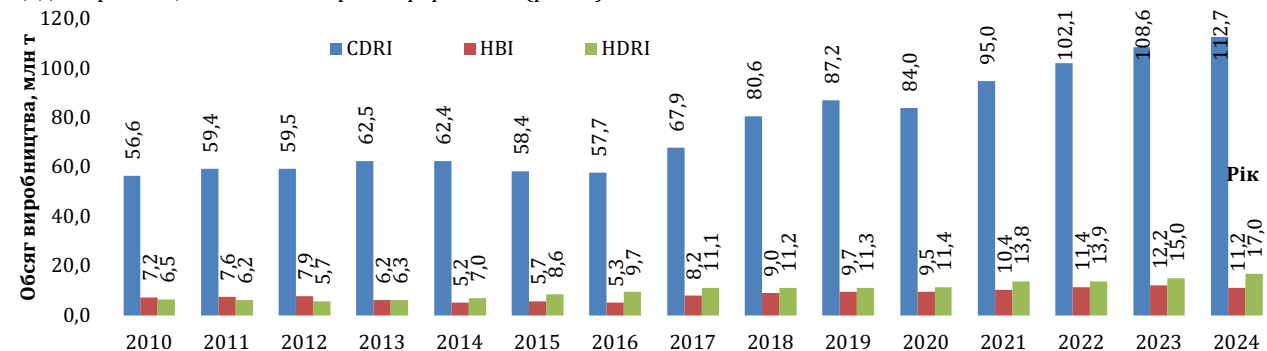


Рис. 5. Динаміка виробництва DRI за видами у 2010–2024 рр. Джерело: сформовано авторами за [41–44]

CDRI залишається безумовним лідером, зберігаючи свою частку на рівні близько 80 % від загального світового виробництва протягом усього періоду (+99,0 % у 2010–2024 рр.). Зростання CDRI відповідає за бум будівництва нових EAF у світовому масштабі. Виробництво HDRI продемонструвало найвищі темпи зростання – понад 162 %, а його частка у загальному виробництві зростає з 9,2 % до 12,1 %. Виробництво HBI зросло найменше на 55,2 % і, як наслідок, його частка у світовому виробництві впала з 10,3 % до 7,9 %. Відтак, попри свою високу щільність, HBI є менш вигідним, ніж безпосереднє використання HDRI.

Світове виробництво заліза прямого відновлення зосереджено в 25 країнах світу. Зміни у рейтингу ТОП-15 країн-виробників DRI за 2014, 2021 та 2023 рр. відображають ключові структурні зрушення, спричинені доступністю енергетичних ресурсів (природного газу та вугілля) та прискороною експансією електросталеплавильного виробництва у світі (рис. 6).

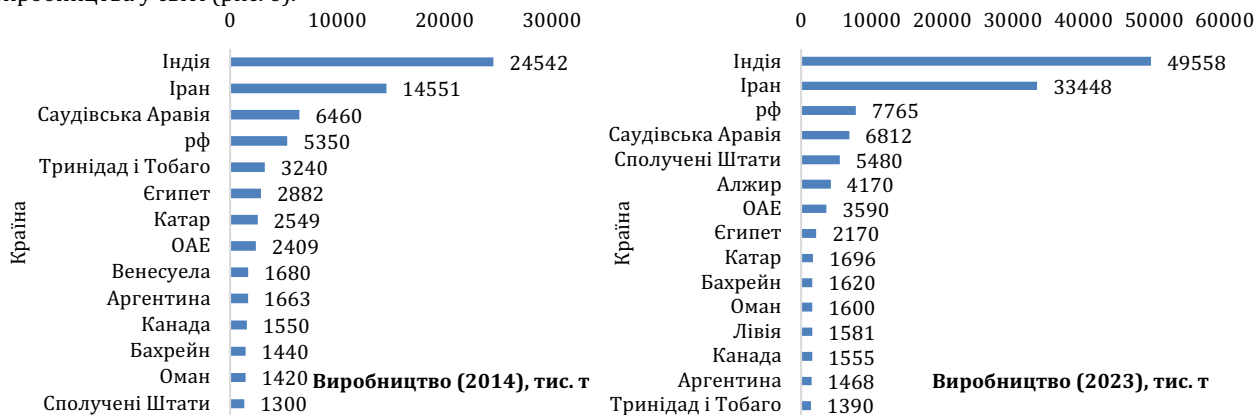


Рис. 6. ТОП-15 країн-виробників заліза прямого відновлення в 2014, 2021 та 2023 рр.

Джерело: сформовано авторами за [30]

Індія та Іран є світовими лідерами у виробництві DRI: Індія подвоїла виробництво, що призвело до зростання її частки у світовому виробництві з 29,7 % у 2014 р. до 35,7 % у 2023 р., а Іран, збільшивши більш ніж удвічі обсяги виробництва, збільшив свою частку у світовому виробництві з 17,6 % до 24,1 % відповідно. Зростання Індії значною мірою обумовлене її успішною адаптацією до місцевої сировинної бази. Індія є світовим лідером у використанні вугільних процесів (Rotary Kiln), попри те, що це більш вуглецево-інтенсивний маршрут [45]. Іран історично зосередив виробництво на газових процессах (Midrex/Energiron) завдяки доступності та низькій вартості природного газу, що забезпечує йому стійку конкурентну перевагу [46]. Найбільш вражаючим є зростання позиції США: з 14-го місця (1,3 млн т) до 5-го місця (5,4 млн т), що зумовлено розвитком зрілого електросталеплавильного виробництва. Розробка родовищ сланцевого газу дала новий потужний імпульс газовим процесам DRI у країні [47].

Саудівська Аравія (перейшла з 3-го на 4-те місце), ОАЕ (зміцнила свої позиції з 8-го на 7-ме місце), Оман та Бахрейн зберегли свої позиції завдяки послідовним інвестиціям, підтримуючи високу частку газових технологій. Поява Алжиру (6-те місце) та Лівії (12-те місце) у ТОП-15 2023 року відображає загальну тенденцію зростання виробництва DRI в африканському регіоні, який має найвищий середньорічний темп приросту, що свідчить про використання місцевих газових та рудних ресурсів. Виробництво заліза прямого відновлення в ЄС зосереджено в Німеччині та Швеції, але у світовому обсязі вони є незначними та склали 80 тис. т та 100 тис. т у 2023 р.

Світовий експорт DRI зріс із 6,9 млн т у 2014 р. до 10,8 млн т у 2023 р., при цьому його частка від світового виробництва коливалася від 7,8 % до 14,8 % протягом 10 років. Означене свідчить, що споживання DRI залишається внутрішнім пріоритетом, хоча стратегічна важливість HBI як експортного товару зростає. Світовий експорт DRI вказує на значну диференціацію країн світу за роллю в світовій торгівлі. Країни, орієнтовані на внутрішнє споживання, такі як Індія (частка експорту у виробництві 2,7 % у 2023 р.), Іран (1,3 %), Катар (1,4 %), Саудівська Аравія (0,4 %), США (3,1 %), Канада (3,5 %), маючи розвинуте власне виробництво DRI, використовують його як стратегічну внутрішню сировину для забезпечення своїх зростаючих електросталеплавильних виробництв. Країни-експортні хаби, такі як Оман (132,8 %), Тринідад і Тобаго (109,7 %), Венесуела (336,2 %), спеціалізуються на виробництві DRI, переважно у формі HBI на експорт, що робить їх ключовими постачальниками високоякісної сировини для електросталеплавильних виробництв країн, які не мають власних DRI-потужностей. Торговельні вузли, такі як Південна Корея, Бельгія, Нідерланди, не є виробниками DRI, але відіграють роль логістичних та торговельних хабів, реекспортуючи сировину до центрів кінцевого попиту в Європі та Азії.

Динаміка світового імпорту DRI/HBI розкриває критичні регіональні дисбаланси у світовій металургії заліза, підтверджуючи, що попит на високоякісну сировину для декарбонізації є масовим, але виробничі потужності залишаються географічно обмеженими. Ключовими імпортерами DRI/HBI є Саудівська Аравія (49 % від світового імпорту), країни ЄС (20 %) та США (9 %), оскільки їхня сталеплавильна промисловість прискорює перехід на електросталеплавильних виробництв та вимагає високоякісного DRI/HBI як преміального замітника металобрухту. Зростання імпорту Індії з 178 тис. т у 2014 р. до 617 тис. т у 2023 р. (4 % від світового імпорту) свідчить про те, що, незважаючи на своє лідерство у виробництві, вона також потребує високоякісного імпортованого HBI для доповнення власного вугільного виробництва преміальних марок сталі. Демонструє значне зростання імпорту DRI/HBI Туреччина у 2021–2023 рр. (з 68 тис. т до 627 тис. т). Імпорту в Африці та Південній Америці залишається незначним і нерегулярним, що вказує на нерозвиненість електросталеплавильних виробництв регіону.

Кінцевою ланкою вертикально інтегрованого ланцюга металургії заліза є виробництво сталі, яке формує попит на продукцію попередніх стадій. Динаміка сталевиробництва безпосередньо визначає обсяги та структуру виробництва на всіх етапах ланцюга. Водночас структура споживання залізовмісної сировини залежить від технологічного циклу: традиційного киснево-конверторного виробництва (BOF), що базується на чавуні, або низьковуглецевого електросталеплавильного (EAF), яке використовує DRI та/або металобрухт.

Виробництво сирої сталі в кисневих конвертерах зросло у світі на 8,1 % за період 2014–2024 рр., досягнувши 1326,8 млн т у 2024 р. У 2021 році зафіксовано рекордне значення виробництва BOF-сталі у розмірі 1404,6 млн т, після чого намітився розворот світової динаміки. Динаміка BF/BOF сталі повністю корелює з динамікою виробництва

чавуну. Зростання виробництва BOF-сталі у світі майже повністю забезпечується країнами Азії, які демонструють стабільну динаміку (+1,6 %/рік), що підкреслює їх роль як глобального центру вуглецево-інтенсивного металургійного виробництва. Натомість у розвинених регіонах спостерігається стійке скорочення виробництва: у Північній Америці на -4,3 %/рік, у ЄС-27 на -2,6 %/рік. Це відображає свідомий галузевий перехід від чавунозорієнтованого виробництва BOF-сталі менш вуглецево-інтенсивного циклу DRI/EAF у відповідь на кліматичні вимоги. Країни СНД також демонструють скорочення виробництва (близько -2,6 %/рік для чавуну та -2,9 %/рік для сталі), що зумовлено геополітичними чинниками та порушенням традиційних ланцюгів постачання. Водночас Близький Схід демонструє зростання виробництва чавуну (+2,6 %/рік) за умов стагнації виробництва BOF-сталі (-0,8 %/рік), що свідчить про дивергенцію виробничого циклу та посилення ролі чавуну як експортно орієнтованого продукту.

У 2014–2024 рр. світова металургія BF/BOF продемонструвала посилення географічної концентрації в Азії та системне ослаблення позицій традиційних розвинених країн (США, Німеччина, Франція, Японія) через тренди декарбонізації. Одночасно відбувся кардинальний перерозподіл позицій через геополітичні чинники, що призвело до вибуття України з рейтингу ТОП15 виробників (16-е місце у 2024 р.) та значних змін у рейтингу інших країн СНД (рис. 7).

Порівняння рейтингів виробників чавуну та сталі свідчить про посилення географічної концентрації вуглецево-інтенсивного металургійного виробництва у двох азієських країнах. Китай зберіг безумовне 1-ше місце в обох рейтингах, навіть наростивши свою частку у світовому виробництві сталі з 62,6 % до 68,1 %, тоді як його частка за чавуном зростає з 60,1 % у 2014 р. до 65,8 % у 2024 р. Індія демонструє найбільш узгоджений та стрімкий підйом, значно збільшивши свою частку і піднявшись на 3-тє місце серед світових виробників сталі (частка зростає з 3,0 % у 2014 р. до 4,6 % у 2024 р.), а частка за чавуном зростає з 4,7 % у 2014 р. до 7,0 % у 2024 р. Це підтверджує, що ці дві країни є головними драйверами зростання та концентрації традиційного інтегрованого циклу BF/BOF.



Рис. 7. ТОП-15 країн-виробників BOF-сталі в 2014, 2021 та 2024 рр. Джерело: сформовано авторами за [30; 31]

Рейтингові зміни у розвинених економіках ЄС-27 та Північної Америки є ідентично узгодженими і відображають стратегічне скорочення металургії заліза традиційного циклу. США синхронно опустилися з 6-го на 8-ме місце в обох рейтингах, втративши частку у світовому виробництві сталі з 2,7 % (2014 р.) до 1,7 % (2024 р.), та частку у виробництві чавуну з 2,5 % до 1,6 % відповідно. Німеччина та Франція також зафіксували відповідно падіння позицій, а їхні частки знизилися: Німеччина у світовому виробництві сталі – з 2,4 % до 2,0 % (виробництв чавуну – з 2,3 % до 1,9 %), Франція – з 0,9 % до 0,5 % (0,9 % до 0,7 %). Значущим наслідком цього тренду стало вибуття з ТОП-15 як виробників чавуну, так і виробників сталі Великої Британії (частка у виробництві сталі впала з 0,8 % до <0,5 %, а частка чавуну – з 0,8 % до <0,4 % у 2014–2024 рр.).

Геополітичні чинники спричинили катастрофічне падіння обсягів виробництва сталі та чавуну в Україні: вона перемістилася у світовому рейтингу виробництва чавуну з 9-го місця у 2014 р. на 12 місце у 2024 р. (втратила 1,5 % світового ринку чавуну), а сталі – із 3-го місця у 2014 р. до 16 місця у 2024 р. (втратила 3,6 % світового ринку традиційної сталі).

Перехід від традиційного циклу BF/BOF до циклу DRI/EAF є ключовою світовою тенденцією у металургії заліза та сталі для декарбонізації галузі. У 2014–2024 рр. світовий обсяг виробництва сталі в електросталеплавильним способом зріс на 26,4 % році, досягши 556 млн т у 2024 р., що доводить посилення ролі цієї технології у світовій металургії як найбільш гнучкої, енергоефективної і екологічної порівняно з киснево-конверторним виробництвом. Однак ці тенденції є диференційованими залежно від регіонів світу.

Найвищі темпи зростання виробництва EAF-сталі серед усіх регіонів фіксуються в Африці (+7,8%/рік), що зумовлено стрімкою урбанізацією та зростанням попиту на інфраструктуру. Наявність сприятливих кліматичних умов і значних обсягів металобрухту створює передумови для розвитку гнучких «зелених» міні-заводів. Азія залишається найбільшим виробником EAF-сталі у світі (48 % у 2024 р.), демонструючи стабільне зростання (+3,5 %/рік), що обумовлено екологічною політикою Китаю та активними інвестиціями у металургію в країнах, що розвиваються (Індія, Індонезія). У Північній Америці спостерігається помірне зростання (+0,2 %/рік) при значних обсягах виробництва (76,6 млн т), що відображає зрілість і технологічну насиченість ринку, де EAF-технологія вже є домінуючою та залежить від доступності металобрухту. Натомість у ЄС-27 виробництво скорочується (-1,1%/рік) під впливом кліматичної політики, високих цін на енергію та повільного економічного зростання. При цьому інвестиції спрямовуються не на розширення EAF-потужностей, а на глибоку декарбонізацію через впровадження водневих технологій та DRI. У Південній Америці спад виробництва (-1,15%/рік) зумовлений макроекономічною нестабільністю, низьким попитом і високою інфляцією. У країнах СНД та Україні виробництво характеризується значною волатильністю через геополітичні чинники, зокрема воєнні руйнування виробничих потужностей.

Рейтинг ТОП-15 країн-виробників EAF-сталі у 2014–2024 рр. свідчить про глибоку трансформацію світового ринку та зміщення центрів виробництва від розвинених країн до країн Азії, Близького Сходу та Африки (рис. 8).

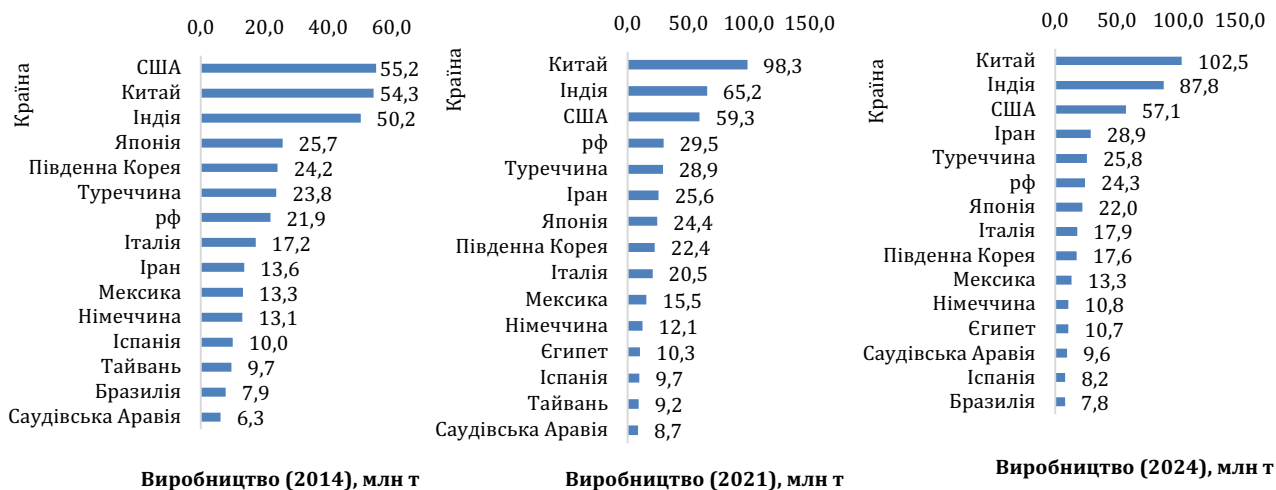


Рис. 8. ТОП-15 країн-виробників EAF-сталі в 2014, 2021 та 2024 рр.

Джерело: сформовано авторами за джерелами [30; 31]

Китай став беззаперечним світовим лідером у виробництві EAF-сталі, збільшивши свою частку з 12,4 % у 2014 р. до 18,4 % у 2024 р. Індія продемонструвала найвищі темпи зростання, піднявшись із 3-го на 2-ге місце та наростивши частку з 11,4 % до 15,8 %. У сукупності ці дві країни забезпечують понад третину світового виробництва EAF-сталі. Водночас США втратили позиції, опустившись з 1-го місця (12,5 %) у 2014 р. до 3-го (10,3 %) у 2024 р.

Стрімке зростання виробництва спостерігається також у країнах Близького Сходу та Африки, що зумовлено доступом до дешевих енергоресурсів (природного газу та ВДЕ) і зростанням внутрішнього попиту. Зокрема, Іран піднявся з 9-го на 4-те місце, досягнувши частки 5,2 %, тоді як Єгипет і Саудівська Аравія покращили свої позиції у світовому рейтингу.

Натомість у країнах ЄС та Східної Азії фіксується скорочення виробництва EAF-сталі через високі ціни на енергоносії та уповільнення попиту. Частки провідних виробників знижуються: Німеччина – з 3,0 % до 1,9 %, Японія – з 5,8 % до 4,0 %, Південна Корея – з 5,5 % до 3,2 %.

Таким чином, регіони з доступом до дешевої енергії та потенціалом ВДЕ (Близький Схід, Африка, Азія) стають новими центрами виробництва DRI та EAF-сталі. Виробництво DRI, яке зростає швидше (5,7 %/рік), ніж EAF-сталі (2,4 %/рік), формує основу низьковуглецевого металургійного ланцюга, виступаючи преміальною сировиною для заміщення чавуну та металобрухту.

Порівняння тенденцій розвитку для двох напрямів розвитку металургії заліза представлений у табл. 2.

Азія залишається світовим лідером у виробництві сталі, демонструючи зростання за всіма технологічними сегментами: як у традиційному циклі BF/BOF (+2,6 % та +1,6 %/рік відповідно), так і в низьковуглецевому DRI/EAF (+7,8 % та +3,5 %/рік). Така подвійна траєкторія зумовлена масштабами індустріалізації (Китай, Індія, Індонезія) та одночасною модернізацією виробництва через розвиток DRI і розширення EAF-потужностей.

Країни Африки та Близького Сходу використовують переваги доступу до дешевої енергії (природний газ, ВДЕ), формуючи нові центри зростання. Африка демонструє найвищі темпи розвитку, поєднуючи скорочення традиційного виробництва BF/BOF (-5,4 % та -2,4 %/рік) із швидким нарощуванням DRI/EAF (+10,4 % та +7,8 %/рік), що відображає прямий перехід до «зеленої» металургії. Близький Схід також нарощує виробництво DRI/EAF (+5,6 % та +6,4 %/рік) за умов поступового скорочення BF/BOF, формуючи інтегровані ланцюги на основі природного газу та орієнтуючись на експорт сталі.

Північна Америка характеризується зрілою структурою ринку та завершеним переходом до EAF-технологій: на тлі скорочення BF/BOF (-4,2 % та -4,3 %/рік) спостерігається незначне зростання DRI/EAF (+0,9 % та +0,2 %/рік), що свідчить про насиченість ринку та обмеження, пов'язані з доступністю сировини.

Натомість країни ЄС перебувають під подвійним тиском кліматичної політики (ETS, CBAM) та високих енергетичних витрат, що зумовлює скорочення як традиційного виробництва BF/BOF (-2,6 % та -2,5 %/рік), так і DRI/EAF (-1,7 % та -1,1 %/рік). Це відображає складність переходу до низьковуглецевої металургії в умовах енергетичної кризи.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Отже, світова металургія заліза перебуває у фазі системної трансформації під впливом декарбонізації та енергетичного переходу. На рівні ресурсної бази спостерігається погіршення якості залізної руди за одночасного зростання її ролі, що посилює залежність галузі від обмеженого кола постачальників високосортної сировини. Глобальна торгівля характеризується скороченням вартості за збереження високої концентрації. У виробничому вимірі відбувається структурний зсув від BF/BOF до DRI/EAF, однак цей процес є асиметричним: Азія зберігає

Таблиця 2. Порівняння регіональних тенденцій розвитку металургії заліза за середньорічними темпами розвитку у 2014–2024 рр.

Регіон	BF, %	BOF, %	DRI, %	EOF, %
ЄС-27	-2,6	-2,5	-17,3	-1,1
Інша Європа	-2,4	-3,3	---	0,3
СНД + Україна	-2,6	-2,9	4,1	0,7
Північна Америка	-4,2	-4,3	0,9	0,2
Південна Америка	-0,6	-0,5	-8,6	-1,1
Африка	-5,4	-2,4	10,4	7,8
Азія	2,6	1,6	7,8	3,5
Океанія	1,7	-0,9	---	1,3
Близький Схід	-1,5	-0,8	5,6	6,4
Світ	0,9	0,8	5,7	2,4

Примітка: BF – доменне виробництво чавуну;
BOF – кислородно-конверторне виробництво сталі;
DRI – виробництво заліза прямого відновлення;
EOF – електросталеплавильне виробництво сталі
Джерело: сформовано авторами

домінування, розвинені країни скорочують вуглецево-інтенсивне виробництво, тоді як Близький Схід і Африка формують нові центри зростання на основі доступу до дешевої енергії. Випереджаюче зростання DRI підтверджує його ключову роль у низьковуглецевому металургійному ланцюгу.

Таким чином, світова металургія переходить до технологічно-енергетичної моделі розвитку, в якій конкурентоспроможність визначається якістю сировини, доступом до енергії та інтеграцією у DRI/EAF-ланцюги. Для України ці трансформації мають подвійний характер: з одного боку, війна спричинила різке скорочення видобутку та експорту, з іншого – створює передумови для структурної модернізації галузі на основі DRI/EAF-технологій та інтеграції до європейського низьковуглецевого ринку сталі.

Література

1. International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap. Paris: IEA, 2020. 166 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/10/iron-and-steel-technology-roadmap_040b14d5/3dccc2a1b-en.pdf/.
2. World Steel Association. Climate change and the production of iron and steel. Brussels: World Steel Association, 2023. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Policy-Paper-climate-change-and-the-production-of-steel.pdf>.
3. United Nations. Paris Agreement. 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
4. World Steel Association. Mission Possible Partnership. Making Net-Zero Steel Possible. 2022. 120 p. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2b-Pathway-to-Paris-Mission-Possible-Partnership-net-zero-steel-sector-transition-strategy.pdf>.
5. European Commission. A Clean Planet for all: A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brussels, 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018BDC0773>.
6. International Energy Agency. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2023. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.
7. Energy Transitions Commission. Making Net-Zero Steel Possible. London, 2021. 96 p. URL: <https://www.energy-transitions.org/publications/making-net-zero-steel-possible/#download-form>.
8. Kim J., Lee H., Kim J. Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of technologies, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*. 2022. № 330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.102565>.
9. Fan Z., Friedmann S. J., Vogl V. Low-carbon production of iron and steel: Technology options and policy implications. *Joule*. 2021. Vol. 5. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.
10. Shahabuddin M., Brooks G., Rhamdhani M.A. Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: recent development, challenges and techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 395. P. 136391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391>.
11. Vogl V., Åhman M., Nilsson L. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>.
12. Fishedick M., Marzinkowski J., Winzer P., Weigel M. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>.
13. Bataille C. Low and zero emissions in the steel and cement industries. OECD Green Growth Papers. 2020. DOI: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/01/low-and-zero-emissions-in-the-steel-and-cement-industries_9ebdcb79/5ccf8e33-en.pdf.
14. Pauliuk S., Milford R.L., Müller D.B., Allwood J.M. The steel scrap age. *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47. URL: <https://scispace.com/pdf/the-steel-scrap-age-2oommywtse.pdf>.
15. Watari T., Nansai K., Nakajima K. Decarbonizing the global steel industry in a resource-constrained world. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0233>.
16. Венгрє В.В. Металургійна галузь України: фактори зростання та напрями державного регулювання: монографія. НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України». Київ, 2022. 324 с. URL: <https://ief.org.ua/publication/monohrafi/2022/metallurgical-industry>.
17. Драчук Ю.З., Зеркаль А.В., Сталінська О.В., Снітко Є.О. Стимули для металургії щодо зменшення викидів CO₂. 2022. URL: <https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/10458/%D0%A1%D1%82%D0%B8%D0%BC%D1%83%D0%BB%D0%B8%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%97%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8E%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D0%B4%D1%96%D0%B2%20%D0%A1%D0%9E.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>.
18. Даценко А.М. Вплив «СВАМ» на розвиток та конкурентоспроможність металургійної галузі України. *Економіка та суспільство*. 2024. Випуск 70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-99>.
19. Тубольцев Л.Г., Чайка О.Л., Бабаченко О.І. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Випуск 37. С. 4-25. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>.
20. Матухно О.В., Станиціна В.В., Артемчук В.О. Перспективи впровадження технології прямого відновлення заліза для декарбонізації металургії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 4 (80). С. 156-171. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.156>.
21. Зеленін Ю.М. Тенденції декарбонізації металургії у контексті сталого розвитку. *Інвестиції: практика та досвід*. 2025. № 22. С. 232-238. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2025.22.232>.
22. U.S. Geological Survey (USGS). 2021. Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2021. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-iron-ore.pdf>.
23. U.S. Geological Survey (USGS). 2022. Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2022. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-ore.pdf>.
24. U.S. Geological Survey (USGS). 2023. Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2023. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-ore.pdf>.
25. U.S. Geological Survey (USGS). 2024. Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2024. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-iron-ore.pdf>.
26. Ермоленко Г. Проєкт Simandou змінить динаміку на світовому ринку залізної руди. GMK Center. 2024. URL: <https://gmk.center/ua/news/proiekt-simandou-zminit-dinamiku-na-svitovomu-rinku-zaliznoi-rudi/>.
27. Trade Statistics by Product (HS 6-digit). WITS (World Integrated Trade Solution). World Bank. URL: <https://wits.worldbank.org/trade/country-byhs6product.aspx?lang=en>.
28. Iron Ore. Trading Economics. URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>.
29. Steel Overview. Climate Knowledge Initiative, Columbia Business School. URL: <https://business.columbia.edu/insights/climate/cki/steel/overview>.
30. World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2024. 2024. URL: https://worldsteel.org/media/publications/ssy_subscription-2024/.
31. Crude steel production by process 2024. Y: World Steel in Figures 2025. World Steel Association. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/#crude-steel-production-by-process-2024>.
32. E3G. 1.5C Steel: decarbonising the steel sector in Paris-compatible pathways. 2021. URL: https://www.e3g.org/wp-content/uploads/1.5C-Steel-Report_E3G-PNNL-1.pdf.
33. Texas HBI. ArcelorMittal. URL: <https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-texas-hbi>.

34. Hot Briquetted Iron (HBI) Market. Global Growth Insights. URL: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/hot-briquetted-iron-hbi-market-102933>.
35. Direct Reduced Iron (DRI) and Hot Briquetted Iron (HBI) Market. DataHorizon Research. URL: <https://datahorizonresearch.com/direct-reduced-iron-dri-and-hot-briquetted-iron-hbi-market-44846>.
36. Green iron corridors: A new way to transform the steel business. RMI. 2024. URL: <https://rmi.org/green-iron-corridors-a-new-way-to-transform-the-steel-business>.
37. US Hot Briquetted Iron Market. Persistence Market Research. URL: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/us-hot-briquetted-iron-market.asp>.
38. Unlocking the First Wave of Breakthrough Steel Investments: International Opportunities. Energy Transitions Commission. 2023. URL: <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf>.
39. Decarbonisation timeline. Steelonthenet.com. URL: <https://www.steelonthenet.com/resources/kb/decarbonisation-timeline.htm>.
40. Eurasian Resources Group to become global supplier of HBI following major deal with Primetals Technologies and Midrex Technologies. 2025. Midrex. URL: <https://www.midrex.com/press-release/eurasian-resources-group-to-become-global-supplier-of-hbi-following-major-deal-with-primetals-technologies-and-midrex-technologies>.
41. Midrex STATS Book 2021. Midrex Technologies, Inc. 2021. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf>.
42. Midrex STATS Book 2022. Midrex Technologies, Inc. 2022. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf>.
43. Midrex STATS Book 2023. Midrex Technologies, Inc. 2023. URL: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2023.Final_.pdf.
44. Midrex STATS Book 2024. Midrex Technologies, Inc. 2024. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexStatsBook2024.pdf>.
45. Joulazadeh M.H., Etemad A. Evaluation of the production of DRI in the world and Iran in 2021. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. 2022. Vol. 19. No. 1. P. 55-66. URL: https://www.researchgate.net/publication/390815775_Evaluation_of_the_production_of_DRI_in_the_world_and_Iran_in_2021.
46. Texas HBI. ArcelorMittal. URL: <https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-texas-hbi>.
47. Chhattisgarh Environment Conservation Board. 2022. Raipur. URL: <https://www.enviscecb.org/523/English.pdf>.

References

1. (2020). International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap. IEA. Paris. France. Available at: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/10/iron-and-steel-technology-roadmap_040b14d5/3dccc2a1b-en.pdf/.
2. (2023). World Steel Association. Climate change and the production of iron and steel. World Steel Association. Brussels. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Policy-Paper-climate-change-and-the-production-of-steel.pdf>.
3. (2015). United Nations. Paris Agreement. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
4. (2022). World Steel Association. Mission Possible Partnership. Making Net-Zero Steel Possible. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2b.-Pathway-to-Paris-Mission-Possible-Partnership-net-zero-steel-sector-transition-strategy.pdf>.
5. (2018). European Commission. A Clean Planet for all: A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brussels. Belgium. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773>.
6. (2024). International Energy Agency. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2023. IEA. Paris. France. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.
7. (2021). Energy Transitions Commission. Making Net-Zero Steel Possible. London. Available at: <https://www.energy-transitions.org/publications/making-net-zero-steel-possible/#download-form>.
8. Kim, J., Lee, H., Kim, J. (2022). «Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of technologies, challenges and opportunities». *Journal of Cleaner Production*. № 330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrp.2022.102565>.
9. Fan, Z., Friedmann, S.J., Vogl, V. (2021). «Low-carbon production of iron and steel: Technology options and policy implications». *Joule*. Vol. 5. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.
10. Shahabuddin, M., Brooks, G., Rhamdhani, M.A. (2023). «Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: recent development, challenges and techno-economic analysis». *Journal of Cleaner Production*. Vol. 395. pp. 136391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391>.
11. Vogl, V., Åhman, M., Nilsson, L. (2018). «Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking». *Journal of Cleaner Production*. Vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>.
12. Fischedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., Weigel, M. (2014). «Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies». *Journal of Cleaner Production*. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>.
13. Bataille, C. (2020). Low and zero emissions in the steel and cement industries. OECD Green Growth Papers. DOI: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/01/low-and-zero-emissions-in-the-steel-and-cement-industries_9ebdcb79/5ccf8e33-en.pdf.
14. Pauliuk, S., Milford, R.L., Müller, D.B., Allwood, J.M. (2013). «The steel scrap age». *Environmental Science & Technology*. Vol. 47. Available at: <https://scispace.com/pdf/the-steel-scrap-age-200mywtse.pdf>.
15. Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K. (2024). «Decarbonizing the global steel industry in a resource-constrained world». *Nature Communications*. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0233>.
16. Venher, V.V. (2022). *Metallurhijna haluz' Ukrainy: faktory zrostannia ta napriamy derzhavnoho rehuliuвання*. [Metallurgical industry of Ukraine: growth factors and directions of state regulation]. NAN Ukrainy, DU «In-t ekon. ta prohnouzuv. NAN Ukrainy». Kyiv. Ukraine. Available at: <https://ief.org.ua/publication/monohrafi/2022/metallurgical-industry>.
17. Drachuk, Yu.Z., Zerkal', A.V., Stalins'ka, O.V., Snitko, Ye.O. (2022). Stymuly dlia metallurhii schodo zmenshennia vykydiv CO₂. [Incentives for metallurgy to reduce CO₂ emissions]. Available at: <https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/10458/%D0%A1%D1%82%D0%B8%D0%BC%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%B4%D0%BB%D1%8F%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%97%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8E%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D0%B4%D1%96%D0%B2%D0%A1%D0%9E2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
18. Datsenko, A.M. (2024). «The impact of "CBAM" on the development and competitiveness of the metallurgical industry of Ukraine». *Ekonomika ta suspil'stvo*. Issue 70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-99>.
19. Tubol'tsev, L.H., Chajka, O.L., Babachenko, O.I. (2023). «Prospects for the development of metallurgical production in Ukraine through the use of new technologies». *Fundamental'ni ta prykladni problemy chornoj metallurhii*. Issue 37. pp.4-25. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>.
20. Matukhno, O.V., Stanytsina, V.V., Artemchuk, V.O. (2024). «Prospects for the implementation of direct iron reduction technology for decarbonization of metallurgy». *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*. № 4 (80). pp. 156-171. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.156>.
21. Zelenin, Yu.M. (2025). «Trends in decarbonization of metallurgy in the context of sustainable development». *Investytsii: praktyka ta dosvid*. № 22. pp. 232-238. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2025.22.232>.
22. U.S. Geological Survey (USGS). (2021). Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2021. Available

- at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-iron-ore.pdf>.
23. U.S. Geological Survey (USGS). (2022). Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2022. Available at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-ore.pdf>.
 24. U.S. Geological Survey (USGS). (2023). Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2023. Available at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-ore.pdf>.
 25. U.S. Geological Survey (USGS). (2024). Iron Ore. In Mineral Commodity Summaries 2024. Available at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-iron-ore.pdf>.
 26. Yermolenko, H. (2024). *Proiekt Simandou zminyt' dynamiku na svitovomu rynku zaliznoi rudy*. GMK Center. [Simandou project will change the dynamics of the global iron ore market]. Available at: <https://gmk.center/ua/news/proiekt-simandou-zminyt-dynamiku-na-svitovomu-rynku-zaliznoi-rudi/>.
 27. Trade Statistics by Product (HS 6-digit). WITS (World Integrated Trade Solution). World Bank. Available at: <https://wits.worldbank.org/trade/country-byhs6product.aspx?lang=en>.
 28. Iron Ore. Trading Economics. Available at: <https://tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>.
 29. Steel Overview. Climate Knowledge Initiative, Columbia Business School. Available at: <https://business.columbia.edu/insights/climate/cki/steel/overview>.
 30. (2024). World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2024. Available at: https://worldsteel.org/media/publications/ssy_subscription-2024/.
 31. Crude steel production by process 2024. Y: World Steel in Figures 2025. World Steel Association. Available at: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/#crude-steel-production-by-process-2024>.
 32. (2021). E3G. 1.5C Steel: decarbonising the steel sector in Paris-compatible pathways. Available at: https://www.e3g.org/wp-content/uploads/1.5C-Steel-Report_E3G-PNNL-1.pdf.
 33. Texas HBI. ArcelorMittal. Available at: <https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-texas-hbi>.
 34. Hot Briquetted Iron (HBI) Market. Global Growth Insights. Available at: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/hot-briquetted-iron-hbi-market-102933>.
 35. Direct Reduced Iron (DRI) and Hot Briquetted Iron (HBI) Market. DataHorizon Research. Available at: <https://datahorizonresearch.com/direct-reduced-iron-dri-and-hot-briquetted-iron-hbi-market-44846>.
 36. Green iron corridors: A new way to transform the steel business. RMI. (2024). Available at: <https://rmi.org/green-iron-corridors-a-new-way-to-transform-the-steel-business>.
 37. US Hot Briquetted Iron Market. Persistence Market Research. Available at: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/us-hot-briquetted-iron-market.asp>.
 38. (2023). Unlocking the First Wave of Breakthrough Steel Investments: International Opportunities. Energy Transitions Commission. Available at: <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf>.
 39. Decarbonisation timeline. Steelonthenet.com. Available at: <https://www.steelonthenet.com/resources/kb/decarbonisation-timeline.htm>.
 40. (2025). Eurasian Resources Group to become global supplier of HBI following major deal with Primetals Technologies and Midrex Technologies. Midrex. Available at: <https://www.midrex.com/press-release/eurasian-resources-group-to-become-global-supplier-of-hbi-following-major-deal-with-primetals-technologies-and-midrex-technologies>.
 41. Midrex STATS Book 2021. Midrex Technologies, Inc. (2021). Available at: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf>.
 42. Midrex STATS Book 2022. Midrex Technologies, Inc. (2022.) Available at: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf>.
 43. Midrex STATS Book 2023. Midrex Technologies, Inc. (2023). Available at: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2023.Final_.pdf.
 44. Midrex STATS Book 2024. Midrex Technologies, Inc. (2024). Available at: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexStatsBook2024.pdf>.
 45. Joulazadeh, M.H., Etemad, A. (2022). «Evaluation of the production of DRI in the world and Iran in 2021». *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. Vol. 19. No. 1. pp. 55–66. Available at: https://www.researchgate.net/publication/390815775_Evaluation_of_the_production_of_DRI_in_the_world_and_Iran_in_2021.
 46. Texas HBI. ArcelorMittal. Available at: <https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-texas-hbi>.
 47. (2022). Chhattisgarh Environment Conservation Board. Raipur. Available at: <https://www.envisceb.org/523/English.pdf>.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.01.2026
Опубліковано / Published 25.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 09.02.2026