

УДК 620.9 + 669.1

Олена Матухно^{1,2}, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-5536-6745>

Валентина Станиціна^{1,3*}, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-1005-6185>

Володимир Артемчук^{4,5}, д-р техн. наук., ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-8819-4564>

¹Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна;

³ДУ «Центр оцінювання діяльності наукових установ та наукового забезпечення розвитку регіонів України Національної академії наук України», вул. Володимирська, 54, м. Київ, 01601, Україна;

⁴Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, вул. Генерала Наумова, 15, м. Київ, 03164, Україна;

⁵Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, просп. Академіка Палладіна, 34а, м. Київ, 03142, Україна

*Автор-кореспондент: st_v_v@hotmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. *Металургійна галузь є однією з найвуглецевоємніших у світі, на яку припадає понад 7 % глобальних викидів парникових газів. Українська металургійна промисловість, яка є стратегічним джерелом валютних надходжень та важливим елементом економічної стабільності країни, наразі переживає суттєві виклики через необхідність адаптації до кліматичних зобов'язань, визначених Паризькою угодою, а також через введення прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ) у Європейському Союзі. У статті здійснено всебічний аналіз перспектив впровадження технології прямого відновлення заліза (DRI) для українських металургійних підприємств як одного з ефективних шляхів декарбонізації виробництва сталі. Проведено порівняння традиційних методів на основі доменних печей та кисневих конвертерів із технологією DRI з використанням природного газу, вугілля, синтез-газу та водню. Виявлено основні переваги впровадження DRI, а також визначено інфраструктурні, технологічні та фінансові бар'єри, які потребують подолання для ефективної декарбонізації української металургійної галузі.*

Ключові слова: декарбонізація, металургія, сталь, пряме відновлення заліза, водень, парникові гази, СВАМ, Україна.

1. Вступ

Металургійна галузь є однією з найбільш енерго- та вуглецевоємних у світі, на яку припадає понад 7 % глобальних викидів парникових газів (ПГ) [1]. Україна традиційно входила до переліку провідних виробників металургійної продукції, проте останнє десятиліття характеризується зниженням обсягів виробництва.

Металургійна промисловість є однією з ключових галузей української економіки, суттєвою частиною її виробничого потенціалу та важливим елементом міжнародної торгівлі. За обсягами експорту металургійна продукція займає одну з лідируючих позицій серед товарних категорій, що робить її стратегічно важливим джерелом валютних надходжень та ресурсом для підтримки макроекономічної стабільності країни. Українські металургійні підприємства є також великими роботодавцями, що забезпечують робочі місця тисячам людей та виступають значущими соціальними об'єктами, особливо в регіонах з високою концентрацією промислових потужностей. Це

підкреслює важливість сталого розвитку галузі в контексті економічної та соціальної стабільності України.

Україна як учасник міжнародних кліматичних угод взяла на себе зобов'язання щодо зменшення викидів парникових газів і переходу до низьковуглецевої економіки. У рамках Паризької угоди Україна зобов'язалася скоротити викиди парникових газів на 65 % до 2030 року від рівня 1990 року [2]. Крім того, з ухваленням Європейським Союзом механізму прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ) українські металургійні підприємства, які експортують свою продукцію до ЄС, зіштовхнуться з додатковими фінансовими зобов'язаннями через високий вуглецевий слід своєї продукції [3]. СВАМ передбачає запровадження вуглецевого податку на імпорт продукції з високими викидами CO₂, включаючи чавун і сталь. Це створює додатковий стимул для українських виробників сталі модернізувати свої технології та зменшити вуглецевий слід продукції [3, 4].

Останніми роками дослідження з декарбонізації металургійної галузі набули значного поштовху, що відображено в численних публікаціях. У роботі Lee та ін. [5] досліджено шляхи декарбонізації промислового сектору Кореї для досягнення мети вуглецевої нейтральності до 2050 року. Автори аналізують різні сценарії зниження викидів CO₂ в металургійній галузі, зосереджуючись на впровадженні передових технологій та політичних заходів.

Devlin та ін. [6] провели техніко-економічну оптимізацію ланцюжків постачання сталі в контексті переходу до чистої енергії, використовуючи як приклад післявоєнну Україну. Вони досліджують можливості модернізації металургійної галузі України шляхом впровадження низьковуглецевих технологій, включаючи пряме відновлення заліза (direct-reduced iron (DRI)), та оцінюють їх економічну ефективність. Keramidis та ін. [7] розглядають можливості та перешкоди в декарбонізації глобального сталеливарного сектору, застосовуючи моделювання попиту та виробництва. Автори показують, що поєднання технологічних інновацій та політичних заходів може суттєво знизити викиди CO₂, проте існують значні виклики, пов'язані з інвестиціями та інфраструктурою.

Kiessling та ін. [8] досліджують питання енергетичної незалежності через стале виробництво сталі. Автори підкреслюють роль відновлюваних джерел енергії та водню в зниженні вуглецевого сліду металургійної галузі та забезпеченні стійкого розвитку.

У роботі de Villafranca Casas та ін. [9] проаналізовано колективні амбіції та заплановані заходи зі зниження викидів провідних сталеливарних компаній та оцінено їх кліматичні цілі. Автори виявляють, що хоча багато компаній оголосили про плани декарбонізації, існує розрив між задекларованими цілями та конкретними діями.

Renforth та ін. [10] досліджують можливість використання руд з нижчим вмістом заліза в декарбонізованій сталеливарній промисловості з негативними викидами. Автори показують, що видалення CO₂ з атмосфери може дозволити ефективне використання низькосортних руд, сприяючи сталому розвитку галузі.

Lundmark та ін. [11] аналізують «зелену трансформацію» металургійної галузі, зосереджуючись на ринкових та конкурентних аспектах використання водню та біомаси. Вони оцінюють економічну доцільність цих опцій та їх вплив на ринок сталі.

Scaccabarozzi та ін. [12] провели техніко-економічний аналіз інтеграції паливних елементів на основі розплавленого карбонату в установках DRI для декарбонізації металургійної галузі. Результати показують, що така інтеграція може знизити викиди CO₂ та підвищити енергоефективність процесу.

Liu та ін. [13] дослідили шляхи декарбонізації металургійної галузі Китаю з використанням економічно ефективних технологій пом'якшення викидів. Вони застосували інтегрований аналіз з використанням як макроекономічних (top-down), так і мікроекономічних (bottom-up) моделей.

Boldrini та ін. [14] вивчили вплив декарбонізації металургійної галузі на європейські енергетичні та водневі системи. Автори показують, що перехід до низьковуглецевого виробництва сталі матиме значний вплив на попит на електроенергію та водень, вимагаючи адаптації енергетичної

інфраструктури.

Українські вчені також проводять дослідження з декарбонізації електроенергетики [15, 16], теплопостачання [17, 18], вугільної [19, 20] та нафтогазової [21, 22] промисловості. В роботах [23, 24] розглядаються можливості застосування технологій декарбонізації під час виробництва сталевих продукцій, можливості та проблеми, які постають перед металургією України для зменшення викидів CO₂; представлено Концепцію сталого розвитку чорної металургії України.

У світлі екологічних викликів та потреби у модернізації українських металургійних підприємств впровадження сучасних низьковуглецевих технологій стає критично важливим для української металургії. Однією з таких технологій є пряме відновлення заліза DRI, яке дозволяє значно знизити викиди CO₂ та підвищити енергоефективність виробництва.

Метою статті є аналіз можливостей впровадження технології прямого відновлення заліза в Україні для декарбонізації металургійної галузі та підвищення її конкурентоспроможності на світовому ринку.

2. Методи та матеріали

У дослідженні використано методи статистичного аналізу для оцінки динаміки виробництва чавуну та сталі, аналізу викидів парникових газів та порівняння технологій виробництва сталі. Проведено огляд наукової літератури, нормативних документів та звітів міжнародних організацій. Використано матеріальні баланси процесів DRI на основі даних наукових досліджень. Порівняння потреби в паливно-енергетичних ресурсах здійснено шляхом аналізу споживання сировини та енергії у різних технологічних процесах.

Багато років Україна входила у першу двадцятку серед світових виробників металургійної продукції, незважаючи на те, що обсяги виробництва української металургійної продукції демонстрували стійку тенденцію до зменшення. Після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну Україна в рейтингу світових виробників сталі опустилася з 14 місця у 2021 році на 25 місце у 2022 році та зайняла 24 місце у 2023 році [26]. Динаміка виробництва чавуну, сталі за 2010–2022 рр. наведена на рис. 1 (за даними [26–28]).

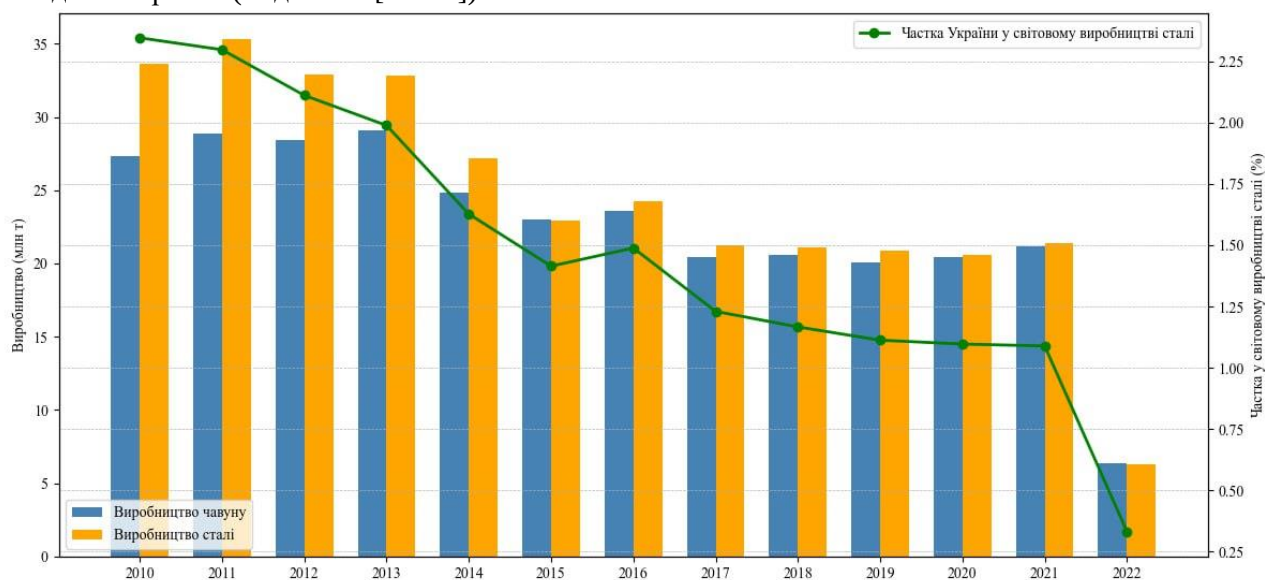


Рисунок 1. Показники виробництва основних видів металургійної продукції у 2010–2022 рр. [26–28]

Після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну виробництво металургійної продукції впало у 2022 році за чавуном на 69,8 %, сталлю на 70,7 %, прокатом на 73,0 %. У 2023 році виробництво чавуну зменшилось на 6,1 % відносно 2022 року, а виробництво сталі та прокату зросло на 0,5 % та 0,4 % відповідно. За перше півріччя 2024 року Україна виробила чавуну на 22,25 % більше проти аналогічного періоду 2023 року, а виробництво сталі зросло на 36,96 % [29].

Таким чином, у довоєнному 2021 році на Україну приходилося 1,09 % світового виробництва сталі [30], при цьому 76 % сирової сталі було вироблено з використанням кисневого конвертеру (Basic oxygen steelmaking – BOF), лише 5,8 % – в електродугових печах (electric arc furnace – EAF) і 18,2 % – із застосуванням мартенівського процесу (open-hearth furnace – OHF), який супроводжується найбільшою емісією CO₂ порівняно з киснево-конверторним та електродуговим.

У 2023 році на Україну приходилося лише 0,3 % світового виробництва сталі [31], при цьому 48,1 % сирової сталі було вироблено з використанням кисневих конверторів, 39,6 % – із застосуванням мартенівського процесу і 12,3 % було вироблено в електродугових печах.

Збільшення у 2023 році відсотка мартенівського виробництва в загальному виробництві сталі в Україні пов'язано з окупацією Маріуполя та знищення ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча».

Існуючі на сьогодні потужності. До 24 лютого 2022 року виробництво сталі в Україні забезпечували 8 підприємств: ПрАТ «Азовсталь» (Маріуполь), ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» (Маріуполь), ПАТ «Запоріжсталь» (Запоріжжя), ПрАТ «Дніпроспецсталь» (Запоріжжя), ТОВ «Інтерпайп Сталь» (Дніпро), ПАТ Дніпровський металургійний завод («DCH Steel») (Дніпро), ПрАТ «Каметсталь» (Кам'янське), ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (Кривий Ріг). З кінця лютого 2022 року ситуація в металургійній галузі, враховуючи розташування значної кількості підприємств та виробництв на сході країни, погіршилась, було втрачено металургійні підприємства Маріуполя, що призвело до втрати 40 % потужностей металургійної галузі України [32]. Таким чином, на 2024 рік в Україні залишилося 6 сталеливарних комбінатів (табл. 1).

Таблиця 1. Характеристика сталеливарних підприємств України (враховано потужність лише доменного та сталеплавильного переділів)

Назва підприємства	Переділи	Устаткування	Виробнича потужність, млн т
АТ «Запоріжсталь» (Запоріжжя) [33]	доменний	4 доменні печі	4,50
	сталеплавильний (мартенівський цех)	7 мартенівських печей, 1 двованный сталеплавильний агрегат [є модернізованим мартеном]	4,00
ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна (Запоріжжя) [34, 35]	сталеплавильний	Цех порошкової металургії: індукційна піч. Сталеплавильний цех №2: відкрита електродугова піч, аргонокисневий конвертер, установка «ківш-піч». Сталеплавильний цех №3: «ківш-піч», вакууматор. Сталеплавильний цех №5: піч вакуумно-дугової переплавки, піч електрошлакової переплавки	0,91
ТОВ «Інтерпайп Сталь» (Дніпро) [36]	сталеплавильний	Дугова сталеплавильна піч, установка «під-ківш», установка вакуумування сталі	1,60
Дніпровський металургійний завод («DCH Steel») (Дніпро)	доменний	2 доменні печі	1,795
	сталеплавильний	3 конвертори	1,23
ПрАТ «Каметсталь» (Кам'янське)	доменне	3 доменні печі	4,35
	сталеплавильний	2 конвертори, 2 установки «під-ківш»	3,85
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (Кривий Ріг)	доменний	6 доменних печей	11,45
	сталеплавильний	6 конверторів	6,50

За даними GMK.center, до 2014 р. загальні номінальні сталеплавильні потужності України становили 42 млн т, у 2021 р. – 27 млн т, зараз вони знизилися до 17,8 млн т (за підрахунками авторів – 18,09 млн т). Порівняно з довоєнним періодом завантаженість металургійних підприємств України у 2022 р. в середньому знизилась на 85 % [37]. У 2023 році завантаженість металургійних підприємств зросла до 37 % [38].

Динаміка та джерела викидів в металургії. Металургійний комплекс України отримав від Радянського Союзу значну кількість екологічних проблем, в тому числі застарілі карбоємні технології та енергоємне обладнання, робота якого супроводжується значними обсягами викидів ПГ. Україна входить до переліку країн з найбільшою кількістю викидів ПГ [39–40]. Статистика свідчить, що на металургійну промисловість припадає приблизно 7–9 % від загальних глобальних викидів CO₂. Для України цей показник значно вище, він досягає 26 %. Викиди у металургії знизились з 37,7 млн т CO₂ у 2014 р. до 30,5 у 2021 р. [41].

Утворення двоокису вуглецю (CO₂) виникає по всьому технологічному ланцюгу металургійних процесів як результат згорання органічних видів вуглецевмісного палива, а також окислення вуглецю та хімічного розпаду технологічної вуглецевмісної сировини та енергоносіїв, які надаються для здійснення виробничих процесів. До металургійних виробництв стосовно утворення CO₂ в значних обсягах належить доменний процес внаслідок використання значної частки органічного вуглецевмісного палива до загальної повної технологічної енергоємності чавуну та декарбонізації сировини в цьому процесі: коксівного вугілля, агломерату, окатишів залізної руди, вапняку та інших технологічних домішок. У технологічних процесах виробництва сталі (кисневоконвертерні, мартенівські та електросталеплавильні процеси) додатково до основних джерел викидів CO₂ належать процеси вигорання вуглецю чавуну (відновлення заліза), який у складі сировини визначає зміни процесів декарбонізації в цих технологічних переділах виробництва сталі [42].

3. Результати

Найпоширенішою виробничою технологією виробництва сталі в Україні є доменна піч BF – основна киснева піч BOF. Більшість викидів парникових газів пов'язані з процесом відновлення заліза в доменній печі (68 % від загального обсягу прямих викидів). До 2022 року модернізації доменних печей в Україні приділялась значна увага, тому потенціал зниження викидів ПГ у доменному процесі українських металургійних підприємств обмежений. Конвертерна технологія також не має значного потенціалу для зниження викидів. За розрахунками [43], застосування найкращих доступних технологій (Best Available Techniques BAT) дозволить знизити викиди ПГ на 25–30 %, що недостатньо для досягнення кліматичних цілей.

Спосіб виробництва сталі на основі доменної печі і основної кисневої печі використовує залізну руду, вугілля, вапняк і перероблену сталь. У середньому технологічний ланцюг «доменна піч – кисневий конвертер» за кордоном, згідно з даними [44], використовує 1370 кг залізної руди, 780 кг металургійного вугілля, 270 кг вапняку та 125 кг переробленої сталі для виробництва 1000 кг сирової сталі.

Одним з перспективних напрямків декарбонізації виробництва сталі вважається технологія прямого відновлення заліза. Технологія використання DRI в дозволяє знизити питомі викиди CO₂ з 1,9 (для ЄС) [45] або 2,3 (для України) [46] до близько 1 т CO₂/т сталі, а з застосуванням технології уловлювання та зберігання (Carbon capture and storage CCS) викиди CO₂ можуть бути зменшені до рівня 0,5 т CO₂/т сталі [43, 45]. Недоліком цієї технології є потреба в залізорудній сировині з високим вмістом заліза та низьким вмістом домішок, наявності великих енергетичних потужностей.

Пряме відновлення заліза включає виробництво твердого первинного заліза з високоякісних залізних руд (окатишів, агломерату або концентратів). Існують різні технології, в яких можуть використовуватися руди різної якості (для яких може знадобитися обкочування або спікання) і різні види палива та відновників (природний газ, різноманітне викопне паливо або біомаса, водень). Твердий продукт називається залізом прямого відновлення. DRI має пористу структуру, оскільки воно утворюється шляхом видалення кисню із залізної руди.

Процеси DRI бувають різних типів – на основі газу та на основі вугілля. Відповідно до [47, 48] пряме відновлення заліза для первинного виробництва сталі може працювати на природному газі замість використання коксу у доменній печі, що призводить до скорочення приблизно на 66 % викидів ПГ порівняно зі звичайним доменним процесом. В поточний час близько 80 % виробництва DRI-сталі

використовують природний газ, який перетворюється на суміш монооксиду вуглецю та водню під час відновлення залізної руди. Технологія вимагає дешевого і постійного доступу природного газу, тому великі виробники сталі, що використовують метод DRI, знаходяться на Близькому Сході та в Північній Америці. Цю технологію вважають проміжним кроком перед переходом на водень (через обмежену доступність ринків водню з огляду на високі витрати на його виробництво). Коли в якості відновного газу замість природного газу буде використовуватися водень (наприклад, вироблений за допомогою електроенергії з відновлюваних джерел), це призведе до значного зменшення викидів вуглецю від усього процесу виробництва сталі.

Для процесу DRI на основі вугілля основною сировиною є залізна руда, вугілля та доломіт. Доломіт в основному використовується як десульфуратор. Пряме відновлене залізо утворюється, коли сортовану залізну руду із залізрудних шахт піддають високій температурі (нижче температури плавлення руди, яка становить приблизно 1535°C) в обертівій печі з вугіллям і доломітом. Традиційний процес плавлення залізної руди через доменну піч відбувається при температурі близько 1539°C, тоді як у випадку губчастого заліза залізна руда відновлюється при температурі нижче 1200°C у твердому стані. Матеріальний баланс DRI на основі вугілля, за даними [49], наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Матеріальний баланс DRI на основі вугілля [49]

Задано в піч			Отримано з печі, кг		
найменування	вага, кг		найменування	вага, кг	
	за стехіометричним розрахунком	на основі даних підприємств		за стехіометричним розрахунком	на основі даних підприємств
Руда залізна	1,43	1,55	Губчате залізо	1,0	1,0
Вугілля	0,64	0,947	Димовий газ	6,2	4,41 (з балансу маси)
Повітря	5,20	3,28	Зола вугілля	0,064	0,43 (з балансу маси)
Доломіт	-	0,068			
Разом	7,27		Разом	7,264	
Витрати тепла на виробництво 1 кг губчатого заліза становлять 2058 ккал за стехіометричним розрахунком, 3889,84 ккал – за даними підприємств					

Згідно з [50] для виробництва 1000 кг DRI на типовій установці на основі вугілля потрібно 1500 кг залізної руди, 1000 кг вугілля, 25 кг доломіту. За розрахунками [49], при виробництві 1 кг DRI утворюється 1,18 кг CO₂. У процесі виробництва DRI на основі газу використовується вертикальна шахтна піч, матеріальні баланси з розрахунку на 1 тону DRI наведено в табл. 3 [51].

Таблиця 3. Матеріальні баланси процесів DRI на основі газу [51]

Показник	Розмірність	Синтез-газ-DRI	Природний газ-DRI	H ₂ -DRI
Задано в піч				
Біопаливо	т	0,654	-	-
Залізні окатиші	т	1,385	1,61	1,391
Моноетаноламін	кг	1,744	-	-
Вапняк	т	0,003	-	-
Олівін	т	0,004	-	-
Природний газ	т	-	0,245	0,0346
Електроенергія	кВт·год	697	135,5	3500
Отримано з печі				
DRI	т	1	1	1
DRI вихідний газ	т	0,26	-	-
CO ₂	т	1,09	0,642	0,040
Пил	кг	0,08	-	-
SO _x	кг	-	-	-
NO _x	кг	0,054	-	-

Отриманий DRI відправляється в електродугову піч, в якій він перетворюється в необроблену сталь. Сталевий брухт та/або флюси додають до електропечі для контролю складу. Матеріальні баланси процесів в електричних печах при використанні в якості сировини DRI приведено в табл. 4.

Таблиця 4. Матеріальні баланси процесів в електричних печах (EAF) [51]

Показник	Розмірність	Синтез-газ-DRI	Природний газ-DRI
<i>Задано в піч</i>			
DRI	т	1,01	1,01
Вапно	т	0,025	0,025
Металевий брухт (100 % DRI)	т	0,06	0,06
Графітові електроди	т	0,0043	0,0043
Вугілля	т	0,0094	0,0094
Вогнетривка футеровка	т	0,007	0,007
Кисень	т	13,5	13,5
Природний газ	м3	2,725	2,725
Електроенергія	кВт·год	758	758
<i>Отримано з печі</i>			
Сира сталь	т	1	1
ДСП шлак	т	0,15	0,15
CO ₂ (біогенний)	т	0,053	-
CO ₂ (загальний)	кг	0,072	0,125
Пил (PM2,5)		0,08	0,08
SO _x	кг	0,19	0,19
NO _x	кг	0,24	0,24
CO		0,008	0,008

4. Обговорення

За оцінками фахівців [4], ринок чавуну в ЄС до 2030–2035 років буде здебільшого заміщений DRI. Річне світове виробництво прямого відновленого заліза у 2022 році становило 127,36 млн т [52] з усіх вироблених 1885 млн т сталі [26]. Лідерами з виробництва заліза прямого відновлення є Середній Схід та Північна Африка (58,48 млн т DRI у 2022 р.), Азія-Океанія (44,33 млн т), Латинська Америка, включаючи Мексику та Карибський басейн (9,79 млн т). Серед країни Західної Європи лише Німеччина виробляє DRI (біля 0,5 млн т/р.). Оскільки технологія RDI вимагає дешевого і постійного доступу природного газу, великі виробники сталі, що використовують цей метод, знаходяться на Близькому Сході та в Північній Америці. Наявність сировинної бази для виробництва окатишів та концентрату з високим вмістом заліза, що є технологічною вимогою процесу виробництва заліза прямого відновлення, також впливає на розподілення потужностей DRI у світі. Тому DRI-виробництва також розміщуються в Бразилії та Австралії, де є в наявності руда з високим вмістом заліза.

В Україні є усі необхідні передумови для розвитку DRI: значні поклади залізної руди, потужності для її збагачення та отримання напівфабрикатів (концентрату, гранул, окатишів) необхідної якості, викопне паливо, а також потенційні можливості розбудови зеленої енергетики (наприклад, водневої). Фахівці [53] оцінюють потенційні потужності України у виробництві сировинних матеріалів для процесу прямого відновлення у 41,8–47,8 млн т на рік.

Технологія DRI впроваджена у виробництво вже понад 50 років. Існує декілька варіантів технології: з використанням вугілля, синтез-газу, природного газу, водню. На поточний час переважають два способи, так у 2022 році близько 70,1 % DRI було виготовлено на основі природного газу, а 29,9 % – на основі вугілля [52]. Пілотні установки прямого відновлення з воднем H₂ знаходяться у процесі впровадження. За показниками емісії CO₂ технології отримання сталі прямого відновлення заліза розташовані таким чином [51, 54]:

– DRI на основі вугілля + електродугова піч – 1,2 т CO₂/т сталі (-38 % порівняно з технологічним ланцюгом «доменна піч-кисневий конвертер»);

- DRI на основі синтез-газу + електродугова піч – 1,09 т CO₂/т сталі (-43 %);
- DRI на основі природного газу + електродугова піч – 0,642 т CO₂/т сталі (-66 %);
- DRI на основі водню + електродугова піч – 0,40 т CO₂/т сталі (-80 %, можливо зниження на 87–97 % при використанні зеленої енергії для отримання водню та для енергопостачання електропечей).

Для порівняння: питомі викиди CO₂ від технологічного ланцюга «доменна піч-кисневий конвертер» в Україні в середньому становлять близько 2,0–2,2 т CO₂/т сталі, а у світі – 1,9 т CO₂/т сталі. За прогнозами [55], навіть за умови постачання електроенергії з нульовими викидами, рівень викидів від згаданої технології може зменшитись лише на 7 % – до 2,06 т CO₂ /т сирій сталі.

Завдяки поширеності DRI вважається доступною технологією. Її перевагами є:

- значне скорочення викидів CO₂, що надає можливість декарбонізації виробництва сталі та підвищення конкурентоспроможності української металургійної продукції на європейському ринку завдяки відповідності вимогам CBAM;

- гнучкість процесу, який дозволяє обирати вид відновника залежно від наявності енергоресурсу та економічних обставин. Так, при скороченні запасів коксівного вугілля у світі та в Україні можливо використання некоксівного вугілля, природного газу, синтез-газу, отриманого шляхом каталітичної парової конверсії природного газу, або шляхом газифікації вугілля, або у перспективі використання водню;

- технологія дозволяє отримати продукт кращої якості, ніж чавун з доменної печі. Це відбувається завдяки виключенню коксу з технологічного процесу, оскільки разом з коксом в доменний процес вносяться фосфор та сірка. Глибоке збагачення руд також сприяє отриманню продукту вищої якості;

- порівняно з технологією вторинної виплавки сталі в електропечах з металобрухту технологія виробництва сталі шляхом прямого відновлення з подальшою виправкою сталі в електропечах позбавлена суттєвого недоліку: можлива виплавка високоякісних марок сталі;

- висока ефективність виробництва (94–96 % металізації) та однорідність продукту за хімічним складом.

До недоліків технології прямого відновлення заліза слід віднести:

- потреба у високоякісній збагаченій залізній руді (як правило, у вигляді окатишів) із змістом заліза не менше 62 %. Цей загальний недолік технології може надати переваги Україні, оскільки необхідний для прямого відновлення окатиш виробляється в країні в значних обсягах на гірничо-збагачувальних комбінатах групи Метінвест (вміст заліза 62,5–65,5 %), а також групою Ferrexpo (вміст заліза 62–67 %). На даний час обсяг виробництва окатишу суттєво перевищує внутрішнє споживання і значна його частина експортується;

- високе енергоспоживання. Губчасте залізо, виготовлене з застосуванням технології DRI, є твердішим, а це означає, що під час виробництва сталі потрібно більше початкової енергії. Потреба в енергії при виробництві однієї тонни сталі за допомогою технологічного ланцюга «пряме відновлення заліза-електропіч» потребує від 18 ГДж (виробництво на основі природного газу) до 30 ГДж (виробництво на основі газифікованого вугілля) енергії. При цьому технологічний ланцюг «доменна піч-кисневий конвертер» вимагає близько 15 ГДж енергії [56];

- технологічні складнощі. Наприклад, якщо велика кількість окатишів DRI завантажується до електропечі, існує висока ймовірність їх «злипання» та утворення нерозплавлених твердих кластерів, які затримують плавлення, тим самим знижуючи продуктивність.

DRI з використанням водню має переваги перед DRI на основі вугілля або газу за кількістю викидів CO₂, але поступається з точки зору економічності, безпеки та ефективності, а саме:

- необхідний розвиток водневої інфраструктури;
- вартість водню, який обходиться дорожче, ніж вуглецеве паливо. Розрахунки показують, що при ціні коксу 400 дол. США/т ціна водню не повинна перевищувати 1600 дол. США/т (співвідношення 1 до 4) [43], на початку 2024 р. ціни на водень становили близько 5 євро/кг [57]. За

прогнозами [58], до 2030 року очікується зниження ціни на H_2 на 50 % порівняно з поточним рівнем, що може допомогти досягти собівартості близько 2 доларів США/кг H_2 до 2030 року. Якщо витрати на виробництво зеленого водню зменшаться, то до 2030 року він може стати конкурентоспроможним джерелом відновника для виробництва сталі DRI-EAF;

- необхідне урахування особливостей технологічних процесів із застосуванням водню:
 - безпечне зберігання та поводження з DRI та воднем. Існує потреба в спеціальних заходах безпеки, спеціалізованих навчаннях працівників щодо безпечної та ефективної роботи;
 - крихкість отриманого продукту. Наявність підвищеної кількості водню в структурі сталі веде до її окрихчування та розтріскування, тому потрібні додаткові заходи щодо виведення водню з розплаву, зокрема вакуумування, яке зазвичай використовується лише для певних видів сталевих продукції особливо відповідального призначення;
 - відсутність вуглецю підвищує температуру плавлення заліза та пригнічує реакцію утворення CO в розплаві, що ускладнює ефективне перемішування розплаву за допомогою CO;
 - енергоефективність. Традиційне виробництво чавуну в доменній печі більш енергоефективне, ніж DRI з використанням водню, оскільки вугілля і природний газ краще відновлюють залізну руду, ніж водень;
 - виробництво зеленого водню потребує потужного енергозабезпечення. За підрахунками [58], для отримання 1 кг зеленого водню потрібно біля 56 кВт·год електроенергії. Для того щоб виробити 1 т сталі методом DRI з воднем, необхідно 60 кг водню. Таким чином, знадобиться близько 60 тис. т водню для зеленого заводу H_2 -DRI, який виплавляє 1 млн т сталі на рік. Річна потреба в електроенергії для виробництва цієї кількості H_2 становить приблизно 3377 ГВт·год/рік, виходячи з того, що потрібно 56 кВт·год/кг H_2 , виробленого з ККД електролізера 70 %. Якщо електролізер працює на електроенергії з відновлюваних джерел, то його робота може бути переривчаста, потрібні додаткові рішення щодо накопичення та зберігання водню.

Загальним недоліком усіх варіантів DRI є високі капітальні витрати на одиницю продукції: витрати на сучасний комплекс «доменна піч-кисневий конвертер» знаходяться в межах 260–440 дол. США/т сталі [48]. Прогнозні капітальні витрати технології DRI на природному газі згідно з [48] становлять 355–633 євро/т сталі; при використанні H_2 та електродугових печей – 444–745 євро/т сталі.

5. Висновки

Металургійна промисловість, що традиційно використовує енергоємні технології на основі доменних печей, має високий вуглецевий слід, через що стає вразливою до економічних і кліматичних обмежень, зокрема до впровадження механізму CBAM у ЄС. Зниження залежності від вуглецевоємних процесів та забезпечення довгострокової конкурентоспроможності на європейському ринку потребує впровадження низьковуглецевих технологій, до яких належить технологія прямого відновлення заліза. У світі майже 7 % сталі виробляється з DRI, з яких близько 79 % – на основі природного газу, близько 21 % – на основі вугілля. Пілотні установки прямого відновлення з воднем H_2 знаходяться у процесі впровадження.

Питомі викиди CO_2 від традиційного в Україні технологічного ланцюга «доменна піч-кисневий конвертер» в середньому становлять близько 2,0–2,2 т CO_2 /т сталі. Навіть за умови постачання електроенергії з нульовими викидами, рівень викидів від згаданої технології може зменшитись лише на 7 % – до 2,06 т CO_2 /т сирової сталі. За розрахунками фахівців, застосування найкращих доступних технологій дозволить знизити викиди парникових газів на 25–30 %, що недостатньо для досягнення кліматичних цілей.

Технології прямого відновлення заліза дозволяють значно скоротити викиди CO_2 у виробництві сталі порівняно з технологічним ланцюгом «доменна піч-кисневий конвертер» – від 38 % при використанні DRI на основі вугілля+електродугова піч до 80 % – DRI на основі водню+електродугова

піч і до 97 % при використанні зеленої енергії для отримання водню та для енергопостачання електродувок.

В Україні є всі необхідні передумови для розвитку DRI: значні поклади залізної руди, потужності для її збагачення та отримання напівфабрикатів необхідної якості, викопне паливо, а також потенційні можливості розбудови зеленої енергетики (наприклад, водневої). Фахівці оцінюють потенційні потужності України у виробництві сировинних матеріалів для процесу прямого відновлення у 42–48 млн т на рік.

Основними перевагами впровадження DRI в Україні є значне зниження викидів CO₂, можливість підвищити конкурентоспроможність української металургійної продукції на світовому ринку та відповідати глобальним тенденціям переходу до низьковуглецевої економіки, наявність необхідної сировинної бази та потенціалу для розвитку відновлюваної енергетики.

До основних бар'єрів впровадження DRI в Україні належать високі капітальні витрати на впровадження і обслуговування установок, необхідність розвитку інфраструктури для стабільного постачання і зберігання водню. Крім того, технологія DRI є енергоємною і потребує значних обсягів енергії, особливо при використанні водню, що піднімає питання щодо стабільності її постачання, зокрема з відновлюваних джерел.

Для успішного впровадження технології DRI в Україні необхідна комплексна державна підтримка, що включає фінансування інфраструктурних проєктів, розвиток водневої економіки, стимулювання наукових досліджень і підготовки кваліфікованих кадрів. Важливим кроком є створення сприятливих умов для залучення інвесторів, зокрема шляхом податкових пільг та економічних стимулів.

Внесок авторів. Концептуалізація, аналіз та систематизація інформації, матеріали, результати, обговорення, висновки – О. Матухно; концептуалізація, методологія, вступ, літературний огляд, висновки – В. Станиціна; концептуалізація, літературний огляд, оформлення графічних матеріалів, анотація, висновки – В. Артемчук.

Фінансування роботи. Дослідження виконано в рамках бюджетної тематики НАН України, зокрема наукової роботи з № державної реєстрації 0122U000176.

Посилання

1. Iron and Steel Technology Roadmap. International Energy Agency. 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення: 01.10.2024).
2. Другий національно визначений внесок України до Паризької угоди. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. 2021. URL: <https://mepr.gov.ua/news/37014.html> (дата звернення: 01.10.2024).
3. Carbon Border Adjustment Mechanism. European Commission. 2021. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3661 (дата звернення: 01.10.2024).
4. CBAM impact on iron and steel exports of Ukraine. GMK.center. 22 p. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2023/09/2023CBAM_Impact-Eng_full.pdf (дата звернення: 01.10.2024).
5. Lee H., McJeon H., Yu S., Liu Y., Kim H., Eom J. Decarbonization pathways for Korea's industrial sector towards its 2050 carbon neutrality goal. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 476. 143749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143749>
6. Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichykh A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 466. 142675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142675>
7. Keramidis K., Mima S., Bidaud A. Opportunities and roadblocks in the decarbonisation of the global steel sector: A demand and production modelling approach. *Energy and Climate Change*. 2024. Vol. 5. 100121. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100121>
8. Kiessling S., Gohari Darabkhani H., Soliman A.-H. Greater Energy Independence with Sustainable Steel Production. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Iss. 3. 1174. <https://doi.org/10.3390/su16031174>
9. de Villafranca Casas M. J., Smit S., Nilsson A., Kuramochi T. Climate targets by major steel companies: An assessment of collective ambition and planned emission reduction measures. *Energy and Climate Change*. 2024. Vol. 5. 100120. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100120>
10. Renforth P., Campbell J., Foteinis S., Cosgun E., Young J., Strunge T., Riley A. L., Mayes W. M., van der Spek M. W. Carbon dioxide removal could result in the use of lower-grade iron ore in a decarbonized net-negative emission steel industry. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 468. 142987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142987>

11. Lundmark R., Wetterlund E., Olofsson E. On the green transformation of the iron and steel industry: Market and competition aspects of hydrogen and biomass options. *Biomass and Bioenergy*. 2024. Vol. 182. 107100. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107100>
12. Scaccabarozzi R., Artini C., Campanari S., Spinelli M. Techno-Economic and CO₂ Emissions Analysis of the Molten Carbonate Fuel Cell Integration in a DRI Production Plant for the Decarbonization of the Steel Industry. *Applied Energy*. 2024. Vol. 376. 124264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124264>
13. Liu X., Liu Y., Bai C., Peng R., Chi Y.. Pathways for decarbonizing China's iron and steel industry using cost-effective mitigation technologies: An integrated analysis with top-down and bottom-up models. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 237. 121506. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121506>
14. Boldrini A., Koolen D., Crijns-Graus W., van den Broek M. The impact of decarbonising the iron and steel industry on European power and hydrogen systems. *Applied Energy*. 2024. Vol. 361. 122902. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122902>
15. Babak V., Zaporozhets A., Kovtun S., Kuts Yu., Fryz M., Scherbak L. (2024). The Concept of Research of the Electric Power Facilities Functioning. In V. Babak, A. Zaporozhets (Eds.). *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_1
16. Нечаєва Т.П. Цільові показники низьковуглецевого розвитку електроенергетики України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4. С. 103—111. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290937>
17. Derii V., Nechaieva T., Leshchenko I. Assessment of the effect of structural changes in ukraine's district heating on the greenhouse gas emissions. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. Iss. 4. P. 57—65. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.057>
18. Stanytsina V., Artemchuk V., Bogoslavskaya O., Ridei N., Zinovieva I. The influence of environmental tax rates on the Levelized cost of heat on the example of organic and biofuels boilers in Ukraine. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. 09012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009012>
19. Лещенко І.Ч.. Оцінка зниження викидів парникових газів вугільним сектором України для виконання міжнародних кліматичних угод. *Проблеми загальної енергетики*. 2022. Вип. 1-2(68-69). С. 139—149. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.139>
20. Макаров В.М., Каплін М.І., Перов М.О. Врахування екологічних обмежень при моделюванні розвитку вугільної промисловості. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 4(59). С. 36—44. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.036>
21. Leshchenko I. Estimates of methane emissions in the oil-and-gas industry of ukraine: problems and world experience in their solution. *Science and Innovation*. 2021. Vol. 17. No. 3. P. 37—48. <https://doi.org/10.15407/scine17.03.037>
22. Leshchenko I., Shulzhenko S., Kaplin M., Maistrenko N., Shcherbyna E. Assessment of the Greenhouse Gases Reduction by the Oil and Gas Sector of Ukraine to Meet International Climate Agreements. In A. Zaporozhets, O. Popov (Eds.). *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_13
23. Бабаченко О.І., Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Є. Перспективи декарбонізації металургійних технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 4—33. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2021-35-4-33>
24. Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Є., Пригунова А.Г., Нарівський А.В. Концепція сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 4. С. 8—19. URL: <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/37> (дата звернення: 01.10.2024).
25. Yokoi R., Watari T., Motoshita M. Future greenhouse gas emissions from metal production: gaps and opportunities towards climate goals. *Energy & Environmental Science*. 2022. Iss. 1. P. 146—157. <https://doi.org/10.1039/D1EE02165F>
26. World Steel in Figures 2010 to 2024. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/> (дата звернення: 01.10.2024).
27. Укрметалургпром. URL: <https://www.ukrmetprom.org/> (дата звернення: 01.10.2024).
28. GMK Center. URL: <https://gmk.center/> (дата звернення: 01.10.2024).
29. Україна піднялася у світових рейтингах виробників чавуну та сталі. 23 липня 2024. URL: <https://borgexpert.com/news/ukraina-pidnialasia-u-svitovykh-rejtynhakh-vyrobnykiv-chavunu-ta-stali> (дата звернення: 01.10.2024).
30. World Steel in Figures 2023. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2023/> (дата звернення: 01.10.2024).
31. World Steel in Figures 2024. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> (дата звернення: 01.10.2024).
32. Агапова В. Що лишилось від української металургії. *Економічна правда*. 29 березня 2023. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/03/29/698540/> (дата звернення: 01.10.2024).
33. Структура виробництва. Запоріжсталь. URL: <https://zaporizhstal.com/pidpriyemstvo/#struktura-proizvodstva> (дата звернення: 01.10.2024).

34. Дніпроспецсталь. GMK.Center. URL: <https://gmk.center.ua/manufacture/dniprospecstal/> (дата звернення: 01.10.2024).
35. Схема виробництва. Дніпроспецсталь. URL: <http://www.dss-ua.com/ukr/company/production/schema/> (дата звернення: 01.10.2024).
36. Інтерпайп сталь. URL: <https://interpipe.biz/production/one/6> (дата звернення: 01.10.2024).
37. Двудіт З.П., Андрусак К.А. Виклики металургійної галузі України в умовах сьогодення. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2023. № 1(9). С. 261—268. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/sep/31284/menedzhment-265-272.pdf> (дата звернення: 01.10.2024).
38. Каленков О. Виплавка сталі в Україні може зрости на 16% за підсумками 2024 року. 21 серпня 2024. URL: <https://gmk.center.ua/opinion/vyplavka-stali-v-ukraini-mozhe-zrosty-na-16-za-pidsumkamy-2024-roku/> (дата звернення: 01.10.2024).
39. Kuramochi T., Nascimento L., Moisio M., den Elzen M., Forsell N., van Soest H., Tanguy P., Gonzales S., Hans F., Jeffery M. L., Fekete H., Schiefer T., de Villafranca Casas M. J., De Vivero-Serrano G., Dafnomilis I., Roelfsema M., Höhne N. Greenhouse gas emission scenarios in nine key non-G20 countries: An assessment of progress toward 2030 climate targets. *Environmental Science & Policy*. 2021. Vol. 123. P. 67—81. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.015>
40. Eurostat. All Data. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all_themes?lang=en&display=list&sort=category (дата звернення: 01.10.2024).
41. Ukraine. 2023 National Inventory Report (NIR). URL: <https://unfccc.int/documents/628276> (дата звернення: 01.10.2024).
42. Куц Г.О., Тесленко О.І. Доповнення методичних положень визначення повної енергоємності продукції промислових виробництв. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33(72). № 5. С. 244—250. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/36>
43. Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Е., Петренко В.О. Екологічні перспективи чорної металургії України. *Литво. Металургія*. Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції (10–12 жовтня 2023 р., м. Харків – м. Київ). Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Харків, НТУ «ХПІ». С. 417—423. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>
44. Steel and raw materials. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023.pdf> (дата звернення: 01.10.2024).
45. Decarbonization of the steel industry: a challenge for the coming decades. GMK.center, 2021. 48 p. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/07/Decarbonisation-eng_2021.pdf (дата звернення: 01.10.2024).
46. Оцінка конкурентоспроможності виробників сталі України за показником викидів CO₂. GMK.center. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2022/08/Ud_vybrosy.pdf (дата звернення: 01.10.2024).
47. Koolen D., Vidovic D. Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners. EUR 31112 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. ISBN 978-92-76-53417-4. <https://doi.org/10.2760/170198>
48. Guevara Opinska L., Mahmoud M., Bene C., Rademaekers K. Moving towards Zero-Emission Steel, Technologies Available, Prospects, Timeline and Costs. Committee on Industry, Research and Energy (ITRE). Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. European Parliament. Luxembourg, 2021. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695484/IPOL_STU\(2021\)695484_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695484/IPOL_STU(2021)695484_EN.pdf) (дата звернення: 01.10.2024).
49. Choudhury A. Energy Audit Methodology of Sponge Iron Manufacturing Units Using DRI Process. *Open Journal of Energy Efficiency*. 2014. Vol. 3. P. 41—49. <http://doi.org/10.4236/ojee.2014.33005>
50. Nanda P. K., Sahai A. K., Das S. K. Understanding the co-relationships of variables and improving product quality and productivity of DRI in rotary kiln. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Part 3. P. 1538—1541. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.271>
51. Nurdiawati A., Zaini I. N., Wei W., Gyllenram R., Yang W., Samuelsson P. Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 393. 136262. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136262>
52. 2022 World direct reduction statistics. Midrex. 2023. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf> (дата звернення: 01.10.2024).
53. Opportunities for rebuilding iron&steel industry of Ukraine. 2024. 18 p. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2024/04/2024_Ukr-GMK_Rebuild.pdf (дата звернення: 01.10.2024).
54. Ling J., Yang H., Tian G., Cheng J., Wang X., Yu X. Direct reduction of iron to facilitate net zero emissions in the steel industry: A review of research progress at different scales. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 441. 140933. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140933>
55. Lopez G., Galimova T., Fasihi M., Bogdanov D., Breyer C. Towards defossilised steel: Supply chain options for a green European steel industry. *Energy*. 2023. Vol. 273. 127236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127236>

56. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking. 2020. 190 p. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf (дата звернення: 01.10.2024).
57. Декарбонізація сталеві галузі залишиться провідною темою у 2024 році. Мінпром. 5 січня 2024 року. URL: <https://minprom.ua/news/306468.html> (дата звернення: 01.10.2024).
58. Hasanbeigi A., Springer C., Irish H. Green H₂-DRI Steelmaking: 15 Challenges and Solutions. Global Efficiency Intelligence. 2024, March. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/green-h2-dri-steelmaking-15-challenges-and-solutions> (дата звернення: 01.10.2024).

References

1. Iron and Steel Technology Roadmap. (2020). International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (Last accessed: 01.10.2024).
2. Ukraine's Second Nationally Determined Contribution to the Paris Agreement. (2021). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. URL: <https://mepr.gov.ua/news/37014.html> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
3. Carbon Border Adjustment Mechanism. (2021). European Commission. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3661 (Last accessed: 01.10.2024).
4. CBAM impact on iron and steel exports of Ukraine. GMK.center (22 p.). URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2023/09/2023CBAM_Impact-Eng_full.pdf (Last accessed: 01.10.2024).
5. Lee, H., McJeon, H., Yu, S., Liu, Y., Kim, H., & Eom, J. (2024). Decarbonization pathways for Korea's industrial sector towards its 2050 carbon neutrality goal. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143749>
6. Devlin, A., Mykhnenko, V., Zagoruichyk, A., Salmon, N., & Soldak, M. (2024). Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production*, 466, 142675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142675>
7. Keramidis, K., Mima, S., & Bidaud, A. (2024). Opportunities and roadblocks in the decarbonisation of the global steel sector: A demand and production modelling approach. *Energy and Climate Change*, 5, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100121>
8. Kiessling, S., Gohari Darabkhani, H., & Soliman, A.-H. (2024). Greater Energy Independence with Sustainable Steel Production. *Sustainability*, 16(3), 1174. <https://doi.org/10.3390/su16031174>
9. de Villafranca Casas, M. J., Smit, S., Nilsson, A., & Kuramochi, T. (2024). Climate targets by major steel companies: An assessment of collective ambition and planned emission reduction measures. *Energy and Climate Change*, 5, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100120>
10. Renforth, P., Campbell, J., Foteinis, S., Cosgun, E., Young, J., Strunge, T., Riley, A. L., Mayes, W. M., & van der Spek, M. W. (2024). Carbon dioxide removal could result in the use of lower-grade iron ore in a decarbonized net-negative emission steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 468, 142987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142987>
11. Lundmark, R., Wetterlund, E., & Olofsson, E. (2024). On the green transformation of the iron and steel industry: Market and competition aspects of hydrogen and biomass options. *Biomass and Bioenergy*, 182, 107100. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107100>
12. Scaccabarozzi, R., Artini, C., Campanari, S., & Spinelli, M. (2024). Techno-Economic and CO₂ Emissions Analysis of the Molten Carbonate Fuel Cell Integration in a DRI Production Plant for the Decarbonization of the Steel Industry. *Applied Energy*, 376, 124264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124264>
13. Liu, X., Liu, Y., Bai, C., Peng, R., & Chi, Y. (2024). Pathways for decarbonizing China's iron and steel industry using cost-effective mitigation technologies: An integrated analysis with top-down and bottom-up models. *Renewable Energy*, 237, 121506. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121506>
14. Boldrini, A., Koolen, D., Crijns-Graus, W., & van den Broek, M. (2024). The impact of decarbonising the iron and steel industry on European power and hydrogen systems. *Applied Energy*, 361, 122902. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122902>
15. Babak, V., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Kuts, Yu., Fryz, M., & Scherbak, L. (2024). The Concept of Research of the Electric Power Facilities Functioning. In V. Babak, A. Zaporozhets (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_1
16. Nechaieva, T.P. (2023). Target indicators of Ukraine's low-carbon power sector development. *POWER ENGINEERING: Economics Technique Ecology*, 4, 103–111 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290937>
17. Derii, V., Nechaieva, T., & Leshchenko, I. (2023). Assessment of the effect of structural changes in ukraine's district heating on the greenhouse gas emissions. *Science and Innovation*, 19(4), 57–65. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.057>

18. Stanytsina, V., Artemchuk, V., Bogoslavskaya, O., Ridei, N., & Zinovieva, I. (2021). The influence of environmental tax rates on the Levelized cost of heat on the example of organic and biofuels boilers in Ukraine. *E3S Web of Conferences*, 280, 09012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009012>
19. Leshchenko, I.Ch. (2022). Assessment of the greenhouse gases emissions reduction by the coal sector of Ukraine to meet international climate agreements. *The Problems of General Energy*, 1-2(68-69), 139–149 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.139>
20. Makarov, V.M., Kaplin, M.I., & Perov, M.O. (2019). Consideration of environmental constraints in modeling the development of coal industry. *The Problems of General Energy*, 4(59), 36–44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.036>
21. Leshchenko, I. (2021). Estimates of methane emissions in the oil-and-gas industry of Ukraine: problems and world experience in their solution. *Science and Innovation*, 17(3), 37–48. <https://doi.org/10.15407/scine17.03.037>
22. Leshchenko, I., Shulzhenko, S., Kaplin, M., Maistrenko, N., & Shcherbina, E. (2023). Assessment of the Greenhouse Gases Reduction by the Oil and Gas Sector of Ukraine to Meet International Climate Agreements. In A. Zaporozhets, O. Popov (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_13
23. Babachenko, O.I., Tuboltsev, L.G., & Merkulov, O.Ye. (2021). Prospects of decarbonization of metallurgical technologies. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 35, 4–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2021-35-4-33>
24. Tuboltsev, L.G., Merkulov, O.Ye., Prygunova, A.G., & Narivsky, A.V. (2022). Concept of sustainable development of black metallurgy of Ukraine in modern conditions. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(4), 8–19 URL: <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/37> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
25. Yokoi, R., Watari, T., & Motoshita, M. (2022). Future greenhouse gas emissions from metal production: gaps and opportunities towards climate goals. *Energy & Environmental Science*, 1, 146–157. <https://doi.org/10.1039/D1EE02165F>
26. World Steel in Figures 2010 to 2024. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/> (Last accessed: 01.10.2024).
27. Ukrmetallurgprom. URL: <https://www.ukrmetprom.org/> (Last accessed: 01.10. 2024) [in Ukrainian].
28. GMK Center. URL: <https://gmk.center/> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
29. Ukraine rises in global pig iron and steel production rankings. (2024, July 23). URL: <https://borgexpert.com/news/ukraina-pidnialasia-u-svitovykh-rejtynhakh-vyrobnykiv-chavunu-ta-stali> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
30. World Steel in Figures 2023. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2023/> (Last accessed: 01.10.2024).
31. World Steel in Figures 2024. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> (Last accessed: 01.10.2024).
32. Agapova, V. (2023, March 29). What remains of Ukrainian metallurgy. *Economic Truth*. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/03/29/698540/> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
33. Production Structure. Zaporizhstal. URL: <https://zaporizhstal.com/pidpriemstvo/#struktura-proizvodstva> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
34. Dniprospecstal. GMK.Center. URL: <https://gmk.center/ua/manufacture/dniprospecstal/> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
35. Production Scheme. Dniprospecstal. URL: <http://www.dss-ua.com/ukr/company/production/schema/> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
36. Interpipe Steel. URL: <https://interpipe.biz/production/one/6> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
37. Dvulit, Z.P., & Andrusyak, K.A. (2023). Challenges of the metallurgical industry of Ukraine in the current conditions. *Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Problems of Development*, 1(9), 261–268. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/sep/31284/menedzhment-265-272.pdf> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
38. Kalenkov, O. (2024, August 21). Steel production in Ukraine may increase by 16 % by the end of 2024. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/vyplavka-stali-v-ukraini-mozhe-zrosty-na-16-za-pidsumkamy-2024-roku/> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
39. Kuramochi, T., Nascimento, L., Moisis, M., den Elzen, M., Forsell N., van Soest, H., Tanguy, P., Gonzales, S., Hans, F., Jeffery, M. L., Fekete, H., Schiefer, T., de Villafranca Casas, M. J., De Vivero-Serrano, G., Dafnomilis, I., Roelfsema, M., & Höhne, N. (2021). Greenhouse gas emission scenarios in nine key non-G20 countries: An assessment of progress toward 2030 climate targets. *Environmental Science & Policy*, 123, 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.015>
40. Eurostat. All Data. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all_themes?lang=en&display=list&sort=category (Last accessed: 01.10.2024).
41. Ukraine. 2023 National Inventory Report (NIR). URL: <https://unfccc.int/documents/628276> (Last accessed: 01.10.2024).

42. Kuts, G.O., & Teslenko, O.I. (2022). Addition of methodological provisions for determining the total energy intensity of products of industrial production. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 33(72), 5, 244–250 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/36>
43. Tuboltsev, L.G., Merkulov, O.E., & Petrenko, V.O. (2023). Environmental perspectives of black metallurgy in Ukraine. *Foundry and Metallurgy*. Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference (2023, October 10–12, Kharkiv-Kyiv), under the general editorship of D.Sc., Prof. O.I. Ponomarenko. Kharkiv, NTU "KhPI", 417–423 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>
44. Steel and raw materials. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023.pdf> (Last accessed: 01.10.2024).
45. Decarbonization of the steel industry: a challenge for the coming decades. (2021). GMK.center (48 p.). URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/07/Decarbonisation-eng_2021.pdf (Last accessed: 01.10.2024).
46. Assessment of the competitiveness of Ukrainian steel producers in terms of CO₂ emissions. (2022). GMK.center. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2022/08/Ud_vybrosy.pdf (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
47. Koolen, D., & Vidovic, D. (2022). Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-53417-4. <https://doi.org/10.2760/170198>
48. Guevara Opinska, L., Mahmoud, M., Bene, C., & Rademaekers, K. (2021). Moving towards Zero-Emission Steel, Technologies Available, Prospects, Timeline and Costs. Committee on Industry, Research and Energy (ITRE). Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. European Parliament. Luxembourg. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695484/IPOL_STU\(2021\)695484_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695484/IPOL_STU(2021)695484_EN.pdf) (Last accessed: 01.10.2024).
49. Choudhury, A. (2014). Energy Audit Methodology of Sponge Iron Manufacturing Units Using DRI Process. *Open Journal of Energy Efficiency*, 3, 41–49. <http://doi.org/10.4236/ojee.2014.33005>
50. Nanda, P. K., Sahai, A. K., & Das, S. K. (2022). Understanding the co-relationships of variables and improving product quality and productivity of DRI in rotary kiln. *Materials Today: Proceedings*, 56(3), 1538–1541. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.271>
51. Nurdiawati, A., Zaini, I. N., Wei, W., Gyllenram, R., Yang, W., & Samuelsson, P. (2023). Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136262. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136262>
52. 2022 World direct reduction statistics. (2023). Midrex. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf> (Last accessed: 01.10.2024).
53. Opportunities for rebuilding iron&steel industry of Ukraine. (2024). (18 p.). URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2024/04/2024_Ukr-GMK_Rebuild.pdf (Last accessed: 01.10.2024).
54. Ling, J., Yang, H., Tian, G., Cheng, J., Wang, X., & Yu, X. (2024). Direct reduction of iron to facilitate net zero emissions in the steel industry: A review of research progress at different scales. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140933. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140933>
55. Lopez, G., Galimova, T., Fasihi, M., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2023). Towards defossilised steel: Supply chain options for a green European steel industry. *Energy*, 273, 127236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127236>
56. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking. (2020). (190 p.). URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf (Last accessed: 01.10.2024).
57. Decarbonization of the steel industry will remain a leading topic in 2024. (2024, January 5). Minprom. URL: <https://minprom.ua/news/306468.html> (Last accessed: 01.10.2024) [in Ukrainian].
58. Hasanbeigi, A., Springer, C., & Irish, H. (2024, March). Green H₂-DRI Steelmaking: 15 Challenges and Solutions. Global Efficiency Intelligence. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/green-h2-dri-steelmaking-15-challenges-and-solutions> (Last accessed: 01.10.2024).

DIRECT IRON REDUCTION TECHNOLOGY PROSPECTS FOR METALLURGICAL DECARBONIZATION

Olena Matuhno^{1,2}, PhD (Engin.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-5536-6745>

Valentyna Stanytsina^{1,3*}, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1005-6185>

Volodymyr Artemchuk^{4,5}, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0001-8819-4564>

¹General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine;

²Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine;

³State Institution “Center for evaluation of activity of research institutions and scientific support of regional development of Ukraine of NAS of Ukraine”, 54, Volodymyrska St., Kyiv, 03601, Ukraine;

⁴G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine, 15, General Naumov St., Kyiv, 03164, Ukraine;

⁵Center for information-analytical and technical support of nuclear power facilities monitoring of NAS of Ukraine, 34a, Academician Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

*Corresponding author: st_v_v@hotmail.com

Abstract. *The metallurgical manufacturing is one of the most carbon-intensive sectors globally, accounting for over 7% of greenhouse gas emissions. The Ukrainian metallurgical industry, a strategic source of foreign revenue and an essential element of the country's economic stability, currently faces significant challenges due to the need to adapt to climate obligations outlined in the Paris Agreement, as well as the introduction of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) in the European Union. This article provides a comprehensive analysis of the prospects for implementing direct reduced iron (DRI) technology in Ukrainian metallurgical enterprises as an effective pathway for steel decarbonization. A comparison is made between traditional methods grounded in blast furnaces and oxygen converters and the DRI technology with natural gas, coal, syngas, and hydrogen. The main advantages of implementing DRI are identified, along with the infrastructural, technological, and financial barriers that is necessary to be overcome for effective decarbonization of Ukraine's metallurgical sector.*

Keywords: decarbonization, metallurgy, steel, direct recovery of iron, hydrogen, greenhouse gases, CBAM, Ukraine.

Надійшла до редколегії: 29.10.2024