

# ПРОМИСЛОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЗАДОМЕННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА З РУДНОЇ СИРОВИНИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

В.О. Шаповалов<sup>1</sup>, В.Г. Могилатенко<sup>1,2</sup>, Д.М. Жиров<sup>1</sup>, В.Р. Бурнашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [shapovalov@paton.kiev.ua](mailto:shapovalov@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: [vmogilatenko@gmail.com](mailto:vmogilatenko@gmail.com)

Суттєвого зниження викидів вуглекислого газу в металургії можна досягти використанням для відновлення заліза суміші монооксиду вуглецю та водню. Розглянуто промислові технології позадоменного відновлення заліза з рудної сировини. Проаналізовано реакції у відновлювальних процесах. Показано, що за температур понад 800 °С водень є більш ефективним відновником, ніж монооксид вуглецю. Продемонстровано шляхи підвищення енергетичної ефективності існуючих технологій. Показано, що на сьогодні основною технологією відновлення заліза з руди є відновлення у шахтних печах з використанням суміші вуглекислого газу і водню. Наведено узагальнену схему виробництва прямого відновлення заліза. Показано, що при виробництві заліза прямого відновлення завдяки використанню водню можна скоротити вдвічі викиди вуглекислого газу у порівнянні з використанням природного газу, за умови виробництва електроенергії з відновлювальних джерел або на атомних електростанціях. Зроблено висновок, що перспективним шляхом вилучення викидів вуглецю при відновленні заліза з руди чи котунів є використання плазмових технологій. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 1.

*Ключові слова:* пряме відновлення заліза, водень, шахтна піч, викиди вуглекислого газу

**Вступ.** Виробництво чавуну і сталі спричиняє близько 7 % глобальних викидів вуглекислого газу через використання вуглецю для відновлення заліза з руди [1]. На теперішній час основною схемою одержання сталі із залізорудної сировини є відновлення заліза у доменних печах з одержанням чавуну і переробка чавуну в сталь у кисневих конверторах. Істотного скорочення викидів вуглекислого газу в цих процесах неможливо досягти через їх технологічні схеми. Адже у доменній печі шари залізорудних матеріалів чергуються з шарами коксу, основним елементом якого є вуглець. Шари коксу забезпечують газопроникність стовпа шихти, підтримують відновлювальний потенціал газової фази у верхній частині печі, вуглець коксу є безпосереднім відновником у нижній частині печі та основним джерелом енергії для нагріву шихти і протікання хімічних реакцій. У кисневих конверторах вуглець чавуну окиснюється поки його концентрація не знижується до необхідної у сталі. При цьому вигорання вуглецю є основним джерелом енергії для процесу.

Істотного зниження викидів вуглекислого газу в чорній металургії можна досягнути лише при використанні відновника, що не містить вуглецю. З погляду на доступність, вартість, екологічність і відновлювальні властивості найбільш доцільним для відновлення заліза є використання водню.

Існує багато способів виробництва водню [2]. Бурий або чорний водень одержують при газифікації вугілля з використанням водяної пари, сірий — при паровому риформінгу природного газу (якщо викиди вуглецю при цьому вловлюють і зберігають, то такий водень називають блакитним), бірюзовий — при піролізі природного газу з одержанням твердого вуглецю. Але у перелічених способах існує необхідність видобування паливних корисних копалин і в результаті крім водню утворюється вуглець або його оксиди, які треба утилізувати. Принципово іншим напрямком одержання водню є електроліз води. При цьому, якщо для електролізу використовується атомна енергія, водень називають рожевим, якщо електроенергія різного походження — жовтим, якщо використовується електроенергія тільки з відновлювальних джерел — зеленим. Зелений водень є найбільш екологічним, але при цьому й найбільш коштовним. Тому важливо забезпечити мінімальні втрати водню у металургійному процесі. Заміна вуглецю воднем у якості відновника дозволить значно скоротити викиди вуглекислого газу у металургії, але очевидно, що при цьому має застосовуватися інша технологічна схема виробництва сталі з залізорудної сировини. Також важливо мінімізувати витрати енергії з погляду на екологічні і економічні фактори.

**Стан проблеми.** Залізо, одержане за технологіями позадоменного відновлення, назива-

В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, В.Г. Могилатенко — <https://orcid.org/0000-0002-6550-2058>,

Д.М. Жиров — <https://orcid.org/0000-0002-9435-8075>, В.Р. Бурнашев — <https://orcid.org/0000-0001-6807-3810>

ють залізом прямого відновлення (DRI — Direct Reduction Iron). Його частка в об'ємі світового виробництва чавуну і DRI щороку зростає. Так у 2021 р. вона складала 7,2 %, у 2022 р. — 7,9 %, а у 2023 р. — 8,5 % [3]. У 2023 р. об'єми виробництва DRI склали 136 мільйонів тон [4]. Із них близько 30 % вироблено за технологіями, що базуються на використанні вугілля. Найчастіше це процеси у трубчастих печах, що обертаються (наприклад процес SL/RN), або у печах з подом, що обертається. Більшість цих установок розташовані в Індії або Південній Африці, що зумовлено розвинутою вугільною промисловістю в цих країнах. Але використання вуглецю з вугілля у якості відновника унеможлиблює суттєве скорочення викидів вуглекислого газу у порівнянні з доменним процесом.

Найбільш поширеною групою промислових технологій виробництва DRI є технології відновлення у шахтних печах: MIDREX (близько 80 % виробництва DRI у шахтних печах), Hyl/Energiron (17 %), Pered (3 %), Finmet, Circored, Fior та ін. [4–8]. На сьогоднішній день потужність окремих шахтних печей може сягати 2,5 млн т на рік, наприклад Tosyali Algérie та Algerian Qatari Steel (Алжир, MIDREX), Nucor Steel Louisiana (США, Energiron).

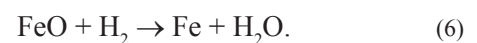
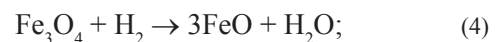
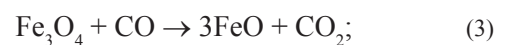
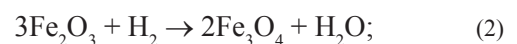
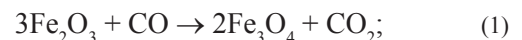
У футерованій шахтній печі відбувається, як і у доменній печі, протіччя залізовмісних шихтових матеріалів (кускової залізної руди або залізородних котунів), які опускаються під дією сили тяжіння, і спрямованих вгору відновлювальних газів, які складаються здебільшого з водою і монооксиду вуглецю. Температура у технологічному процесі регулюється таким чином, щоб не відбувалося розм'якшення та злипання шихтових матеріалів. Через це немає необхідності у шарах коксу у стовпі шихтових матеріалів, одним з призначень яких у доменній печі є забезпечення газопроникності шихти. В якості відновника в таких процесах можуть використовуватися різноманітні відновлювальні гази: коксовий газ, продукти газифікації вугілля, природний газ або продукти його конверсії, водень. Більшість установок такого типу побудовано на Близькому Сході, у Північній Африці та Карибському регіоні, тобто у регіонах, багатих на природний газ. Відповідно технологічні процеси, що використовуються в існуючих установках, здебільшого розраховані на використання природного газу або продуктів його конверсії. Але розробники відзначають можливість корегування технологій для використання різноманітних газоподібних відновників, без вмісту вуглецю.

Однією з переваг використання газоподібних відновників є їх чистота. Тобто, на відміну від коксу і вугілля, вони не приносять додаткових домішок у DRI, таких як сірка, фосфор чи миш'як. Таким чином, вміст шкідливих домішок у продукті залежить тільки від чистоти залізородної си-

ровини. З іншого боку, вся порода, що міститься у залізородних матеріалах, залишається у DRI і потрапляє у сталеплавильні печі, що призводить до збільшення кількості шлаку і витрати енергії. Тому шихтові матеріали мають містити якомога меншу кількість породи. Оптимальним вважається наступний склад залізної руди або залізородних котунів, % [5]: Fe = 67,0; SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 3,0; S = 0,008; P = 0,03; TiO<sub>2</sub> = 0,15.

Існує мало покладів такої багатой залізної руди. Зокрема у товарних рудах Криворізького басейну середній вміст заліза коливається від 46,9 до 65,6 % [9]. Це зумовлює необхідність як і для доменного процесу, так і збагачення відносно бідних залізних руд. Для ефективного збагачення руди її подрібнюють, а після збагачення грудкують з одержанням агломерату для доменної печі або котунів для доменної печі чи виробництва DRI. На відміну від доменної печі, одержання заліза прямого відновлення можливе у киплячому шарі подрібнених залізородних матеріалів [8, 10, 11]. Це досягається завдяки використанню газоподібних відновників і обмеженому нагріву залізородної сировини. На теперішній час такі технології поки не знайшли широкого застосування, ймовірно через запобігання злипання окремих частинок. Але вони беззаперечно мають перспективи завдяки усуненню витрат на грудкування, через що можливе істотне зменшення собівартості DRI.

Шахтну піч для одержання DRI можна поділити на зони попереднього нагріву шихтових матеріалів, відновлювальних реакцій, подачі відновлювальних газів і вивантаження металізованого продукту [5, 6]. Основні відновлювальні реакції — це реакції відновлення заліза з вищих оксидів до нижчих і далі до металевого заліза монооксидом вуглецю та воднем:



Реакції (1) і (2) відбуваються відносно легко у верхній частині печі. Реакції (3)–(6) потребують значного надлишку відновника. У табл. 1 наведено склад рівноважних газових сумішей для реакцій відновлення в залежності від температур [11].

З табл. 1 видно, що найбільшого надлишку відновника потребують реакції (5) і (6), тобто реакції одержання металевого заліза. Причому з ростом

Таблиця 1. Склад рівноважних газових сумішей для реакцій відновлення  $H_2O/H_2$  або  $CO_2/CO$ 

Реакція	Температура, °C						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
(3)	55,2/44,8	64,8/35,2	71,9/28,1	77,6/22,4	82,2/17,8	85,9/14,1	88,9/11,1
(4)	30,1/69,9	54,2/45,8	71,3/28,7	82,3/17,7	89,0/11,0	92,7/7,3	95,2/4,8
(5)	47,2/52,8	40,0/60,0	34,7/65,3	31,5/68,5	28,4/71,6	26,2/73,8	24,3/75,7
(6)	23,9/76,1	29,9/70,1	34,0/66,0	38,1/61,9	41,1/58,9	42,6/57,4	44,5/55,5

температур відновлювальна здатність водню збільшується, а монооксиду вуглецю зменшується за реакцією (5). За температур понад 800 °C водень є більш ефективним відновником, ніж монооксид вуглецю, і з термодинамічної точки зору можливе відновлення заліза тільки за рахунок водню. Але у будь-якому разі менше половини відновника може бути використано для відновлення заліза до металу за умови рівноважного стану. У реальних промислових процесах рівноважний стан не досягається, тому необхідний ще більший надлишок відновника. Очевидно, що для економічного використання відновників газу, що відходять з шахтної печі, необхідно очищувати та використовувати повторно.

У результаті протікання відновлювальних реакцій ступінь металізації заліза у промислових технологіях складає близько 94 %.

Використання DRI є найбільш доречним для виплавки сталі у дугових сталеплавильних печах (ДСП). Адже, з одного боку, робота ДСП не призводить до значних викидів вуглекислого газу за умови чистої генерації електроенергії. З іншого боку, DRI, на відміну від металобрухту, відзначається відомим і сталим хімічним складом і, за умови чистої залізородної сировини, його використання не потребує значних засобів рафінування сталі.

Початково продуктом шахтних установок були лише металізовані котуни, охолоджені перед вивантаженням — Cold Direct Reduction Iron (CDRI) [5]. Але вони мають певний недолік — схильність до окиснення і навіть до загоряння через розвинену поверхню [11]. Тому згодом для більш зручного і безпечного транспортування і зберігання продукції на деяких заводах впроваджено вивантаження гарячого продукту до пресу валкового типу, на якому формується продукція у вигляді щільних подушкоподібних брикетів — hot briquetted iron (HBI). У 2023 р. частка HBI склала близько 9 % від виробництва DRI [4].

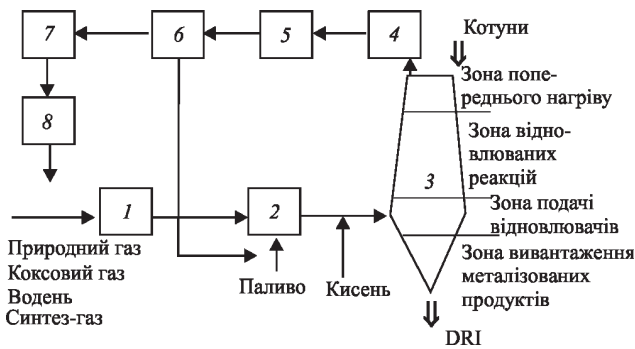
Очевидно, що охолодження DRI при вивантаженні з шахтної печі і його повторне нагрівання у сталеплавильній печі призводить до зайвих енергетичних, економічних та ресурсних витрат. Тому на деяких металургійних заводах, які у своєму складі мають як шахтні відновлювальні, так і дугові сталеплавильні печі, було впроваджено вивантаження гарячого DRI — Hot Direct Reduction Iron (HDRI) [5]. У результаті крім зменшення питомої витрати

електроенергії спостерігається підвищення продуктивності сталеплавильних печей до 20 % [12]. Це відбувається тому, що для нагрівання DRI до температури плавлення потрібно менше енергії та часу, що призводить до скорочення загального циклу плавлення. Емпіричне правило показує, що споживання електроенергії зменшується приблизно на 20 кВт·год/т рідкої сталі на кожні 100 °C підвищення температури DRI. Таким чином, економія при температурі DRI понад 600 °C може становити 120 кВт·год/т. Додатковими перевагами, крім економії електроенергії, є зниження витрати електродів, футерівки ДСП і можливість використання менш потужного електрообладнання. Зменшення енергетичних витрат у свою чергу призводить до зменшення забруднення довкілля. У 2023 р. доля HDRI склала близько 11 % від виробництва DRI [4].

Залежно від особливостей підприємства для транспортування HDRI до сталеплавильного цеху можуть застосовуватися конвеєри (на відстань до 200 м), транспортувальні ємності (на відстань понад 100 м) або, якщо відстань до 40 м, спеціалізовані системи, наприклад HOTLINK [5]. Остання передає HDRI з температурою до 700 °C у сусідню ДСП завдяки розміщенню шахтної печі MIDREX над зовнішньою стіною сталеплавильного цеху. HDRI скидається в гарячому вигляді в резервуар, а потім подається безпосередньо в ДСП з мінімальними тепловтратами. Транспортування HDRI відбувається завдяки силі тяжіння. Через герметичність HOTLINK системи не відбувається повторного окиснення HDRI. HOTLINK система розроблена з урахуванням можливості вивантаження HBI або CDRI, якщо у даний момент ДСП не потребує HDRI, без зупинки виробництва [12].

Узагальнена схема виробництва DRI представлена на рисунку.

Відновлювальні газу (коксовий газ, продукти газифікації вугілля, природний газ або продукти його конверсії, водень) подаються у зволожувач 1 (водяна пара використовується для конверсії вуглеводнів). Далі у нагрівачі 2 відбувається нагрів газової суміші до необхідної температури. Нагріті газу подаються у шахтну піч 3 для використання у відновлювальних процесах. Можливе додавання кисню у газову суміш перед шахтною піччю для ще більшого підвищення її температури. Газу, які виходять з шахтної печі, спочатку проходять через



Технологічна схема виробництва DRI: 1 — зволожувач; 2 — нагрівач; 3 — шахтна піч; 4 — теплообмінник; 5 — фільтрувальна система; 6 — устаткування для видалення води; 7 — компресори; 8 — устаткування для видалення CO<sub>2</sub>

теплообмінник 4 для ефективного використання теплової енергії. Далі у фільтрувальній системі 5 відбувається очищення газів переважно від залізорудного пилу. На наступному етапі 6 при охолодженні відбувається видалення води. Далі частина газів може використовуватися як паливо для нагріву суміші відновлювальних газів, а частина за допомогою компресорів 7 відправляється на видалення вуглекислого газу 8. Після цього газова суміш містить переважно відновлювальні гази і повторно використовується у відновлювальних процесах.

Наведена схема є узагальненою і може відрізнятися залежно від технологічних особливостей на конкретному підприємстві. Зокрема, при використанні водню у якості відновника відсутні стадії зволоження 1 та видалення вуглекислого газу з відпрацьованого 8.

Як зазначалося вище, існує багато способів виробництва водню, і найбільш привабливим з екологічної точки зору є використання для відновлювальних процесів H<sub>2</sub>, одержаного шляхом електролізу води. Але, говорячи про екологічність, треба враховувати викиди вуглекислого газу при виробництві необхідної для електролізу електроенергії. Так, автори роботи [6] визначили орієнтовну кількість вуглекислого газу, утвореного при виробництві DRI за різного співвідношення природного газу (ПГ) і водню у суміші відновлювальних газів при різних способах виробництва

електроенергії і зробили наступні припущення: витрата електроенергії на виробництво 1 кг водню шляхом електролізу становить 56 кВт·год; при виробництві електроенергії з відновлювальних джерел або на атомних електростанціях викиди вуглекислого газу становлять 20 г на 1 кВт·год, при спалюванні природного газу — 490 г на 1 кВт·год, при спалюванні вугілля — 820 г на 1 кВт·год.

Результати цих досліджень наведено у табл. 2 [6].

Таким чином, використання водню у якості відновника при виробництві DRI у шахтних печах дозволяє скоротити викиди вуглекислого газу вдвічі за умови генерації електроенергії на атомних або зелених електростанціях, тобто при використанні рожевого або зеленого водню. З іншого боку, використання електроенергії теплових електростанцій навпаки призведе до істотного збільшення викидів вуглекислого газу. Також слід розуміти, що наведені розрахунки мають місце при роботі підприємства за поданою на рисунку схемою, тобто за умови повторного використання газів, що виходять з шахтної печі.

Очевидно, що зменшення викидів вуглекислого газу у металургії забезпечується при скороченні споживання електроенергії на будь-якій ланці виробництва сталі. Як було сказано вище, істотної економії електроенергії можна досягти завдяки одержанню HDRI.

Іншим шляхом зменшення викидів вуглекислого газу у металургії може бути застосування плазмових технологій. Зокрема, можливе відновлення заліза у розплаві у плазмовій печі при використанні відновлювальних газів, у тому числі і водню [1, 13], або навіть термічне розкладання оксидів заліза [14]. Гарячі відновлювальні гази, що виходитимуть за таких умов із плазмових печей, можна використовувати або безпосередньо для відновлення заліза у шахтних печах, або для підігріву відновлювальних газів, спрямованих у шахтні печі. Але наразі такі рішення ще потребують подальших досліджень як у галузі плазмових технологій, так і в інтеграції плазмових технологій у відновлення заліза в шахтних печах.

Таблиця 2. Викиди CO<sub>2</sub> в залежності від складу суміші відновлювальних газів і способу одержання електроенергії, кг CO<sub>2</sub> на 1 т DRI [6]

Газ	100 % ПГ			50 % ПГ + 50 % H <sub>2</sub>			20 % ПГ + 80 % H <sub>2</sub>		
	Атомна, зелена	ПГ	Вугілля	Атомна, зелена	ПГ	Вугілля	Атомна, зелена	ПГ	Вугілля
Безпосередні викиди при виробництві DRI	495	–	–	287	–	–	200	–	–
Викиди, пов'язані з використанням електроенергії:									
у процесі відновлення	2	50	84	2	45	75	2	42	71
при виробництві H <sub>2</sub>	0	0	0	31	754	1262	46	1114	1864
Сумарні викиди	495	545	579	320	1086	1624	248	1356	2135

## Висновки

1. Основною групою технологій позадоменного відновлення заліза з рудної сировини є технології відновлення у шахтних печах. Водень, як складова відновлювальних газів, бере участь у відновлювальних процесах. З термодинамічної точки зору у цих технологіях можливе використання навіть чистого водню для відновлення заліза.

2. При виробництві DRI завдяки використанню водню можна скоротити вдвічі викиди вуглекислого газу у порівнянні з використанням природного, за умови виробництва електроенергії відновлювальними джерелами або на атомних електростанціях.

3. Використання плазмових технологій відновлення воднем є перспективним шляхом зменшення викидів вуглекислого газу у металургії, але потребує подальших досліджень як технологічних особливостей процесу, так і конструкційних особливостей шахтних печей.

## Список літератури/References

1. Isnaldi, R. Souza Filho, Hauke Springer et al. (2022) *Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.13356.pdf>
2. Giovannini, S. (2020) *50 shades of (grey and blue and green) hydrogen puzzled by all the colours and argon? This article is for you*. Energy Cities. <https://energy-cities.eu>
3. Kolisnichenko, V. (2023) Global production of cast iron grew by 1.1 % in 2023. <https://gmk.center.ua/news/globalne-virobnictvo-chavunu-u-2023-roci-zroslo-na-1-1-r-r/>
4. (2023) *World Direct Reduction Statistics*. <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2023.pdf>
5. *The MIDREX Process — The world's most reliable and productive Direct Reduction Technology*. [https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex\\_Process\\_Brochure\\_4-12-18.pdf](https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_Process_Brochure_4-12-18.pdf)
6. Pauluzzi, D., Giraldo, A.H., Zugliano, A. et al. (2021) *CFD Study of an Energiron Reactor Fed With Different Concentrations of Hydrogen*. AISTech Iron & Steel Technology. [https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2021/09/MARCH-2021\\_AIST-IRON-STEEL-TECHNOLOGY.pdf](https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2021/09/MARCH-2021_AIST-IRON-STEEL-TECHNOLOGY.pdf)
7. Pauluzzi, D., Martinis, A. Sustainable decrease of CO<sub>2</sub> Emissions in the Steelmaking Industry by Means of the Fine Ore Direct Reduction Circored Energiron Direct Reduction Technology. [https://www.researchgate.net/publication/329059091\\_SUSTAINABLE\\_DECREASE\\_OF\\_CO2\\_EMISSIONS\\_IN\\_THE\\_STEELMAKING\\_INDUSTRY\\_BY\\_MEANS\\_OF\\_THE\\_ENERGIRON\\_DIRECT\\_REDUCTION\\_TECHNOLOGY](https://www.researchgate.net/publication/329059091_SUSTAINABLE_DECREASE_OF_CO2_EMISSIONS_IN_THE_STEELMAKING_INDUSTRY_BY_MEANS_OF_THE_ENERGIRON_DIRECT_REDUCTION_TECHNOLOGY)
8. <https://www.metso.com/globalassets/pdfs-and-other-downloads/circored---fine-ore-direct-reduction.pdf>
9. Pochtariov, O.V. (2024) *Improvement of technological means of quality control of iron ore raw materials in underground mining*: Syn. of Thesis for PhD. Kryvorizh. Nats. Un-t. Kryvyi Rig.
10. Bondarenko, B.I., Shapovalov, V.A., Garmash, N.I. (2003) *Theory and technology of coke-free metallurgy*. Kyiv, Naukova Dumka
11. Gubin, G.V., Piven, V.O. (2010) *Modern commercial methods of iron coke-free metallurgy*. Kryvyi Rig.
12. Hotlink System. Benefits of Charging Hot Dri (HDRI). [https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Hot\\_Transport\\_-\\_HOTLINK.pdf](https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Hot_Transport_-_HOTLINK.pdf)
13. Zhyrov, D.M. (2011) *Peculiarities of the plasma-arc liquid-phase reduction of iron with gases*: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kyiv, PWI.
14. Mogylatenko, V.G., Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Kozin, R.V. (2023) Thermal decomposition of hematite pellets during plasma-arc smelting in argon atmosphere. In: *Proc. of XV<sup>th</sup> Inter. Sci.-Tech. Conf. on New Materials and Technologies in Mechanical Engineering, 27–28 April 2023*. Kyiv, KPI, 23–29.
15. [https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya\\_2023.pdf](https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf)

## INDUSTRIAL TECHNOLOGIES FOR OUT-OF-BLAST FURNACE REDUCTION OF IRON FROM ORES AND PROSPECTS OF USING HYDROGEN FOR THE REDUCTION PROCESSES

V.O. Shapovalov<sup>1</sup>, V.G. Mogylatenko<sup>1,2</sup>, D.M. Zhyrov<sup>1</sup>, V.R. Burnashev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: shapovalov@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

37 Prospect Beresteyskiy, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: vmogilatenko@gmail.com

Application of a mixture of carbon monoxide and hydrogen allows achieving a significant lowering of carbon dioxide gas emissions in metallurgy. Industrial technologies of out-of-blast furnace reduction of iron from ore raw materials are considered. Reactions in the reduction processes are analyzed. It is shown that at temperatures above 800 °C hydrogen is a more effective reducing agent than carbon monoxide. Ways to improve the energy efficiency of existing technologies have been demonstrated. It is shown that today the main technology of iron reduction from ore is reduction in shaft furnaces using a mixture of carbon dioxide and hydrogen. The generalized scheme of production of iron by direct reduction is given. It is shown that in the production of direct reduction iron, it is possible to halve carbon dioxide emissions compared to the use of natural gas due to application of hydrogen, provided that power is produced from renewable sources or in nuclear power plants. It is concluded that a promising way to eliminate carbon emissions during the reduction of iron from ore or pellets is the use of plasma technologies. 14 Ref, 2 Tabl., 1 Fig.

*Keywords: direct reduction of iron, hydrogen, shaft furnace, carbon dioxide emissions*

Отримано 26.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 25.06.2025

Прийнято 12.07.2025