

АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

©2024 КИЗИМ М. О., ХАУСТОВА В. Є., КОТЛЯРОВ Є. І., ШУЛЬГА І. В.

УДК 669.1:622
JEL: L52; L61; L72; O14

Кизим М. О., Хаустова В. Є., Котляров Є. І., Шульга І. В. Аналіз напрямків трансформації гірничо-металургійного комплексу України

Метою статті є вибір та обґрунтування технології позадоменного (безкоксового) виробництва сталі, яка може бути використана в Україні з урахуванням наявної сировинної бази, забезпеченості необхідними енергоресурсами та іншими специфічними умовами країни. Технології прямого відновлення заліза (безкоксова металургія), які мають промислове значення, засновані на взаємодії залізної руди (у вигляді окатишів) із синтез-газом (суміш водню та монооксиду вуглецю). При цьому водень використовується як відновник заліза, а монооксид вуглецю спалюється з виділенням теплоти, необхідної для протікання хімічної реакції. Синтез-газ у промислових масштабах отримується або шляхом парової каталітичної конверсії природного газу, або шляхом газифікації вугілля. Отримання синтез-газу з природного газу дозволяє суттєво знизити викиди парникового газу порівняно з коксовою металургією (з 1,4–1,7 до 0,328 т діоксиду вуглецю на 1 т заліза). Але в сучасних умовах України ця технологія не може використовуватися внаслідок дефіцитності природного газу та високих цін на нього. Пряме відновлення заліза синтез-газом, що отримується з вугілля, в українських умовах має великі перспективи через наявність великих запасів і розвинене вугледобування саме тих марок вугілля, які найбільш придатні для газифікації. Зниження викидів парникового газу за цієї технології можна досягнути, якщо на стадії газифікації буде отримуватися синтез-газ, вміст водню в якому складає понад 67%. У статті також розглянуто перспективи водневої металургії, за якої як відновник і джерело теплоти, необхідної для протікання реакції, використовується виключно водень, що отримується шляхом електролізу води. За сучасних умов України єдиним джерелом електроенергії для електролізу може розглядатися спеціально побудована сонячна електростанція. Розраховано, що для виробництва 1 млн т заліза прямого відновлення потрібна електростанція потужністю більше 100 МВт. Можливості будівництва комплексу з виробництва заліза прямого відновлення з використанням виключно водню потребує подальших досліджень.

Ключові слова: гірничо-металургійний комплекс, безкоксова металургія, «зелена» металургія, металургійна промисловість, промислова політика, пряме відновлення, парниковий газ, синтез-газ, водень, декарбонізація.

Рис.: 1. **Табл.:** 3. **Бібл.:** 13.

Кизим Микола Олександрович – доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: m.kyzym@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-2656>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1859367>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216130870>

Хаустова Вікторія Євгенівна – доктор економічних наук, професор, директор Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: v.khaust@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-9287>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/629132>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216123094>

Котляров Євген Іванович – кандидат економічних наук, доцент, завідувач сектора енергетичної безпеки та енергозбереження відділу промислової політики та енергетичної безпеки, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: ekotlarov@i.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-6729>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/V-3947-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701345149>

Шульга Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач коксового відділу ДП «Український державний науково-дослідний вугле-хімічний інститут (УХІН)» (вул. Весніна, 7, Харків, 61023, Україна)

E-mail: ko@ukhin.org.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2690>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004957016>

UDC 669.1:622
JEL: L52; L61; L72; O14

Kyzym M. O., Khaustova V. Ye., Kotliarov Ye. I., Shulha I. V. Analyzing the Directions of Transformation of the Mining and Metallurgical Complex of Ukraine

The aim of the article is to select and substantiate the technology of blast-furnace (coke-free) steel production, which can be used in Ukraine, taking into account the existing raw material base, the provision of the necessary energy resources and other specific conditions of the country. Technologies of direct reduction of iron (coke-free metallurgy), which are of industrial importance, are based on the interaction of iron ore (in the form of pellets) with synthesis gas (a mixture of hydrogen and carbon monoxide). In this case, hydrogen is used as an iron reducing agent, and carbon monoxide is burned with the release of heat necessary for

the chemical reaction to take place. Synthesis gas on an industrial scale is produced either by steam catalytic conversion of natural gas or by coal gasification. Production of synthesis gas from natural gas can significantly reduce greenhouse gas emissions compared to coke oven metallurgy (from 1.4–1.7 to 0.328 tons of carbon dioxide per 1 ton of iron). Yet, in the current conditions of Ukraine, this technology cannot be used due to the shortage of natural gas and high prices for it. Direct reduction of iron by synthesis gas obtained from coal in Ukrainian conditions has great prospects due to the presence of large reserves and developed coal mining of those grades of coal that are most suitable for gasification. Reduction of greenhouse gas emissions with this technology can be achieved if synthesis gas with a hydrogen content of more than 67% is obtained at the gasification stage. The article also discusses the prospects of hydrogen metallurgy, in which only hydrogen obtained by electrolysis of water is used as a reducing agent and a source of heat necessary for the reaction. Under the current conditions of Ukraine, the only source of electricity for electrolysis can be considered a specially built solar power plant. It is calculated that a power plant with a capacity of more than 100 MW is required to produce 1 million tons of direct reduced iron. The possibility of constructing a complex for the production of direct reduced iron using only hydrogen requires further research.

Keywords: mining and metallurgical complex, coke-free metallurgy, green metallurgy, metallurgical industry, industrial policy, direct reduction, greenhouse gas, synthesis gas, hydrogen, decarbonization.

Fig.: 1. **Tabl.:** 3. **Bibl.:** 13.

Kyzym Mykola O. – D. Sc. (Economics), Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Chief Research Scientist of the Research Centre for Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: m.kyzym@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-2656>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1859367>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216130870>

Khaustova Viktoriia Ye. – D. Sc. (Economics), Professor, Director of the Research Centre for Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: v.khaust@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-9287>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/629132>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216123094>

Kotliarov Yevhen I. – PhD (Economics), Associate Professor, Head of the Sector of Energy Security and Energy Efficiency of Department of Industrial Policy and Energy Security, Research Centre for Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: ekotliarov@i.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-6729>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/V-3947-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701345149>

Shulha Ihor V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Coke Department, SE “Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)” (7 Vesnina Str., Kharkiv, 61023, Ukraine)

E-mail: ko@ukhin.org.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2690>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004957016>

Традиційно українська так звана чорна металургія (виробництво заліза та сплавів на його основі – чавуну, сталі та металопродукату) займала провідні позиції не тільки в ЄСРП, а й у всьому світі. Ще у 2015 р. країна входила до топ-10 виробників сталі у світі, виробляючи 23,0 млн т продукції на рік [1], а станом на 2023 р. – тільки 6,2 млн т (24 місце у світі) [2].

Протягом останніх десятиліть гірничо-металургійний комплекс України (далі – ГМК) постійно втрачав свої позиції: зменшувалися обсяги виробництва, погіршувалися техніко-економічні показники, збільшувався негативний вплив на навколишнє середовище. Причиною системної кризи ГМК протягом останніх десятиліть була сукупність об’єктивних і суб’єктивних факторів (непрозора приватизація, тривала відсутність масштабних інвестицій, наростаючі проблеми з видобутком коксівного вугілля та багато інших) [3].

Отже, ще до початку масштабних воєнних дій з боку росії металургійна промисловість потре-

бувала розробки стратегії подальшого розвитку. З початком війни проблеми тільки загострилися, внаслідок чого український ГМК суттєво зменшив обсяги виробництва. За урядовими оцінками, скорочення операційної діяльності характеризується такими даними: видобуток залізної руди скоротився на 40% – з 86 млн т у 2021 р. до 34 млн т у 2022 р., виробництво чавуну – на 70% (з 21 млн т до 6 млн т), виробництво необробленої сталі – з 21 млн т до 6 млн т, виробництво готового прокату – з 19 млн т до 5 млн т [4].

Але в умовах широкомасштабної військової агресії та при майбутньому відновленні України значення металургії важко переоцінити. Майбутнє відновлення інфраструктури та промислових об’єктів, вирішення питань релокації промислових підприємств суттєво полегшується за умови забезпечення країни власним металопродукатом. Усе це потребує переосмислення ролі та місця металургії в економіці країни в сучасних реаліях. На відміну від довоєнної металургії, за якої більше 80% мета-

лопродукції експортувалося, та виходячи із сучасних реалій, відновлений ГМК має передусім бути орієнтованим на внутрішній ринок. З боку Уряду України є розуміння цієї проблеми. Так, у Плані України [4] передбачається розвиток переробних галузей, спрямований на створення самодостатньої економічної моделі, де додатковий внутрішній попит на машини та обладнання задовольняється шляхом внутрішньої пропозиції.

Необхідність відновлення та докорінної модернізації (а, по суті, – побудови нової металургії) викликана також загальносвітовим трендом – відмовою від виробництва металу шляхом непрямого відновлення заліза в доменних печах і переходом на технології прямого відновлення з поступовим переходом до «зеленої» металургії, яка характеризується нульовими викидами парникових газів (діоксиду вуглецю). Необхідність такого переходу пояснюється тим, що превалююча технологія непрямого відновлення базується на використанні вуглецю для відновлення руди до металу. За оцінками Міжнародної енергетичної агенції, у 2020 р. світова металургія 74% усіх енерговитрат задовольняла за рахунок вугілля, внаслідок чого вона продукувала 7% загальних по світу щорічних викидів діоксиду вуглецю [5].

Необхідність саме такого напрямку розвитку вітчизняної металургії (її декарбонізації) визнається як Урядом країни, так і великими гравцями металургійного сектора. Так, у 2023 р. на урядовому рівні створено платформу щодо «зеленого» відновлення металургії, до якої приєднався найбільший виробник сталі в Україні – група «Метінвест» [6]. У 2024 р. Україна та UNIDO підписали Програму зеленого відновлення промисловості України на 2024–2028 роки [7].

Амбітні плани Уряду були презентовані на міжнародній конференції у 2022 р. у м. Лугано (Швейцарія), згідно з якими планується реалізація ряду інвестиційних проєктів, якими передбачається, зокрема, виробництво 2,5–5 млн т «зеленої» сталі в електродугових печах і створення модулів ЗПВ/ГБЗ (залізо прямого відновлення/гаряче брикетоване залізо), сумісних з H₂ (воднем), для виробництва 5 млн т ЗПВ/ГБЗ [8].

Отже, відмова від технології непрямого відновлення та перехід до більш екологічних технологій виробництва сталі є загальноновизнаним трендом. У світовій металургії промислове освоєння отримали різні процеси та технології, які відрізняються апаратним оформленням і видом відновника, що використовується для перетворення залізної руди на метал.

Метою статті є вибір та обґрунтування технології позадоменного (безкоксового) виробництва сталі, яка може бути використана в Україні з урахуванням наявної сировинної бази, забезпеченості необхідними енергоресурсами та іншими специфічними умовами країни.

При розгляді майбутніх напрямів розвитку металургійної промисловості слід враховувати ті фізичні та хімічні процеси, які лежать в основі виробництва заліза. У найбільш узагальненому вигляді, як у теоретичній, так і в практичній площині, можливі два основні варіанти отримання сталі для подальшого виробництва металопрокату (рис. 1):

- ✦ отримання напівфабрикату із залізної руди (чавун, залізо прямого відновлення) з подальшим очищенням від шкідливих домішок і баластних речовин та отриманням відносно чистого заліза (сталі);
- ✦ переробка металобрухту на сталь.

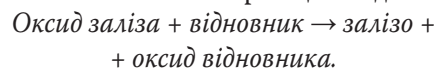
У межах цієї статті як критерій порівняння різних способів отримання заліза з руди використовуються питомі викиди діоксиду вуглецю на 1 т сталі, середньосвітовий рівень яких на даний час складають 1,4 т/т, при запланованому зниженні у 2050 р. до 0,6 т/т [5].

Переплавка металобрухту на сталь конверторним способом є відносно екологічно чистим процесом: як джерело енергії для переplatки використовується електрична енергія, що мінімізує викиди діоксиду вуглецю.

Тобто за викидами діоксиду вуглецю такий спосіб отримання сталі є практично вуглецево нейтральним.

Стримувальним фактором застосування такої технології є дефіцит металобрухту. У майбутньому, при повноцінному переході до циркулярної економіки, роль металобрухту в задоволенні потреб у сталевих виробках буде зростати. Але навіть за 100 відсоткового повторного використання у сталеплавильному виробництві відпрацьованих металевих виробів і матеріалів металобрухт не здатен задовольняти зростаючі потреби людства в металопрокаті. Отже, переробка металобрухту може розглядатися як додаткова технологія задоволення потреб у сталевих виробках. Саме в такому сенсі переробка металобрухту використовується всіма країнами, які мають власну металургійну промисловість.

З цього випливає висновок, що технології отримання заліза із залізної руди збережуть своє значення і в майбутньому. В узагальненому вигляді, за своєю сутністю, переробка залізної руди (оксидів заліза) на метал є хімічною реакцією відновлення:



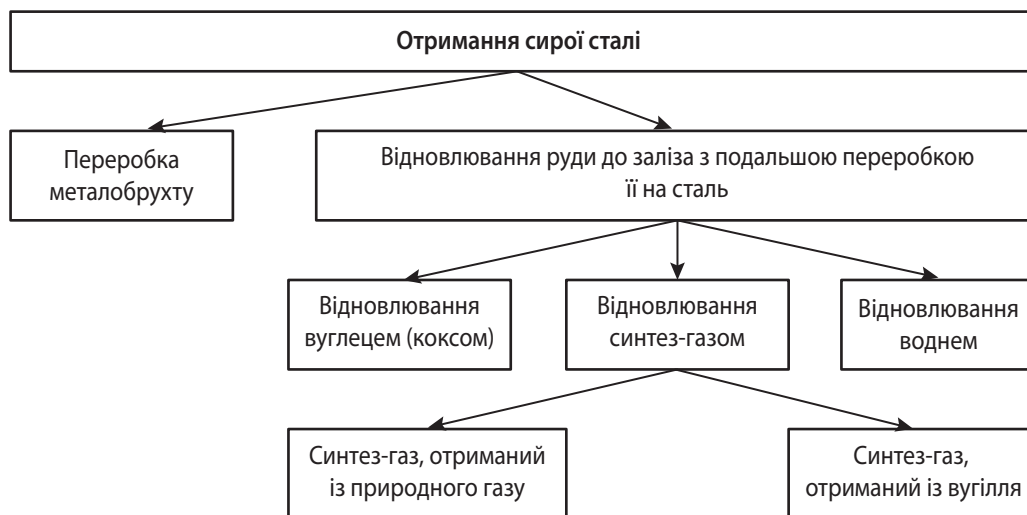


Рис. 1. Способи отримання сирової сталі

Джерело: авторська розробка.

Така хімічна реакція належить до ендотермічних – таких, що протікають з поглинанням тепла. Тому для забезпечення необхідної температури реакції зазвичай частина відновника спалюється для підтримання теплового балансу процесу. У деяких випадках для забезпечення необхідної температури реакції спалюється не відновник, а інше паливо (природний газ чи вугілля).

Історично найбільш розповсюдженою є вуглецева металургія (використання як відновника вуглецю). Основою технології є реакція взаємодії вуглецю із залізною рудою, за якої отримується власне залізо і діоксид вуглецю. Джерелом вуглецю на різних стадіях розвитку виступало деревне вугілля, а при збільшенні продуктивності агрегатів – кокс, що отримується із суміші окремих (коксівних) марок кам'яного вугілля.

Саме така технологія є найпоширенішою в усьому світі, і саме вона є джерелом масових викидів діоксиду вуглецю.

Перевагами технології є її відпрацьованість і можливість використання агрегатів великої потужності, здатних випускати тисячі тонн металу на добу. До недоліків цієї технології слід віднести складність виробничих процесів, необхідність використання капіталоемних і екологічно небезпечних процесів переробки кам'яного вугілля на доменний кокс і подальшого відновлення залізної руди в доменних печах.

За нашими укрупненими розрахунками, при виробництві 1 т чавуну викиди діоксиду вуглецю в коксовому та доменному виробництві (за питомих витратах коксу на тону чавуну 0,35–0,45 т/т) складають 1,3–1,7 т/т чавуну. Саме такі витрати

роблять металургію одним із найбільших забруднювачів довкілля.

Альтернативою вуглецевій металургії є так звана безкоксва металургія, за якої отримання заліза із залізної руди досягається шляхом використання інших відновників, відмінних від коксу: синтез-газ (суміш монооксиду вуглецю та водню) або чистий водень. Зазвичай у промислових масштабах як відновник використовується синтез-газ, який отримується при переробці різних видів сировини.

Найбільшого поширення отримав спосіб отримання синтез-газу шляхом каталітичної парової конверсії природного газу, основною складовою якого є метан.

У результаті парової конверсії метану отримується синтез-газ, який містить водень і монооксид вуглецю у співвідношенні 3 : 1 (на три молекули водню припадає одна молекула монооксиду вуглецю).

У подальшому водень використовується як відновник, а спалювання монооксиду вуглецю (його окислення до діоксиду) забезпечує тепловий баланс реакції.

Результатом процесу є так зване губчасте залізо – високоякісна сировина для виробництва сталі в електродугових печах.

Для застосування цієї технології необхідна високоякісна збагачена залізна руда (як правило, у вигляді окатишів) із вмістом заліза не менше 62%, яка на даний час виробляється в Україні в достатніх обсягах. Зокрема, необхідний окатиш виробляється на гірничо-збагачувальних комбінатах групи «Метінвест» (із загальним вмістом заліза 62,5–65,5%) [9], а також групою Ferrexpo (із загальним

вмістом заліза 62–67%) [10]. На даний час обсяг виробництва окатиша суттєво перевищує внутрішнє споживання, і значна його частина експортується.

У *табл. 1* наведено окремі техніко-економічні показники переробки 1,538 млн т окатиша з виробництвом 1 млн т губчастого заліза. Для розрахунків прийнято, що загальний вміст заліза в окатиші (у вигляді оксиду Fe_2O_3 складає 65%).

Отже, викиди парникового газу при використанні як відновника водню – 0,328 т/т – значно нижчі, ніж при традиційній коксовій металургії та є кращими, ніж прийнято цільовий орієнтир на 2050 р. – 0,6 т/т [5].

Як свідчать виконані розрахунки, тиражування такої технології потребує значних ресурсів природного газу, який у сучасних умовах Україні є вкрай дефіцитним товаром. Крім того, технологія «природний газ → синтез-газ → відновлення заліза» є чутливою до ціни природного газу. Саме через високі ціни на природний газ в Україні припинено реалізацію великого інвестиційного проекту з будівництва електрометалургійного підприємства «Ворскла-сталь» з проектною потужністю підприємства 3 млн т сталі на рік. Основною причиною припинення названо саме висока ціна природного газу. За оцінками інвестора (група Ferrexpo), реалізація проекту є економічно доцільною, якщо ціна природного газу не буде перевищувати 100 доларів за 1000 куб. м [11].

Отже, на даний час, при дефіциті природного газу і високих цінах на нього, застосування технології, що розглядається, не має перспектив в Україні. Певні перспективи в цієї технології можуть з'явитися, якщо будуть реалізовані плани Уряду щодо нарощування видобутку природного газу з одночасним зменшенням його споживання з боку населення (внаслідок масової термомодернізації будівель) [4; 8] і модернізації комунальної енергетики [4].

Наступним варіантом отримання заліза прямого відновлення є використання як відновника і джерела тепла синтез-газу, що отримується при газифікації вугілля.

Газифікація вугілля для отримання синтез-газу має промислове використання в деяких країнах світу передусім для виробництва синтетичного моторного палива [12].

На даний час промислове значення мають різні процеси, сутність яких наведено в *табл. 2*.

Ці процеси відрізняються технічними параметрами газифікації (температура, тиск, тривалість газифікації), вимогами до сировини і складом кінцевого продукту – синтез-газу (за співвідношенням водень : монооксид вуглецю).

Загальним для всіх цих процесів є орієнтація на малометаморфоване (некоксівне) вугілля, частка якого в загальних покладах України перевищує 60% [13].

Залежно від процесу та технологічних параметрів газифікації склад синтез-газу за співвідно-

Таблиця 1

Потреба в ресурсах для виробництва губчастого заліза за технологією використання природного газу*

Показник	Кількість
Кількість окатиша, що переробляється, тис. т	1538
Кількість заліза, що отримується, тис. т	1000
Кількість водню, який потрібен для відновлення, млн м ³	600
Кількість монооксиду вуглецю, що спалюється в процесі відновлення заліза, млн м ³	150
Кількість природного газу для виробництва пари для парової конверсії метану, млн м ³	17
Кількість природного газу для конверсії природного газу у синтез-газ, млн. м ³	150
Загальна кількість природного газу для отримання 1 млн т губчастого заліза, млн. м ³	167
Викиди діоксиду вуглецю при спалюванні монооксиду вуглецю у процесі виробництва заліза та природного газу при виробництві пари:	
млн м ³	167
тис. т	328
Питомі викиди діоксиду вуглецю в розрахунку на готову продукцію, т/т	0,328

Примітка: розрахунки виконано виходячи з того, що:

- для відновлення двох молів заліза (112 г) з оксиду Fe_2O_3 потрібно додати три молі водню (6 г) і підвести 96,8 кДж тепла;
- у результаті реакції отримується 2 моля заліза (56 г);
- при окисленні (спалюванні) 1 моля монооксиду вуглецю (28 г) до діоксиду вуглецю виділяється 565 кДж тепла.

Джерело: розраховано авторами.

Процеси газифікації вугілля, які мають промислове значення

Назва процесу	Характеристика процесу
Процес Lurgi	Протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) у стаціонарному шарі
Процеси Koppers-Totzek, Siemens, Prenflo	Прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля
Процеси Texaco, Konoko-Phillips	Прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи

Джерело: складено авторами.

шенням водень : монооксид вуглецю може коливатися в межах $(2 : 1) \div (1 : 2)$. Для подальших розрахунків розглянемо два варіанти, що розрізняються між собою складом синтез-газу за співвідношенням водень : монооксид вуглецю.

Перший варіант – співвідношення компонентів водень : монооксид вуглецю дорівнює 1 : 1, усереднений склад синтез-газу, % (об.): $H_2 - 45, CO - 45, CO_2 - 10$.

Другий варіант – співвідношення компонентів водень : монооксид вуглецю дорівнює 2 : 1, усереднений склад синтез-газу, % (об.): $H_2 - 60, CO - 30, CO_2 - 10$.

У табл. 3 наведено розрахунок окремих статей матеріального балансу при виробництві 1 млн т губчастого заліза для прийнятих варіантів складу синтез-газу. Розрахунки виконані для типового українського малометаморфованного вугілля. Як і в попередньому випадку, для зіставності приймаємо виробництво заліза з окатишів, загальний вміст заліза в яких складає 65%.

Отже, як показують наведені розрахунки, екологічність процесу отримання заліза шляхом

використання синтез-газу з вугілля є чутливою до насиченості цієї сировини воднем. Розрахунки свідчать, що мінімальні викиди діоксиду вуглецю досягаються за такого складу синтез-газу, % (об.): водень – 90%, монооксид вуглецю – 10%. При використанні такого «ідеального» синтез-газу викиди діоксиду вуглецю в розрахунку на 1 т заліза будуть складати 0,135 т/т. Але такий склад синтез-газу можливий тільки при окремому від газифікації вугілля процесі отримання водню і штучному його додаванню до синтез-газу, що отримується.

Технологія, що розглядається (виробництво заліза шляхом непрямого відновлення синтез-газом з вугілля) виглядає в сучасних українських реаліях досить перспективною, якщо враховувати наявність покладів необхідного вугілля та наявність працюючих підприємств з видобутку і збагачення саме такого вугілля.

Зазвичай таке вугілля (малометаморфоване) використовується як паливо для теплової електрогенерації. Остання, в результаті збройної агресії росії, значною мірою зруйнована, а процес її по-

Таблиця 3

Потреба в синтез-газі та викиди діоксиду вуглецю при виробництві губчастого заліза за технологією використання кам'яного вугілля

Показник	Варіанти складу синтез-газу	
	1	2
Співвідношення водень : монооксид вуглецю	1 : 1	2 : 1
Кількість окатиша, що переробляється, тис. т	1538	
Кількість заліза, що отримується, тис. т	1000	
Кількість водню, яка потрібна для відновлення, млн m^3	600	
Кількість монооксиду вуглецю, що міститься в синтез-газі і перетворюється на діоксид вуглецю, млн m^3	600	300
Кількість діоксиду вуглецю, що міститься в синтез-газі, млн m^3	133	100
Загальна кількість синтез-газу, яка використовується в процесі відновлення, млн m^3	1333	1000
Усього утворюється діоксиду вуглецю, млн m^3 (тис. т)	733 (1440)	400 (786)
Викиди CO_2 в розрахунку на готову продукцію, т/т	1,44	0,79

Джерело: розраховано авторами.

вномасштабного відновлення є досить проблематичним через те, що Україна приєдналася до кліматичних цілей людства і планує відмовитися від спалювання вугілля на теплових електростанціях до 2035 р. [4].

Усі ці чинники ставлять під загрозу існування вугільної промисловості в Західному Донбасі та Львівсько-Волинському басейні. Виходом із ситуації, що складається у вугледобувних регіонах, є переорієнтація використання вугілля з простого спалювання на виробництво синтез-газу – як для виробництва синтетичного моторного палива [12], так і для виробництва заліза прямого відновлення.

Відповідні потужності можуть бути розташовані або в місці видобутку вугілля, або в місці виробництва окатишів, для яких характерна розвинена транспортна інфраструктура.

З тієї ролі, яку грає водень у процесі прямого відновлення заліза, впливає ще один напрямок переходу до «зеленої» металургії, а саме – використання для відновлення виключно водню. На думку прихильників «зеленого» переходу, використання як відновника водню дозволить повністю виключити з процесу отримання заліза викиди діоксида вуглецю – парникового газу, тобто перейти до вуглецевонейтральної металургії.

Як згадувалося, Уряд країни, презентуючи інвестиційний проект створення модулів, сумісних з H_2 (воднем) для виробництва 5 млн т заліза прямого відновлення [8], бачить певні перспективи саме в такому варіанті розвитку оновленої металургії. Про це ж свідчить і затверджений на урядовому рівні План України [4].

При розгляді такого варіанта розвитку металургії потрібно враховувати таке.

Кількість технологій отримання водню в промислових масштабах є досить обмеженою. Крім розглянутої вище технології отримання водню шляхом каталітичної парової конверсії природного газу, промислове значення має процес електролізу води, у результаті якого отримується водень і кисень.

Особливістю процесу електролізу є його висока енергоємність. Виконані розрахунки показують, що для отримання 1 тис m^3 водню (89 кг) необхідно 630 кВт × год електроенергії. За такої енергоємності процес отримання заліза прямим відновленням воднем може вважатися вуглецевонейтральним, якщо вуглецевонейтральним є процес отримання необхідної кількості електроенергії (так званої зеленої електроенергії).

Вуглецевонейтральна електроенергія може бути отримана на електростанціях, які використовують атомну енергію або енергію сонця, вітру чи води (гідроелектростанції).

У сучасних умовах України як реальне джерело «зеленої» електроенергії може розглядатися тільки сонячна енергія: частина наявних гідроелектростанцій мають значні пошкодження внаслідок російської військової агресії; вітрові електростанції переважно розташовані в областях, де відбуваються активні бойові дії, а атомні електростанції на даний час залишилися основним джерелом генерації електроенергії, причому в обсягах, недостатніх для сталого забезпечення потреб країни в електроенергії.

Таким чином, організація виробництва водню для прямого відновлення заліза можлива шляхом будівництва нових потужностей сонячної електроенергетики.

Як і в попередніх розглянутих варіантах організації виробництва заліза прямого відновлення, приймаємо, що для переробки 1,538 млн т окатиша (із загальним вмістом заліза 65%) і виробництва 1 млн т заліза потрібно 600 млн m^3 водню. За розрахунками, для такого обсягу виробництва заліза в процесі електролізу води необхідно 380 ГВт × год електроенергії.

Враховуючи залежність продуктивності сонячної електростанції від інтенсивності сонячного випромінювання, а також приймаючи середньорічну тривалість світлового дня в Україні на рівні 12 год, можна спрогнозувати, що необхідна потужність сонячної електростанції повинна складати як мінімум 86,3 МВт.

Такі обсяги виробництва «зеленої» електроенергії є цілком досяжними для кліматичних умов України. Але для виробництва заліза прямого відновлення, окрім водню, який використовується як відновник, необхідно забезпечити процес паливом, спалювання якого дозволить отримати теплоту, необхідну для протікання хімічної реакції відновлення заліза (864,3 ТДж). Така кількість теплоти виділяється, за нашими розрахунками, при спалюванні 86 млн m^3 водню. Для цього необхідно додаткова потужність електростанції 12,4 МВт.

Підсумовуючи виконані розрахунки, можна зробити висновок, що для реалізації проекту з виробництва 1 млн т вуглецевонейтрального заліза прямого відновлення необхідно будівництво сонячної електростанції загальною встановленою потужністю 100 МВт (не враховуючи потребу в електроенергії власне технологічного процесу отримання заліза).

Можливість реалізації такого проекту потребує додаткових досліджень, крім іншого, для вирішення питання щодо місця розташування відповідних потужностей. Попередньо місце будівництва повинне відповідати таким критеріям:

- ✦ мінімальні витрати на транспортування сировини (окатиша) і наявність відповідної інфраструктури для її приймання;
- ✦ сприятливі кліматичні умови для розміщення великої сонячної електростанції;
- ✦ наявність земельної ділянки (площею як мінімум 2000 га) для розміщення сонячної електростанції та потужностей з прямого відновлення заліза.

Таким чином, технологія прямого відновлення заліза воднем може вважатися перспективною для умов України, але не є настільки готовою для впровадження, як технологія відновлення синтез-газом, що отримується при газифікації вугілля.

ВИСНОВКИ

З проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

Перехід до низьковуглецевої економіки загалом і металургії зокрема є стратегічним напрямом подальшого розвитку України.

Найбільш перспективним для умов України є процес прямого відновлення заліза синтез-газом, який отримується при газифікації малометаморфованого вугілля. Для розвитку низьковуглецевої металургії на базі газифікації вугілля в Україні є всі необхідні передумови, а саме:

- ✦ великі поклади залізної руди та наявність потужностей з її збагачення, які забезпечують отримання напівфабрикату (окатиша) належної якості;
- ✦ великі поклади малометаморфованого кам'яного вугілля (у тому числі категорії А), яке найбільш придатне для подальшої газифікації;
- ✦ внаслідок зруйнованості більшості вугільної електрогенерації в країні є надлишки потужностей з видобування саме малометаморфованого вугілля, придатного для виробництва синтез-газу.

У зв'язку з цим розвиток металургії, заснованої на синтез-газі з малометаморфованого вугілля, надає можливості не тільки забезпечити економіку країни високоякісною сталлю, а й зберегти вугільну промисловість і, більш того, надати їй «друге дихання», забезпечивши стійкий збут за прийнятними цінами. Тобто паралельно із забезпеченням потреб країни в металопродукції з'являється можливість позбавити статусу депресивних цілі регіони країни, в яких зосереджено вугледобування.

Для зменшення впливу на довкілля технології виробництва заліза з використанням вугільного синтез-газу необхідні додаткові дослідження в напрямку пошуку шляхів насичення синтез-газу воднем.

Перспективною в умовах України також слід вважати технологію відновлення заліза воднем, який отримується шляхом електролізу води. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. The Technical Society, The Iron and Steel Institute of Japan. Production and Technology of Iron and Steel in Japan during 2022. *ISIJ International*. 2023. Vol. 63. No. 6. P. 951–969. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.63.951>
2. World Steel in Figures 2024. *The World Steel Association*. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
3. Хаустова В. Є. Промислова політика в Україні: формування та прогнозування: монографія. Харків: ВД «ІНЖЕК», 2015. 384 с.
4. План України: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 березня 2024 р. № 244-р. *Міністерство економіки України*. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=8f36a2d9-9611-4bff-8fa9-474da62bd28d&tag=PlanUkraini>
5. Iron and Steel Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking. *International Energy Agency*. 2020. 190 p. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
6. Метінвест доєднався до урядової платформи щодо зеленого відновлення металургії. *Мінпром*. 23.06.2023. URL: <https://minprom.ua/news/297227.html>
7. Україна та UNIDO підписали Програму зеленого відновлення промисловості України на 2024–2028 роки. *Урядовий портал*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-unido-pidpysaly-prohamu-zelenoho-vidnovlennia-promyslovosti-ukrainy-na-2024-2028-roky>
8. Відновлення України. Проекти нацпрограми. URL: <https://recovery.gov.ua/project/program/grow-value-adding-sectors-of-economy?page=2>
9. Залізородна сировина. *Metinvest*. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/semi-finished-products/iron-ore-concentrate>
10. Ferrexpo. *GМК Center*. URL: <https://gmk.center/manufacturer/ferrexpo-2/>
11. Будівництво заводу «Ворскла сталь» відкладено на 10 років. *FixyGen.ua*. 19.12.2018. URL: <https://www.fixygen.ua/news/20181219/proekt-stroitelstva.html>
12. Техніко-економічні засади створення підгалузі з виробництва рідкого синтетичного палива в Україні: кол. моногр. / М. О. Кизим, В. Є. Хаустова, В. В. Шпілевський та ін. Харків: ФОП Лібуркіна Л. М., 2022. 212 с.
13. Портал даних видобувної галузі України. URL: https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya_2022/

REFERENCES

- "Budivnytstvo zavodu «Vorskla stal» vidkladeno na 10 rokov" [The Construction of the "Vorskla Stal" Plant Has Been Postponed for 10 Years]. *FixyGen*. ua. December 19, 2018. <https://www.fixygen.ua/news/20181219/proekt-stroitelstva.html>
- "Ferrexpo". *GMK Center*. <https://gmk.center/manufacturer/ferrexpo-2/>
- "Iron and Steel Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking". *International Energy Agency*. 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
- Khaustova, V. Ye. *Promyslova polityka v Ukraini: formuvannia ta prohnozuvannia* [Industrial Policy in Ukraine: Formation and Forecasting]. Kharkiv: VD «INZhEK», 2015.
- Kyzym, M. O. et al. *Tekhniko-ekonomichni zasady stvorenna pidhaluzi z vyrobnytstva rikdoho syntetychnoho palyva v Ukraini* [Technical and Economic Principles of the Creation of a Sub-industry for the Production of Liquid Synthetic Fuel in Ukraine]. Kharkiv: FOP Liburkina L. M., 2022.
- [Legal Act of Ukraine] (2024). <https://www.me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=8f36a2d9-9611-4bff-8fa9-474da62bd28d&tag=PlanUkraini>
- "Metinvest doiednavsia do uriadovoi platformy shcho do zelenoho vidnovlennia metalurhii" [Metinvest Joined the Government's Platform on the Green Recovery of Metallurgy]. *Minprom*. June 23, 2023. <https://minprom.ua/news/297227.html>
- Portal danykh vydobuvnoi haluzi Ukrainy. https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya_2022/
- "The Technical Society, The Iron and Steel Institute of Japan. Production and Technology of Iron and Steel in Japan during 2022". *ISIJ International*, vol. 63, no. 6 (2023): 951-969. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.63.951>
- "Ukraina ta UNIDO pidpysaly Prohramu zelenoho vidnovlennia promyslovosti Ukrainy na 2024-2028 roky" [Ukraine and UNIDO Signed the Program for the Green Restoration of Ukraine's Industry for 2024-2028]. *Uriadovyi portal*. <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-unido-pidpysaly-prohramu-zelenoho-vidnovlennia-promyslovosti-ukrainy-na-2024-2028-roky>
- "Vidnovlennia Ukrainy. Proiekt natsprohramy" [Restoration of Ukraine. National Program Projects]. <https://recovery.gov.ua/project/program/grow-value-adding-sectors-of-economy?page=2>
- "World Steel in Figures 2024". *The World Steel Association*. <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
- "Zalizadorudna syrovyna" [Iron Ore Raw Materials]. *Metinvest*. <https://metinvestholding.com/ua/products/semi-finished-products/iron-ore-concentrate>