

# ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ЗАЛІЗА ВОДНЕМ

В.О. Шаповалов<sup>1</sup>, Д.М. Жиров<sup>1</sup>, В.Г. Могилатенко<sup>1,2</sup>, Ф.К. Біктагіров<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

<sup>2</sup>НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37

## РЕФЕРАТ

Розглянуто перспективи застосування плазмових технологій при відновленні заліза воднем у контексті декарбонізації чорної металургії. Проаналізовано термодинамічні та кінетичні особливості водневого відновлення оксидів заліза на основі фазових діаграм системи Fe–O–H та температурних залежностей вільної енергії Гіббса. Показано, що стадія переходу вуститу в металеве залізо є найбільш енергетично та кінетично несприятливою в умовах класичного твердофазного відновлення. Обґрунтовано переваги використання водневої плазми, яка завдяки формуванню активованих форм водню істотно інтенсифікує відновні реакції та знижує дифузійні обмеження. Розглянуто рідиннофазні воднево-плазмові процеси та проблеми їх масштабування, пов'язані з ерозією електродів, деградацією футеровки й стабільністю електричної дуги. Запропоновано гібридну технологічну схему, що поєднує твердофазне водневе відновлення з плазмовим довідновленням, як найбільш енергоефективний і технологічно доцільний шлях впровадження водневої металургії в промислових масштабах. Бібліогр. 30, рис. 3.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** залізо, декарбонізація металургії, водневе і воднево-плазмове відновлення, оксиди заліза, гібридні технологічні схеми, термодинаміка системи Fe–O–H, кінетика відновлення заліза

## ВСТУП

У сучасній світовій металургії спостерігається стійка тенденція до розвитку та впровадження позадоменних технологій відновлення заліза з рудної сировини. Така еволюція зумовлена комплексом взаємопов'язаних чинників, серед яких ключову роль відіграють обмеженість ресурсів коксівного вугілля, зростання його вартості, а також посилення екологічних вимог до промислових виробництв. Традиційний доменно-конверторний маршрут, що залишається домінуючим у світовій чорній металургії, неможливий без утворення значних обсягів вуглекислого газу, оскільки вуглець у ньому одночасно виконує функції відновника заліза з його оксидів та основного джерела теплової енергії [1].

З позицій декарбонізації металургійного виробництва найбільш привабливим альтернативним відновником є водень [2]. Водневе відновлення оксидів заліза принципово відрізняється від вуглецевого тим, що продуктами реакції є металеве залізо як цільовий матеріал та водяна пара як побічний продукт, що істотно знижує прямі викиди парникових газів. Водночас сумарний вуглецевий слід процесу визначається також непрямими викидами, пов'язаними з виробництвом електроенергії та водню. За умови використання електроенергії з відновлюваних джерел та зеленого водню, одержаного електролізом води, металургійний цикл

потенційно може бути трансформований у майже безвуглецевий технологічний ланцюг. Разом із тим реалізація водневих технологій у промислових масштабах стикається з низкою фундаментальних термодинамічних, кінетичних та енергетичних обмежень, що обумовлює необхідність застосування методів інтенсифікації процесу.

На сучасному етапі розвитку позадоменних процесів найбільшого промислового поширення набули технології відновлення у шахтних печах, зокрема Midrex та HYL/Energiron, які забезпечують отримання заліза прямого відновлення (DRI). У таких агрегатах реалізується принцип протитоку у взаємодії твердих залізородних матеріалів (кускової руди або окатишів), що рухаються вниз під дією сили тяжіння, та висхідного потоку гарячого відновлювального газу. Традиційно відновлювальним агентом у цих процесах є синтез-газ, одержаний шляхом конверсії природного газу, однак останніми роками активно досліджуються та впроваджуються схеми з повною або частковою заміною вуглецевісних газів молекулярним воднем [3].

Подальша переробка DRI зазвичай здійснюється в дугових сталеплавильних печах, що добре узгоджується з концепцією електрометалургії та низьковуглецевого виробництва сталі. Разом із тим охолодження DRI після вивантаження з шахтної печі та його повторний нагрів у дуговій печі супроводжуються додатковими енергетичними витратами, які знижують загальну енергоефективність процесу. Для мінімізації цих витрат розроблено технології використання гарячого заліза

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026.

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

прямого відновлення (HDRI) [4], що дозволяє зменшити споживання електроенергії в сталеплавильному агрегаті та скоротити непрямі викиди  $\text{CO}_2$ . Однак навіть у схемах HDRI зберігається проблема відносно низької швидкості твердофазного водневого відновлення, особливо на завершальних стадіях процесу.

## СТАН ПИТАННЯ

Відновлення заліза відповідно до діаграми стану залізо–кисень проводять при так званих середніх температурах. При температурах нижче 843 К [5] відновлення заліза відбувається за двоступінчастою схемою: гематит–магнетит–залізо, а вище за температуру 843 К — за тріступінчастою схемою: гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) — магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) — вюстит ( $\text{FeO}$ ) — залізо ( $\text{Fe}$ ).

Дослідження кінетики процесу відновлення [6] за дво- та тріступінчастими схемами показали, що константа швидкості відновлення  $\text{FeO}$  до  $\text{Fe}$  на два порядки вища, ніж  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  до  $\text{Fe}$ . Пов'язано це із кількома чинниками. Перший — це температура проведення процесу, що визначає величину коефіцієнта дифузії, а другий — низька пористість магнетиту, що перешкоджає доступу відновлювальної атмосфери до внутрішніх шарів оксиду. Природний магнетит практично не відновлюється через низьку пористість та утворення при відновленні щільних проміжних продуктів реакції [7]. У цих умовах дифузія газу відновника стає ланкою, що лімітує весь процес відновлення.

Враховуючи малу швидкість дифузії при температурах нижче 843 К, двостадійна схема відновлення заліза не має жодних переваг перед тріступінчастим відновленням. Крім цього, інтервал температур, в якому можливе високотемпературне відновлення, має великий діапазон, що дає можливість вибрати оптимальну температуру процесу, уникнути спікання та прискорити твердофазне відновлення заліза.

Водневе відновлення оксидів заліза описується фазовою діаграмою системи  $\text{Fe-O-H}$ , яка визначає області стабільності оксидів  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  та металевого заліза залежно від температури та парціального тиску водню (рис. 1) [7, 8].

У лівій частині діаграми за низьких значень  $\text{H}_2\text{O}(\text{CO}_2)/(\text{H}_2(\text{CO})+\text{H}_2\text{O}(\text{CO}_2))$ , тобто за відновлювальних умов, термодинамічно стабільною фазою є металеве залізо. Зі зростанням ступеня окиснювальної здатності газової фази відбувається послідовний перехід стабільних фаз від  $\text{Fe}$  до вюститу ( $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ ), далі до магнетиту ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) і, за найбільш окиснених умов, до гематиту ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Пунктирні лінії, що відповідають системі  $\text{Fe-H-O}$ , відобра-

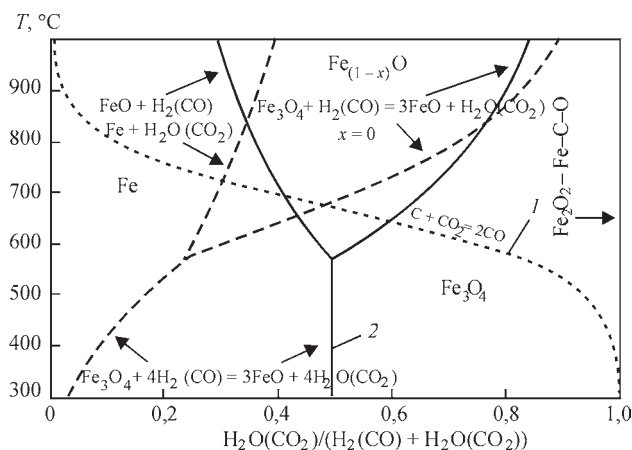
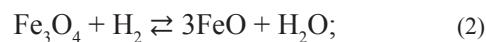


Рис. 1. Фазова діаграма систем  $\text{Fe-H-O}$  та  $\text{Fe-C-O}$  у координатах температура–ступінь окиснювальної здатності газової фази [7, 8]: 1 — система  $\text{Fe-H}_2\text{-O}$ ; 2 —  $\text{Fe-C-O}$

жають рівновагу реакцій водневого відновлення, зокрема переходи  $\text{FeO} \rightleftharpoons \text{Fe}$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightleftharpoons \text{FeO}$ . Суцільні лінії для системи  $\text{Fe-C-O}$  демонструють аналогічні рівноважні межі для відновлення оксидів заліза монооксидом вуглецю. Діаграма наочно демонструє ключову роль температури — з її зростанням на діаграмі системи  $\text{Fe-H-O}$  області стабільності металевого заліза та вюститу розширюються в бік більш окиснених газових сумішей.

Термодинаміка водневого відновлення оксидів заліза визначається послідовністю наступних рівноважних реакцій:



Для кожної з наведених реакцій умови рівноваги визначаються зміною вільної енергії Гіббса  $\Delta G(T)$ .

Розраховані температурні залежності зміни вільної енергії реакцій (1), (2) та (3) наведено на рис. 2 [9].

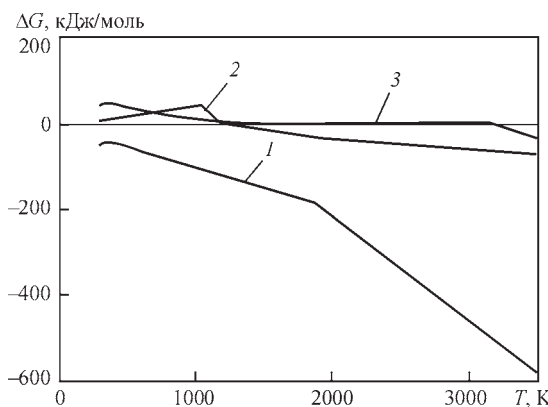


Рис. 2. Зміна вільної енергії реакцій 1, 2 та 3 з температурою

З аналізу температурних залежностей  $\Delta G(T)$  випливає, що найбільш термодинамічно стабільною оксидною фазою в системі Fe–O–H у широкому інтервалі температур є вюстит (FeO). Саме стадія  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  характеризується найменш сприятливими значеннями  $\Delta G$  та потребує підвищеного відновного потенціалу газової фази. Рівновага реакції настає при двох температурах: спочатку при 1358 К, а потім при 3158 К. Всередині цього інтервалу температур зміна вільної енергії реакції (3) коливається від невеликих негативних до невеликих позитивних значень і тільки при перевищенні 3158 К починається дуже повільна реакція відновлення вюститу до заліза.

Умови рівноваги для реакції (3) визначаються співвідношенням парціальних тисків водяної пари та водню ( $p_{(\text{H}_2\text{O})}/p_{(\text{H}_2)}$ ).

Зростання парціального тиску водяної пари в реакційному об'ємі призводить до зсуву рівноваги в бік оксидної фази, що стає особливо критичним на завершальних стадіях твердофазного відновлення і зумовлює необхідність або інтенсивного відведення  $\text{H}_2\text{O}$  з реакційної зони, або принципової зміни хімічного стану відновника.

Багато вчених [7, 10–14] вивчали вплив складу газу на кінетику відновлення оксиду заліза з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до FeO та Fe за допомогою газової суміші CO та  $\text{H}_2$  в діапазоні температур 700...1273 К. Основні висновки цих та інших робіт викладено нижче.

Відновлення залізняку чистим воднем у шахтній печі прямого відновлення прискорюється порівняно з реакцією з CO. При 1123 К відновлювальний потенціал  $\text{H}_2$  і CO майже однакові, але швидкість відновлення воднем набагато вища. Так, повне відновлення котунів  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  діаметром 10...12 мм може бути досягнуто через 15 хв у разі  $\text{H}_2$ , а при використанні CO ступінь відновлення знаходилася в межах 50 %. Зазначається, що при відновленні рудних котунів воднем реакція йде швидше, ніж із CO, і в лабораторних умовах досягається повна металізація. Зі збільшенням вмісту  $\text{H}_2$  в газовій суміші та підвищенням температури ступінь та швидкість реакції відновлення збільшуються. При температурах вище 1273 К швидкість реакції збільшуватиметься з підвищенням вмісту водню, але оптимальне співвідношення  $\text{H}_2/\text{CO}$  становить 1,6. При вищих співвідношеннях вплив температури знижується. Оптимальними можна вважати температури між 1073 і 1223 К [7, 10, 12–14]. Вища температура відновлення звичайно краща тому, що зазвичай прискорює процес [10, 15]. Але за більш високих температур ущільнення відновленого заліза внаслідок спікання викликає зменшення швидкості реакції [10, 16] і кінетичні

фактори уповільнюють процес твердофазного відновлення в цілому.

На сучасному етапі розвитку безвуглецевої металургії особлива увага приділяється методам інтенсифікації відновних реакцій, здатним забезпечити істотне прискорення процесу без пропорційного зростання енергоспоживання. Одним із найбільш перспективних підходів у цьому контексті є застосування плазових джерел теплоти, зокрема електродугових плазмотронів.

## ПЛАЗМОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ

На відміну від традиційних електронагрівальних систем у плазових установках електрична енергія використовується не лише для генерації теплового потоку надвисокої щільності, але й для активації газоподібного відновника, якщо він одночасно виконує роль плазмоутворювального газу. У випадку водневої плазми це означає формування суміші молекулярного, атомарного та частково іонізованого водню, що принципово змінює як термодинамічні, так і кінетичні умови перебігу відновних реакцій [17–19]. Згідно з термодинамічними розрахунками дисоціація молекулярного водню починається при температурах понад 2700 °C, повністю завершується вище 5000 °C, тоді як процеси іонізації стають домінуючими за температур понад 15000 °C, що відповідає умовам плазової дуги [20]. Таким чином плазма поєднує функції інтенсивного джерела теплоти та високо реакційного хімічного середовища.

У випадку водневої плазми відновлення здійснюється не лише молекулярним воднем, а й активованими його формами ( $\text{H}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2^+$ ), для яких реакції відновлення FeO характеризуються значно більш негативними значеннями  $\Delta G^0$  у порівнянні з молекулярним  $\text{H}_2$ . Це термодинамічно еквівалентно зниженню ефективної температури відновлення на сотні градусів і пояснює можливість інтенсивного перебігу реакцій навіть за короткого часу контакту.

Кінетичні переваги електродугової водневої плазми зумовлені насамперед частковою дисоціацією молекулярного водню з утворенням атомарних частинок, для участі яких у відновленні оксидів заліза не потрібні додаткові енергетичні витрати на розрив зв'язку H–H. У результаті ефективна енергія активації процесу знижується, а стадії, що лімітують процес у цілому, зокрема перехід вюститу в металеве залізо, істотно прискорюються. Відновлювальна здатність водню в плазмі зростає у такому порядку:  $\text{H}_2 < \text{H} < \text{H}_3^+ < \text{H}_2^+ < \text{H}^+$ . Розраховані залежності зміни енергії Гіббса від температури показують, що за однакової темпе-

ратури відновлення FeO активованими формами водню ( $H$ ,  $H^+$ ) є значно вигіднішим порівняно з молекулярним воднем. Реакції, які за умов класичного водневого відновлення тривають десятки хвилин або години, у плазмовому середовищі можуть завершуватися за істотно коротший час [20].

Кінетика відновлення оксидів заліза у твердому стані традиційно описується моделлю ядра, що стискається (shrinking core model) [8], у межах якої швидкість процесу може лімітуватися однією з трьох стадій: хімічною реакцією на поверхні, дифузією газу через пористий шар продукту або внутрішньою дифузією в твердому тілі.

Для стадії  $FeO \rightarrow Fe$  в умовах класичного водневого відновлення швидкість процесу часто описується рівнянням [12]:

$$1 - (1 - X)^{(1/3)} = k \cdot t, \quad (6)$$

де  $X$  — ступінь відновлення;  $k$  — кінетичний коефіцієнт;  $t$  — час.

Експериментальні дані свідчать, що зі зростанням ступеня відновлення формується щільний металевий шар, який істотно знижує проникність для  $H_2$  та  $H_2O$ , переводячи процес у дифузійний режим. Це призводить до різкого зменшення швидкості після досягнення критичного ступеня відновлення (30...60 % залежно від температури). В умовах водневої плазми кінетична картина змінюється. Участь атомарного та іонізованого водню знижує ефективну енергію активації процесу та інтенсифікує поверхневу хімічну реакцію. Таким чином, застосування плазми дозволяє частково усунути дифузійні обмеження, характерні для твердофазного водневого відновлення [21].

Додатковою перевагою плазмових технологій є надзвичайно висока інтенсивність теплопередачі [22]. Локалізований характер дугового нагріву дозволяє за короткий час досягати необхідних температур і підтримувати їх у вузькому інтервалі, що має вирішальне значення для керування фазовим станом матеріалу та запобігання небажаним побічними реакціям. Гнучкість регулювання електричних параметрів дуги створює передумови для адаптації процесу до різних типів залізорудної сировини та для динамічної зміни режимів залежно від складу відновлювального газу й вимог до кінцевого продукту.

Залежно від агрегатного стану відновлюваної фази плазмові технології відновлення заліза доцільно поділяти на рідиннофазні та твердофазні. У рідиннофазних процесах, відомих під загальною назвою hydrogen plasma smelting reduction (HPSR), залізорудна сировина або попередньо відновлений матеріал переводяться у розплавлений

стан. Відновлення оксидів заліза відбувається безпосередньо в зоні дії електродугової плазми переважно за механізмом газ-рідина, що забезпечує високу інтенсивність масообміну та практично повне усунення твердофазних дифузійних обмежень [23, 24].

У більшості експериментальних досліджень HPSR застосовуються плазмотрони постійного струму прямої дії, у яких шлаковий або металевий розплав виконує роль анода, тоді як катод розміщується в корпусі плазмотрона [18, 20, 23, 25]. Така конфігурація забезпечує безпосередню передачу електричної енергії в реакційний об'єм і мінімізує теплові втрати. Високі локальні температури та щільності теплового потоку сприяють швидкому плавленню сировини, стабілізації рідкої фази та інтенсивній активації газового середовища над ванною. Додатковим фактором інтенсифікації є електромагнітне та гідродинамічне перемішування розплаву, що забезпечує вирівнювання температурного та концентраційного полів і постійне оновлення поверхні контакту газ-розплав.

Разом із тим рідиннофазні плазмові процеси характеризуються підвищеною чутливістю до електричних і геометричних параметрів дуги. Сила струму, напруга, довжина дуги, положення плазмотрона, міжелектродна відстань та тиск у камері істотно впливають на тепловий режим, ступінь дисоціації водню та стабільність процесу. Відхилення від оптимальних режимів може призводити до нестабільності дуги, локальних перегрівів, інтенсифікованого випаровування компонентів шлаку та зростання втрат заліза, що ускладнює масштабування технології.

Поряд із рідиннофазними процесами значну зацікавленість викликає плазмово-дугове водневе відновлення оксидів заліза в твердому стані [26]. У цьому випадку теплота підводиться за рахунок плазми, тоді як відновлення здійснюється активованим воднем, а вихідна сировина зберігає твердий агрегатний стан принаймні на початкових стадіях процесу. Плазма забезпечує швидке нагрівання частинок оксиду заліза або котунів та інтенсифікує поверхневі реакції. Водночас навіть за умов водневої плазми стадія переходу вуглецю в металеве залізо часто залишається повільною через формування щільного шару продукту реакції на поверхні матеріалу, що і зумовлює збереження дифузійних обмежень.

Незважаючи на значні термодинамічні та кінетичні переваги, воднево-плазмові технології характеризуються низкою матеріалознавчих аспектів, які істотно впливають на можливість їх промислового масштабування.

Однією з ключових проблем є ерозія електродів у середовищі водневої плазми [22]. Для графітових катодів характерним є інтенсифіковане хімічне випаровування та формування летких вуглеводневих сполук, тоді як мідні електроди зазнають термічного та електромагнітного зносу внаслідок високої щільності струму та локальних перегрівів.

Додатковим обмеженням є деградація футеровки реактора [23, 24], яка обумовлена одночасною дією високих температур, відновного газового середовища та агресивних шлакових фаз. Високий вміст водню також впливає на стабільність електричної дуги, спричиняючи її подовження, флуктуації напруги та підвищені теплові втрати [25].

Зазначені фактори вимагають оптимізації конструкції плазмотронів, вибору спеціальних електродних матеріалів та розробки адаптивних систем керування дугою, що є обов'язковою умовою переходу від лабораторних до промислових масштабів.

З огляду на це перспективним напрямом розвитку воднево-плазмових технологій є створення гібридних схем [27–29], у яких основна частина відновлення здійснюється класичними методами, тоді як плазма використовується для інтенсифікації найбільш повільних і енергетично критичних стадій процесу. Прикладом може бути поєднання шахтних печей відновлення воднем із плазмовими реакторами до відновлення.

Принципову технологічну схему гібридних процесів подано на рис. 3. Залізорудні матеріали подаються у агрегат попереднього твердофазного відновлення 1, наприклад шахтну піч. Частково металізоване у шахтній печі залізо перевантажується у плазмовий реактор рідиннофазного віднов-

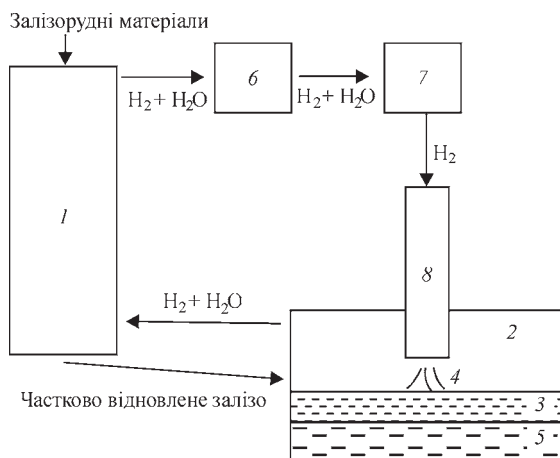


Рис. 3. Принципова технологічна схема гібридного процесу відновлення заліза воднем: 1 — агрегат попереднього твердофазного відновлення; 2 — плазмовий реактор рідиннофазного відновлення; 3 — шлак; 4 — воднева плазма; 5 — рідке залізо; 6 — агрегат очистки газу; 7 — агрегат осушки газу; 8 — плазмотрон [27–29]

лення 2, де у шлаковому шарі 3 відбувається його остаточне відновлення активованим у плазмі 4 воднем. Одержане металеве залізо накопичується у нижній частині ванни 5. Суміш водню і водяної пари, яка утворилась в результаті рідиннофазного відновлення заліза воднем, подається у агрегат попереднього твердофазного відновлення, де вона використовується у якості відновлювача. Газ, що відходить з агрегату попереднього твердофазного відновлення, є сумішшю водню і водяної пари. Тому після очистки 6 і осушки 7 водень може бути знову направлений у плазмовий реактор у якості плазмоутворювального газу.

Загальні енергетичні витрати процесу відновлення можуть бути подані у вигляді балансу:

$$E_{tot} = E_{heat} + E_{red} + E_{phase} + E_{loss} - E_{rec}, \quad (7)$$

де  $E_{tot}$  — загальні енергетичні витрати;  $E_{heat}$  — витрата енергії на нагрів матеріалів;  $E_{red}$  — витрата енергії безпосередньо на процес відновлення;  $E_{phase}$  — витрата енергії на фазові перетворення (плавлення);  $E_{loss}$  — незворотні втрати енергії;  $E_{rec}$  — енергія, яка може бути повернута у процес шляхом рециклінгу.

Енергетична доцільність застосування плазми визначається її здатністю зменшувати окремі складники цього балансу за рахунок скорочення тривалості процесу, зниження загальної температури в агрегаті або підвищення ступеня металізації на попередніх стадіях твердофазного відновлення. У гібридних схемах (HDRI + HPSR, шахтна піч + HPSR) плазма може виконувати функцію інтенсивного локального джерела теплоти для найбільш енергетично та кінетично критичних стадій, що дозволяє знизити сумарні втрати та покращити загальний енергетичний баланс.

Згідно з експериментальними дослідженнями та термодинамічними розрахунками [7, 13, 14] твердофазне відновлення є ефективним на початкових стадіях перетворення гематиту та магнетиту, однак стадія  $FeO \rightarrow Fe$  характеризується різким зниженням швидкості та ефективності використання водню. Показано [11, 12, 16], що після досягнення ступеня відновлення приблизно 30...60 % (залежно від температури процесу) ефективність твердофазного відновлення суттєво падає, тоді як плазмове відновлення забезпечує значно вищу швидкість та стабільність процесу.

Гібридний підхід дозволяє істотно скоротити сумарні витрати водню. Так, при комбінованій схемі твердофазного відновлення до критичної точки та подальшому HPSR сумарне споживання водню може бути зменшене більш ніж у два рази порівняно з виключно твердофазним водневим

відновленням. Крім того, попереднє часткове відновлення оксидів заліза позитивно впливає на стабільність плазмової дуги, знижує розбрикування розплаву та знос футеровки реактора [21].

Гібридні схеми дозволяють поєднати високу ефективність використання водню, притаманну твердофазному відновленню на початкових стадіях, із кінетичними та термодинамічними перевагами плазових процесів на завершальних етапах  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ . Такий підхід мінімізує вплив матеріалознавчих обмежень HPSR, знижує тривалість роботи плазового агрегату та покращує загальний енергетичний баланс процесу.

Таким чином, гібридні схеми поєднують високу ефективність використання водню з кінетичними та технологічними перевагами плазових процесів і можуть розглядатися як один з найбільш перспективних шляхів реалізації водневої металургії в промислових масштабах.

Прикладом комплексних досліджень у напрямку HPSR, який підтверджує значущість і перспективність досліджень використання водневої плазми у чорній металургії, є проєкт Horizon Europe H2PlasmaRed (Grant Agreement No. 101138228) [30]. HPSR розглядається як одна з ключових технологій для реалізації стратегічних цілей Європейського зеленого курсу та ініціативи Clean Steel Partnership, здатних забезпечити мінімізацію викидів  $\text{CO}_2$  у чорній металургії до 2050 р. за умови використання відновлюваного водню та електроенергії з низьковуглецевих джерел.

Особливістю підходу H2PlasmaRed є орієнтація не лише на лабораторні дослідження, а й на пілотну масштабну демонстрацію технології з урахуванням вимог промислової інтеграції.

Важливим аспектом є також відповідність HPSR принципам рециклінгу. Проєкт H2PlasmaRed передбачає використання не лише первинної рудної сировини, але й залізовмісних побічних продуктів металургійного виробництва (пилу, шлаків), що дозволяє зменшити споживання природних ресурсів і сукупний вуглецевий слід виробництва сталі.

Окрему увагу в межах проєкту приділено розвитку контролю процесу та цифровізації HPSR [2]. Передбачається впровадження сучасних сенсорних систем і методів діагностики плазми для оптимізації режимів відновлення в реальному часі, що є критично важливим для масштабування воднево-плазових технологій до промислового рівня.

Таким чином, включення HPSR у дорожні карти Horizon Europe та Clean Steel Partnership підтверджує стратегічну значущість даного напрямку та обґрунтовує доцільність подальших фундамен-

тальних і прикладних досліджень воднево-плазового відновлення заліза.

## ВИСНОВКИ

1. Показано, що водневе відновлення заліза є перспективною основою для декарбонізації чорної металургії, однак у класичних твердофазних процесах воно обмежується термодинамічними та кінетичними чинниками, насамперед на стадії переходу вуглиту у металеве залізо.

2. На основі аналізу фазових діаграм системи  $\text{Fe-O-H}$  та температурних залежностей вільної енергії Гіббса встановлено, що саме стадія  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  характеризується найменш сприятливими умовами рівноваги та обмежує процес відновлення в цілому в умовах молекулярного водню.

3. Застосування електродугової водневої плазми принципово змінює термодинамічні й кінетичні умови відновлення за рахунок формування активованих форм водню ( $\text{H}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2^+$ ), що знижує ефективну енергію активації процесу та істотно прискорює відновлення оксидів заліза.

4. Рідиннофазні воднево-плазові процеси типу hydrogen plasma smelting reduction практично усувають дифузійні обмеження, характерні для твердофазного відновлення, та забезпечують високу інтенсивність масо- і теплопереносу.

5. Обґрунтовано доцільність розвитку гібридних технологічних схем, у яких поєднуються твердофазне водневе відновлення на початкових стадіях і плазове довідновлення на завершальному етапі  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Azimi, A., Van der Spek, M. (2025) Prospective life cycle assessment suggests direct reduced iron is the most sustainable pathway to net-zero steelmaking. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 64(7), 3871–3885. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03321>
2. Pauna, H., Ernst, D., Zarl, M. et al. (2022) Hydrogen plasma smelting reduction process monitoring with optical emission spectroscopy — Establishing the basis for the method. *J. of Cleaner Production*, 372, 133755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133755>
3. Yu, S., Shao, L., Zou, Z. (2024) A numerical study on the process of the  $\text{H}_2$  shaft furnace equipped with a center gas distributor. *Processes*, 12(3), 444. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12030444>
4. Markotić, A., Dolić, N., Trujić, V. (2002) State of the direct reduction and reduction smelting processes. *J. of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 38(3–4), 123–141. DOI: <https://doi.org/10.2298/JMMB0204123M>
5. Shurkhal, V.Ya., Larin, V.K., Chernega, D.F. et al. (2000) *Physics-chemistry of metallurgical systems and process: Manual*. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Ukrainian].
6. Tang, Q., Huang, K. (2022) Determining the kinetic rate constants of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -to-Fe and  $\text{FeO}$ -to-Fe reduction by  $\text{H}_2$ .

- Chemical Engineering J.*, **434**, 134771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134771>
7. Spreitzer, D., Schenk, J. (2019) Reduction of iron oxides with hydrogen — A review. *Steel Research Inter.*, **90**(10), 1900108. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201900108>
  8. Miškovičová, Z., Legemza, J., Demeter, P. et al. (2024) An overview analysis of current research status in iron oxides reduction by hydrogen. *Metals*, **14**, 589. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14050589>
  9. Shapovalov, V.O., Mogylenko, V.G., Biktagirov, F.K., Kozin, R.V. (2023) Analysis of direct reduction of iron by hydrogen. In: *Proc. of 15<sup>th</sup> Inter. Sci.-Techn. Conf. on New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*, 27–28 April 2023, Kyiv, 33–40. [https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya\\_2023.pdf](https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf)
  10. Ranzani da Costa, A., Wagner Wagner, D., Patisson, F. (2013) Modelling a new, low CO<sub>2</sub> emissions, hydrogen steelmaking process. *J. of Cleaner Production*, **46**, 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.045>
  11. Zuo, H.B., Wang, C., Dong, J.J. et al. (2015) Reduction kinetics of iron oxide pellets with H<sub>2</sub> and CO mixtures. *Inter. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, **22**(7), 688–696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1123-x>
  12. Liu, D., Wang, X., Zhang, J. et al. (2017) Study on the controlling steps and reduction kinetics of iron oxide briquettes with CO–H<sub>2</sub> mixtures. *Metallurgical Research & Technology*, **114**(6), 611. DOI: <https://doi.org/10.1051/met-al/2017072>
  13. Heidari, A., Niknahad, N., Iljana, M., Fabritius, T. (2021) A review on the kinetics of iron ore reduction by hydrogen. *Materials*, **14**(24), 7540. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247540>
  14. Patisson, F., Mirgaux, O., Birat, J.-P. (2021) Hydrogen steelmaking. Pt 1: Physical chemistry and process metallurgy. *Matériaux & Techniques*, **109**(3–4), 303–313. DOI: <https://doi.org/10.1051/mattech/2021025>
  15. El-Hussiny, N.A., Rafi, M., Abd El-Gawad, H.H., Shalabi, M.E.H. (2016) Pelletization of El-Dekhila iron oxide waste and reduced it by hydrogen gas. *Inter. J. of Scientific & Engineering Research*, **7**(2), 575–581. <https://www.researchgate.net/publication/299308916>
  16. Kuila, S.K., Chatterjee, R., Ghosh, D. (2016) Kinetics of hydrogen reduction of magnetite ore fines. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **41**(22), 9256–9266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.075>
  17. Satritama, B., Cooper, C., Fellicia, D. et al. (2024) Hydrogen plasma for low-carbon extractive metallurgy: Oxides reduction, metals refining and wastes processing. *J. of Sustainable Metallurgy*, **10**, 1845–1894. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00915-1>
  18. Zhang, J., Peng, Z., Zhang, T. et al. (2025) Hydrogen plasma reduction of iron oxides. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **105**, 910–920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.322>
  19. Sabat, K.C., Murphy, A.B. (2017) Hydrogen plasma processing of iron ore. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **48**(3), 1561–1594. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-017-0957-1>
  20. Naseri Seftjani, M., Schenk, J. (2018) Thermodynamic of liquid iron ore reduction by hydrogen thermal plasma. *Metals*, **8**, 1051. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8121051>
  21. Souza Filho, I.R., Ma, Y., Kulse, M. et al. (2021) Sustainable steel through hydrogen plasma reduction of iron ore: Process, kinetics, microstructure, chemistry. *Acta Materialia*, **213**, 116971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116971>
  22. Boulos, M.I., Fauchais, P., Pfender, E. (1994) *Thermal plasmas: Fundamentals and applications*. New York, Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1337-1>
  23. Hiebler, H., Plaul, J.F. (2004) Hydrogen plasma smelting reduction — An option for steelmaking in the future. *Metalurgija*, **43**(3), 155–162. <https://hrcak.srce.hr/file/189387>
  24. Shelyug, A., Pauna, H., Springer, H., Souza Filho, I.R. (2025) Puppet strings of hydrogen plasma reduction of iron ores: The impact of process parameters on plasma properties and reduction kinetics. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **56**, 5232–5245. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03698-2>
  25. Figueiredo, J.N., Dally, B.B., Lacoste, D.A. (2025) From pure H<sub>2</sub> to H<sub>2</sub>–CO<sub>2</sub> mixtures: A study of reductant strategies in plasma iron smelting reduction. *Applications in Energy and Combustion Science*, **24**, 100401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100401>
  26. Sabat, K.C. (2021) Physics and chemistry of solid state direct reduction of iron ore by hydrogen plasma. *Physics and Chemistry of Solid State*, **22**(2), 292–300. DOI: <https://doi.org/10.15330/pess.22.2.292-300>
  27. Adami, B., Hoffelner, F., Zarl, M.A., Schenk, J. (2025) Strategic selection of a pre-reduction reactor for increased hydrogen utilization in hydrogen plasma smelting reduction. *Processes*, **13**, 420. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13020420>
  28. Ernst, D., Manzoor, U., Souza Filho, I.R. et al. (2023) Impact of iron ore pre-reduction degree on the hydrogen plasma smelting reduction process. *Metals*, **13**, 558. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13030558>
  29. Zhyrov, D.M. (2011) Features of process of plasma-arc liquid-phase reduction of iron by gases: PhD thesis abstract, specialty 05.16.02. Kyiv, E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
  30. Putaala, H.-R., Pauna, H., Javed, A. et al. (2025) Effect of furnace parameters on optical emission spectra of hematite reduction by hydrogen plasma. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **56**, 3381–3397. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03552-5>

## PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF PLASMA TECHNOLOGIES IN HYDROGEN-BASED IRON REDUCTION

V.O. Shapovalov<sup>1</sup>, D.M. Zhyrov<sup>1</sup>, V.G. Mogylenko<sup>1,2</sup>, F.K. Biktagirov<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

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
37 Prospect Beresteyskyi, 03056, Kyiv, Ukraine

### ABSTRACT

This paper examines the prospects of applying plasma technologies to hydrogen-based iron reduction in the context of ferrous metallurgy decarbonization. The thermodynamic and kinetic features of hydrogen reduction of iron oxides are analyzed based

on Fe–O–H phase diagrams and temperature dependences of Gibbs free energy. It is shown that the stage of reduction from wüstite to metallic iron is the most energetically and kinetically unfavorable under conventional solid-state reduction conditions. The advantages of hydrogen plasma application are substantiated, which owing to formation of activated hydrogen species significantly intensifies the reduction reactions and reduces diffusion limitations. Liquid-phase hydrogen plasma reduction processes and the challenges associated with their industrial scale-up, including electrode erosion, refractory degradation, and electric arc stability, are considered. A hybrid technological route combining solid-state hydrogen reduction with plasma-assisted final reduction is proposed as the most energy-efficient and technologically feasible pathway for implementing hydrogen metallurgy on an industrial scale.<sup>30</sup> Ref., 3 Fig.

**KEYWORDS:** iron, steel industry decarbonization, hydrogen reduction, hydrogen plasma reduction, iron oxides, hybrid technological routes, Fe–O–H thermodynamics, iron reduction kinetics

#### ORCID

В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, Д.М. Жиров — <https://orcid.org/0000-0002-9435-8075>,  
В.Г. Могилатенко — <https://orcid.org/0000-0002-6550-2058>, Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>,  
В.Р. Бурнашев — <https://orcid.org/0000-0001-6807-3810>

#### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

#### АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

В.Г. Могилатенко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vmogilatenko@gmail.com

#### РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.О. Шаповалов, Д.М. Жиров, В.Г. Могилатенко, Ф.К. Біктагіров, В.Р. Бурнашев (2026) Перспективи застосування плазмових технологій при відновленні заліза воднем. *Сучасна електрометалургія*, **03**, 24–31.

DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.03.04>

#### ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 11.05.2026

Отримано у переглянутому вигляді 17.06.2026

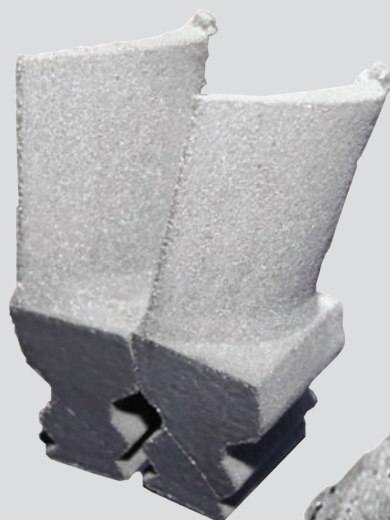
Затверджено до друку 14.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026

## РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ

### АДИТИВНІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 3D ВИРОБИ



Лопатка ГТД



Деталь ГТД



Краніальний імплантат



Деталь ГТД