

ОГЛЯД ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ЗАЛІЗА ШЛЯХОМ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

В.О. Шаповалов, Д.М. Жиров, Ф.К. Біктагіров, О.В. Гнатушенко, В.В. Барабаш, А.П. Ігнатов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: biktagirfk@ukr.net

У зв'язку з нагальною потребою декарбонізації металургійного виробництва особливого значення набуває розроблення безвуглецевих технологій відновлення заліза. Зазначено, що використання водню у якості відновника з тих чи інших причин, у тому числі пов'язаних з вартістю та питаннями безпеки, на даний час для отримання заліза з рудної сировини практично не застосовується. Роботи у даному напрямку знаходяться на стадії досліджень. Більш привабливими в цьому відношенні є електролітичні методи вилучення заліза з його оксидів, що перебувають на різних стадіях наукових досліджень та технологічного впровадження. Розглянуто особливості основних процесів електролітичного відновлення заліза з рудної сировини, зокрема високотемпературні технології Molten Oxide Electrolysis та ULCOLYSIS, а також низькотемпературні процеси ULCOWIN і SIDERWIN. У перших як електроліт використовується оксидний розплав з оксидів кремнію, алюмінію та магнію при температурі 1550...1600 °С, у нього подається оксид заліза і при проходженні струму відбувається виділення на катоді заліза, а на аноді — кисню. Проведеними дослідженнями встановлені основні технологічні параметри такого процесу, як склад оксидного розплаву, сила струму і напруга, оптимальний вміст оксиду заліза. Незважаючи на труднощі з вибором матеріалів стійких при високих температурах для реактора та електродів, технологія з лабораторних досліджень пройшла у стадію дослідно-промислового виробництва. Низькотемпературний електроліз оксиду заліза проводиться при температурі 100...110 °С у лужному середовищі. Ця технологія має нижчу продуктивність порівняно з високотемпературною, але її перевагою є менші витрати електроенергії, а також капітальні та експлуатаційні витрати. У теперішній час проводяться інтенсивні роботи по вдосконаленню процесу з перспективою будівництва заводу для виробництва заліза шляхом низькотемпературного електролізу. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: викиди CO₂, водень, зелені технології, електроліз заліза, Molten Oxide Electrolysis, ULCOWIN, ULCOLYSIS, SIDERWIN

Вступ. Виробництво чавуну та сталі є одним із найбільших джерел глобальних викидів вуглекислого газу, на яке припадає близько 7 % усіх антропогенних викидів CO₂. Основною причиною цього є використання вуглецю як відновника заліза з оксидів [1]. Сьогодні доменне виробництво залишається домінуючим способом одержання сталі з залізорудної сировини. Залізо відновлюється у доменній печі з утворенням чавуну, який далі переробляється в сталь, переважно у кисневому конверторі. Через технологічні особливості цих процесів суттєве зниження викидів CO₂ в їх умовах є практично неможливим.

Значне скорочення викидів CO₂ у чорній металургії можливе лише за умови використання відновника, що не містить вуглецю. Найперспективнішим з огляду на доступність, екологічність, вартість та ефективність відновлення заліза є водень.

Існує кілька основних способів одержання водню, кожен з яких має свої переваги, недоліки й перспективи застосування. Ці методи відрізняються за джерелами сировини, енергетичними витратами, рівнем викидів вуглекислого газу та рівнем зрілості технології.

Найпоширенішим на сьогодні є метод отримання водню шляхом парової конверсії метану або так званій сірий водень [2]. Він полягає в тому, що метан із природного газу реагує з водяною парою при високій температурі, утворюючи водень та вуглекислий газ. Цей процес є економічно вигідним і добре відпрацьованим у промисловості, але має суттєвий недолік — супроводжується великими викидами CO₂, що робить його неприйнятним з екологічної точки зору.

Варіантом цієї технології є синій водень [3] — той же паровий риформінг метану, але з уловлюванням та зберіганням вуглекислого газу. Це дозволяє знизити викиди, проте не усунути їх повністю. Крім того, синій водень залежить від інфраструктури для транспортування та зберігання CO₂, що підвищує загальну вартість процесу.

Найекологічнішим способом вважається так званій зелений водень [4], що одержується шляхом електролізу води, тобто розщеплення молекул H₂O під дією електричного струму. Якщо електроенергія при цьому надходить із відновлюваних джерел, таких як вітер або сонце, то процес не має жодних викидів парникових газів. Проте основним недоліком зеленого водню є його висока

В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, Д.М. Жиров — <http://orcid.org/0000-0002-9435-8075>,
Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>, О.В. Гнатушенко — <https://orcid.org/0000-0002-0328-0875>,
В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, А.П. Ігнатов — <https://orcid.org/0009-0004-4738-8476>

собівартість, зумовлена дорогими електролізерами та вартістю електроенергії.

Ще один перспективний метод — піроліз метану [5]. У цьому випадку метан розщеплюється термічно без участі кисню, що дозволяє уникнути утворення CO_2 . Натомість утворюється водень і твердий вуглець, який можна зберігати або використовувати як сировину. Цей метод потенційно може бути ефективним і екологічним, але він ще перебуває на ранній стадії впровадження, і його масштабування потребує додаткових розробок.

Водень також можна отримувати з вугілля [6] або біомаси [7] шляхом газифікації, внаслідок якої утворюється синтез-газ (суміш H_2 і CO), з якого потім можна виділити водень. Такий метод дозволяє використовувати доступну сировину, однак супроводжується високими викидами CO_2 і вимагає складного очищення отриманого газу.

Таким чином, кожен спосіб має свої переваги і недоліки. Методи, які дозволяють повністю уникнути викидів CO_2 , є найбільш дорогими. Через це відбувається пошук екологічно чистих технологічних схем одержання заліза з рудної сировини без використання водню. У цьому відношенні такими можуть бути електролітичні методи вилучення заліза з його оксидів.

Аналіз методів електролітичного одержання заліза з залізородної сировини. Виробництво заліза шляхом електролізу є перспективним напрямом, який дозволяє значно знизити викиди CO_2 порівняно з традиційними методами, які базуються на використанні вуглецю. Існує кілька підходів до електролітичного виробництва заліза, які перебувають на різних стадіях досліджень та впроваджень.

Однією з найбільш перспективних і близьких до промислового впровадження є технологія Molten Oxide Electrolysis (МОЕ), яка розробляється у Масачусетському технологічному інституті [8–11]. Вона ґрунтується на електрохімічному розкладанні оксидів заліза в розплавленому електроліті при температурі близько 1550°C . У цьому процесі залізна руда розчиняється в оксидному шлаку (SiO_2 –

Al_2O_3 – MgO – CaO) і під дією електричного струму відновлюється на катоді до рідкого металевого заліза, тоді як на аноді виділяється кисень. Розплавлені оксидні системи, які можуть виконувати роль електроліту, мають низку переваг. Вони забезпечують високу концентрацію іонів Fe^{2+} , яка значно перевищує показники у традиційних водних або соляних електролітах. Втім висока температура висуває надзвичайні вимоги до вибору матеріалів як для реактора, так і для електродів.

Було проведено дослідження з метою визначення оптимальної концентрації оксиду заліза у силікатному шлаку, яка забезпечує найкращу продуктивність [11]. Використовувався розплав з оксидів кремнію, алюмінію та магнію з відношенням базових компонентів SiO_2 — 66 %, Al_2O_3 — 20 % та MgO — 14 %, який має температуру плавлення близько 1400°C . До нього додавали до 10 % Fe_3O_4 та встановили, що зі зростанням концентрації оксидів заліза в розплаві підвищується питома електропровідність електроліту, що сприяє зниженню омичного опору і підвищенню ефективності процесу (рис. 1). При вмісті оксидів заліза до 7,5 % є перепони, пов'язані з масопереносом іонів Fe^{2+} до катода, що обмежує густину струму. Натомість, за концентрації понад 7,5 %, швидкість обмежується електродною кінетикою, а не масопереносом, що дозволяє досягти більш стабільного і потужного процесу (рис. 2). Тобто для промислового отримання рідкого заліза методом електролізу із розплавлених оксидів бажано підтримувати концентрацію оксидів заліза понад 7,5 %. Це дозволяє уникнути масопереносних обмежень, досягти густини струму до $1,4\text{ A/cm}^2$ і зберегти анодну ефективність. У діапазоні напруг $1,0 \dots 1,5\text{ В}$ процес відбувається ефективно. Нижня межа відповідає розкладанню оксиду заліза, тоді як вища межа визначена розкладанням SiO_2 , що є небажаним.

Проблемою залишається вибір інертного аноду — матеріалу, який міг би стабільно працювати при високих температурах, не вступаючи в хімічну реакцію з киснем. Графіт, який традиційно використовується при електролізі алюмінію, тут є неприйнятним, бо призводить до утворення CO_2 , що суперечить меті процесу. Перспективними вважаються оксидні аноди або сплави на основі іридію чи хрому. Іридієвий анод поводить себе як інертний, тобто не розчиняється у розплаві, не вступає у небажані хімічні реакції та зберігає свою механічну цілісність навіть за екстремальних умов. Виявлено, що поверхня анода частково окислюється з утворенням оксидів, які при високій температурі далі розкладаються, звільняючи кисень і залишаю-

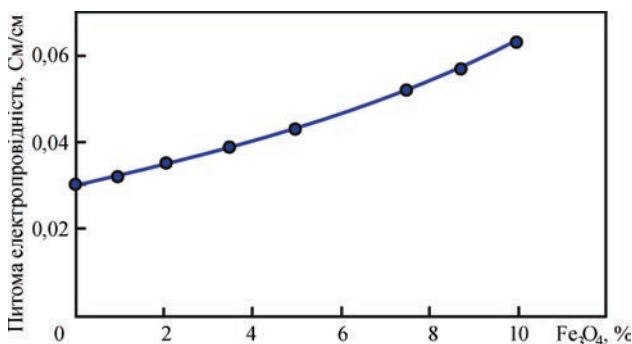


Рис. 1. Залежність питомої електропровідності шлакового розплаву від вмісту оксиду заліза

чи металічний іридій недоторканим. Цей механізм автори назвали оксид-опосередкованим інертним анодом (oxide-mediated inert anode), що дозволяє підтримувати постійне електрохімічне виділення кисню без деградації анода.

Теоретично мінімальна потреба в електроенергії становить приблизно 2600 кВт·год на тону заліза, але з урахуванням практичних теплових і електрохімічних втрат очікувана потреба в електроенергії складає близько 3700 кВт·год/т.

Комерційна реалізація технології наразі просувається компанією «Boston Metal». У березні 2025 р. вона успішно ввела в експлуатацію промислову електролітичну комірку з інертним анодом, підтвердивши масштабованість процесу для виробництва зеленої сталі [12].

Технологія високотемпературного електролізу ULCOLYSIS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking via Molten Oxide Electrolysis) — частина європейської ініціативи ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking), яка спрямована на одержання рідкого заліза без використання викопного палива [13] і є подібною до МОЕ. У рамках проекту IERO (Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation) було досліджено можливість безпосереднього електрохімічного відновлення заліза з його оксидів у розплавленому шлаковому середовищі при температурі близько 1600 °С.

Шлаковий розплав, до складу якого входять SiO₂, Al₂O₃ та MgO приблизно у тому же відношенні, що наводилося раніше, виконує функцію електроліту. Він забезпечує достатню текучість, стабільність та сприяє перенесенню іонів заліза в напрямку катода.

Особлива увага в дослідженні приділялась матеріалам аноду. Було розроблено керамічні аноди на основі шпінелей, зокрема Fe_{2,6}Ti_{0,2}Mg_{0,2}O₄ або Fe_{2,6}Al_{0,2}Mg_{0,2}O₄, які виявили високу термостійкість, електропровідність та стабільність за екстремально високих температур. Під час процесу на аноді виділяється кисень, але вуглекислий газ не утворюється, що забезпечує екологічну чистоту процесу.

У межах лабораторних випробувань було підтверджено можливість отримання рідкої сталі з високою ефективністю. Витрати електроенергії становили приблизно 4028 кВт·год на тону сталі, що є прийнятним показником для такого рівня процесу. Загальні викиди CO₂, розраховані для цього процесу, становили всього 73 кг/т сталі, що майже в 27 разів менше, ніж у традиційній доменній технології (1945 кг/т).

Було змодельовано термобаланс пілотної електролітичної комірки з діаметром 30 см, який довів життєздатність масштабування технології за умови вирішення ряду технічних викликів, зокрема, під-

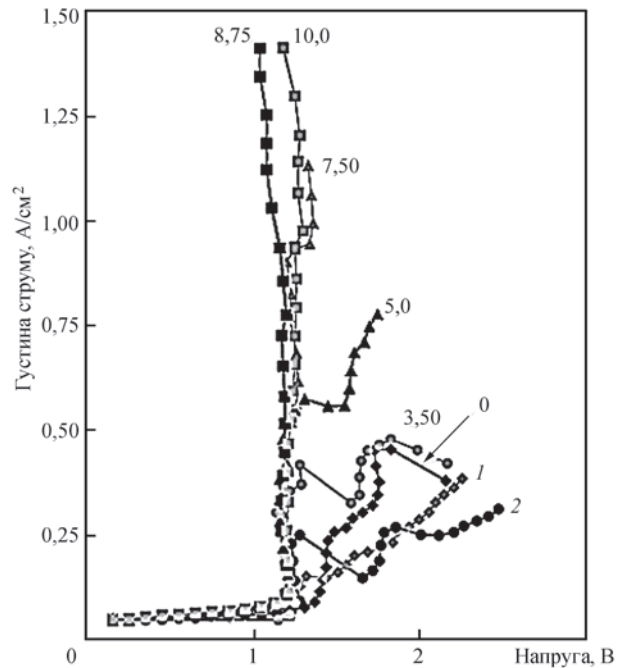


Рис. 2. Залежність густини струму від напруги. Числа біля кривих — концентрації оксиду заліза у шлаковому розплаві вищезгаданого довшовічного вогнетривів (розглядаються глинозем, кварц, а також гарнісаж, утворений шлаковим розплавом), ефективного виведення продуктів реакції, а також економічної оптимізації обладнання.

Виходячи з описів технологій МОЕ та ULCOLYSIS, принципова технологічна схема одержання заліза зі шлакового розплаву методом електролізу виглядає наступним чином (рис. 3).

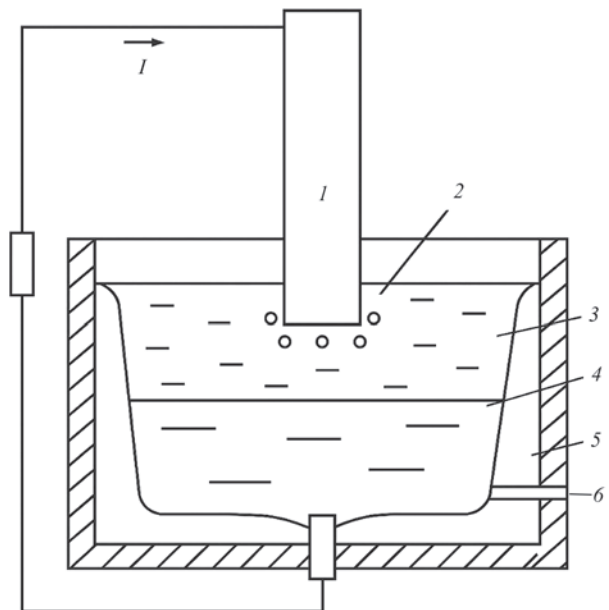


Рис. 3. Технологічна схема одержання заліза зі шлакового розплаву методом електролізу: 1 — інертний анод; 2 — кисень; 3 — електроліт (оксидний розплав); 4 — розплав заліза (катод); 5 — шлаковий гарнісаж; 6 — лютка

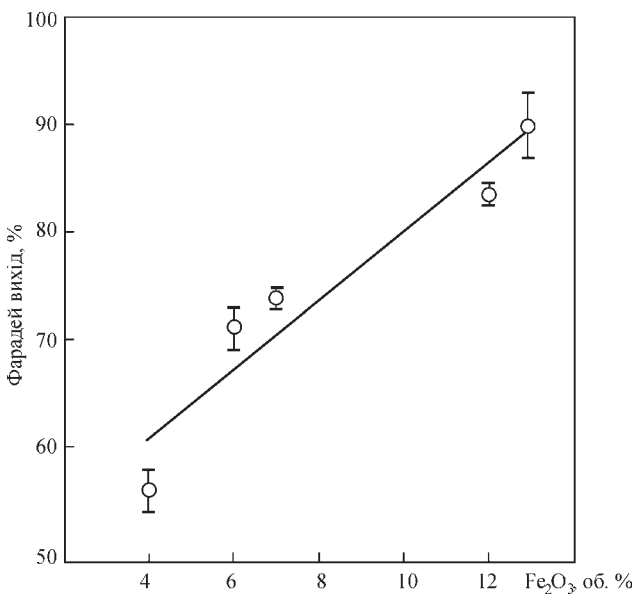


Рис. 4. Вплив об'ємної концентрації оксиду заліза на Фарадей вихід для електролітної комірки з паралельними пластинами

Анод (1), на якому виділяється кисень (2), є інертним, а у якості катода фактично виступає розплав одержаного заліза (4). Електролітом (3) є оксидний розплав з вмістом оксиду заліза не менше, ніж 7,5 %. На стінах камери утворюється шлаковий гарнісаж (5), який утримує розплав електроліту та забезпечує теплоізоляцію. Одержане залізо зливається у виливниці через лютку (6).

Іншим принциповим напрямком є виробництво заліза при низьких температурах (близько 110 °С) шляхом електролізу у лужному середовищі. Встановлено [14], що горизонтальна конфігурація електролітної комірки з паралельними пластинами є найперспективнішою. Фарадей вихід такого процесу зростає при збільшенні концентрації оксиду заліза (рис. 4), проте зазначається, що на ефективність також впливає ряд інших чинників і процес потребує подальших досліджень.

Проект ULCOWIN (Ultra-Low CO₂ Steelmaking via ElectroWining) [13] — інша частина (наряду з ULCOLYSIS) європейської ініціативи ULCOS, спрямованої на зменшення викидів CO₂ у сталеливарній промисловості, досліджує можливість виробництва заліза при низьких температурах (~100...110 °С) за допомогою електролізу у лужному середовищі. Процес відбувається у водному розчині NaOH з вмістом до 40 % гематиту. Фарадей вихід у процесі сягає 97 %, щільності струму — 0,3 А/см².

Анод виготовляється з нікелю, причому оптимізація анодного каталізу досягається додаванням оксидів кобальту або шляхом електрохімічного осадження CO₃O₄ у матрицю з нікелю. Серед ключових інженерних рішень процесу ULCOWIN — компактна конструкція електролітичної комірки з

відстанню між електродами лише 10 мм, що мінімізує омичні втрати, і спеціально розроблені системи збору осадженого заліза без розбирання комірки. У лабораторних умовах були отримані чисті залізні пластини масою понад 3,6 кг і вмістом Fe понад 99 %. У рамках проекту також проведено моделювання масштабування процесу.

Подібною до ULCOWIN є технологія SIDERWIN [15–17] — перспективна технологія електрохімічного виробництва заліза з оксидів без використання вуглецю, яка розроблена в рамках європейського проекту за програмою Horizon 2020.

Процес SIDERWIN базується на низькотемпературному електролізі: залізна руда, зазвичай у вигляді гематиту (Fe₂O₃), попередньо подрібнюється до дрібнодисперсного стану та додається у лужний електроліт (водний розчин NaOH або KOH) з утворенням суспензії. У такому середовищі відбувається електрохімічне відновлення заліза на катоді при температурі близько 110 °С. Під час цього процесу катодом виступає металева пластина, на якій осаджується залізо у твердому вигляді, а на аноді, виготовленому зі стійких до корозії матеріалів, наприклад нікелю, відбувається виділення кисню як єдиного побічного продукту.

Однією з головних переваг цієї технології є її екологічна чистота. Вона не передбачає спалювання викопного палива, а отже, не супроводжується утворенням парникових газів. Ще однією істотною перевагою є енергоефективність — процес відбувається за низької температури, що знижує як капітальні, так і експлуатаційні витрати. До того ж, електроенергію для електролізу можна отримувати з відновлюваних джерел, таких як сонячна чи вітрова енергія, що робить процес повністю вуглецево-нейтральним. Отримане залізо має високу ступінь чистоти, що робить його придатним для подальшого використання у виробництві сталі.

Проект SIDERWIN стартував у 2017 р. за участі провідних європейських наукових і промислових партнерів, зокрема компанії «ArcelorMittal», французького дослідницького центру CEA, нідерландського університету TU Delft та інших. У межах проекту було побудовано пілотну установку, проведено серію випробувань з одержанням металевого заліза, розроблено математичні моделі, а також здійснено оцінку енергетичної ефективності, собівартості та потенціалу масштабування технології. До 2023 р. SIDERWIN продемонстрував технічну здійсненність процесу, довівши, що електроліз оксиду заліза може бути реальною альтернативою доменному виробництву сталі з погляду сталого розвитку та кліматичної безпеки. Повідомляється про плани ArcelorMittal будівниц-

Порівняння основних технологій електролітичного одержання заліза

Параметр	MOE	ULCOLYSIS	ULCOWIN	SIDERWIN
Температура процесу, °C	1550	1600	100...110	110
Тип електроліту	Розплавлений оксидний шлак	Розплавлений оксидний шлак	Лужна суспензія Fe ₂ O ₃	Лужна суспензія Fe ₂ O ₃
Тип аноду	Іридій або оксидний анод	Керамічний анод на основі шпінелей	Нікелевий з Co ₃ O ₄	Нікель або інші стійкі метали
Споживання енергії, кВт·год/т	3700	4028	–	–
Переваги	Відносно висока продуктивність	Відносно висока продуктивність	Низька температура процесу	Низька температура процесу
Недоліки	Стійкість аноду і футерівки	Стійкість аноду і футерівки	Обмежена продуктивність	Обмежена продуктивність

тва заводу з виробництва заліза шляхом низькотемпературного електролізу.

В цілому технології одержання заліза шляхом електролізу у лужному середовищі виглядають привабливо завдяки низькій температурі процесів, а так і меншими, в порівнянні з технологіями одержання заліза з розплавів, витратами енергії. Проте залишаються питання щодо продуктивності та масштабованості таких технологій.

У таблиці наведено порівняння описаних технологій. Високотемпературні процеси є більш продуктивними, але потребують розв'язання питань стійкості анодів і вогнетривких матеріалів. Низькотемпературні процеси потенційно споживають менше енергії, але мають довести свою продуктивність.

Ще одним можливим напрямком одержання заліза шляхом електролізу є електроліз розплавлених сульфідів [18]. Його перевагами є значно менша необхідна витрата енергії на одержання заліза шляхом електролізу сульфідів у порівнянні з електролізом оксидів, можливість використання сульфідної сировини. Але в процесі електролізу утворюються леткі й токсичні продукти, такі як сірка або її сполуки, що потребує ретельного очищення газів. Ця розробка знаходиться на лабораторній стадії та потребує вирішення багатьох питань.

Висновки

1. Електролітичне виробництво заліза є перспективним напрямком для декарбонізації металургійної промисловості, особливо в умовах переходу до відновлювальних джерел енергії.

2. Розвиваються два напрями електролітичного виробництва заліза з оксидів — високотемпературний при 1550...1600 °C з оксидного розплаву і низькотемпературний при 100...110 °C з лужної суспензії.

3. Визначено, що для забезпечення найкращої продуктивності процесу при високотемпературному електролізі вміст оксиду заліза в оксидному розплаві має бути більш 7,5 %. При низькотемпературному

електролізі зі збільшенням об'ємної концентрації оксиду заліза в електроліті збільшується Фарадей вихід, який при вмісті 14 % Fe₂O₃ становить більш 90 %, а при 40 % Fe₂O₃ досягає 97 %.

4. Впровадження технологій електролітичного виробництва заліза залежить від доступності відновлюваної електроенергії та подальших досліджень для масштабування процесів до промислового рівня.

Список літератури/References

- Souza Filho, I.R., Springer, H., Ma, Y. et al. (2022) Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores. *J. of Cleaner Production*, **340**, 130805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130805>
- Szablowski, L., Wojcik, M., Dybinski, O. (2025) Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*, **316**, 134540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540>
- Massarweh, O., Al-khuzaei, M., Al-Shafi, M. et al. (2023) Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility. *J. of CO₂ Utilization*, **70**, 102438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102438>
- Akyüz, E.S., Telli, E., Farsak, M. (2024) Hydrogen generation electrolyzers: Paving the way for sustainable energy. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **81**, 1338–1362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.175>
- Boretti, D.A. (2024) Advances in sustainable turquoise hydrogen production via methane pyrolysis in molten metals. *Cleaner Chemical Engineering*, **11**, 100139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clce.2024.100139>
- Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M.E. et al. (2021) A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, **46**, 25385–25412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>
- Alptekin, F.M., Celiktaş, M.S. (2022) Review on catalytic biomass gasification for hydrogen production as a sustainable energy form and social, technological, economic, environmental, and political analysis of catalysts. *ACS Omega*, **7**, 24918–24941. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01538>
- Allanore, A. (2014) Features and challenges of molten oxide electrolytes for metal extraction. *J. of The Electrochemical Soc.*, **162**(1), E13–E22. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0451501jes>

9. Wang, D., Gmitter, A.J., Sadoway, D.R. (2011) Production of oxygen gas and liquid metal by electrochemical decomposition of molten iron oxide. *J. of the Electrochemical Soc.*, 158(6), E51–E54. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3560477>
10. Wiencke, J., Lavelaine, H., Panteix, P.-J. et al. (2018) Electrolysis of iron in a molten oxide electrolyte. *J. of Applied Electrochemistry*, 48(1), 115–126. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-017-1143-5>
11. Wiencke, J., Lavelaine, H., Panteix, P.-J. et al. (2019) The impact of iron oxide concentration on the performance of molten oxide electrolytes for the production of liquid iron metal. *Metallurgical and Materials Transact. B*, 51(1), 365–376. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01737-3>
12. Boston Metal celebrates historic commissioning run of MOE green steel cell (2025) *Boston Metal*. <https://www.bostonmetal.com/news/boston-metal-celebrates-historic-commissioning-run-of-moe-green-steel-cell/>
13. Olsen, K., Van der Laan, S., Lavelaine de Maubeuge, H. et al. (2016) European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. *Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation (IERO)*. Final Report. Publ. Office. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/084034>
14. Allanore, A., Lavelaine, H., Birat, J.P. et al. (2010) Experimental investigation of cell design for the electrolysis of iron oxide suspensions in alkaline electrolyte. *J. of Applied Electrochemistry*, 40(11), 1957–1966. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-010-0172-0>
15. European Commission (2022) *SIDERWIN — Development of new methodologies for industrial CO₂-free steel production by electrolysis in aqueous media*. *Horizon Europe*. Project ID: 768788. DOI: <https://doi.org/10.3030/768788>
16. Koutsoupa, S., Koutalidi, S., Balomenos, E., Panias, D. (2021) *SIDERWIN — A new route for iron production*. In: *Proc. of Inter. Conf. on Raw Materials and Circular Economy*, 5, 58. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005058>
17. ArcelorMittal (2023) *Arcelormittal and john cockerill announce plans to develop world's first industrial-scale low-temperature iron electrolysis plant*. <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-and-john-cockerill-announce-plans-to-develop-world-s-first-industrial-scale-low-temperature-iron-electrolysis-plant>
18. Suryarao, K.P., Daehn, K.E., Allanore, A. (2024) Iron production by molten sulfide electrolysis. *ECS Meeting Abstracts*, MA2024-01(55), 2914. DOI: <https://doi.org/10.1149/MA2024-01552914mtgabs>

OVERVIEW OF THE PROCESSES OF PRODUCING IRON BY ELECTROLYSIS

V.O. Shapovalov, D.M. Zhyrov, F.K. Biktagirov, O.V. Hnatushenko, V.V. Barabash, A.P. Ignatov
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: biktagirfk@ukr.net

Due to the urgent need for decarbonization of metallurgical production, the development of carbon-free technologies for iron reduction has gained particular importance. It was noted that hydrogen as a reducing agent is currently practically not applied for extracting iron from ore materials for various reasons, including cost and safety concerns. Research in this area is still at the investigative stage. Electrolytic methods for extracting iron from its oxides appear more promising in this regard, with several approaches currently at different stages of scientific investigation and technological implementation. The paper discusses the specific features of the main processes of electrolytic reduction of iron from ore materials, particularly high-temperature technologies such as Molten Oxide Electrolysis and ULCOLYSIS, as well as low-temperature processes like ULCOWIN and SIDERWIN. In the high-temperature methods, the electrolyte is an oxide melt composed of silicon, aluminum, and magnesium oxides at 1550–1600 °C. Iron oxide is added into this melt, and when electric current is applied, iron is deposited on the cathode, while oxygen is released at the anode. Research has established the key technological parameters for this process: composition of the molten oxide, electric current intensity and voltage, and optimal iron oxide content. Despite challenges in selecting materials that are stable at high temperatures for reactor and electrodes, this technology has progressed from laboratory research to the pilot production stage. Low-temperature electrolysis of iron oxide is carried out at 100–110 °C in an alkaline medium. Although this process has lower productivity compared to the high-temperature methods, its advantages include lower electricity consumption as well as reduced capital and operational costs. Intensive efforts are currently underway to improve the process, with plans to construct a plant for iron production through low-temperature electrolysis. 18 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: CO₂ emissions, hydrogen, green technologies, iron electrolysis, Molten Oxide Electrolysis, ULCOWIN, ULCOLYSIS, SIDERWIN

Отримано 16.07.2025

Отримано у переглянутому вигляді 30.07.2025

Прийнято 08.10.2025

СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»



ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Передплата доступна у друкованому та цифровому форматах!

Тел.: (38044) 205-23-90; E-mail: journal@paton.kiev.ua; patonpublishinghouse@gmail.com;

<https://patonpublishinghouse.com>