

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІМ. АКАДЕМІКА М. І. ГАСИКА
ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ВИРОБНИКІВ ФЕРОСПЛАВІВ ТА ІНШОЇ
ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ
АКАДЕМІЯ НАУК ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ



Матеріали

Міжнародної науково-практичної конференції
“Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності
і сталого розвитку”

The Proceedings
of the International scientific and practical conference
“Innovation in Metallurgy and Strategical adjacent industries for energy efficient
and sustainable development”

присвячена
100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М. І. Гасика

22-23 квітня, 2025

ДНІПРО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІМ. АКАДЕМІКА М. І. ГАСИКА
ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ВИРОБНИКІВ ФЕРОСПЛАВІВ ТА ІНШОЇ
ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ
АКАДЕМІЯ НАУК ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ



Матеріали

Міжнародної науково-практичної конференції
“Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності
і сталого розвитку”

присвячена
100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М. І. Гасика

22-23 квітня, 2025

ДНІПРО

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES
DEPARTMENT OF ELECTROMETALLURGY NAMED AFTER
ACADEMICIAN MYKHAILO GASIK
PRYDNIPROVSKYI SCIENTIFIC CENTER OF THE NAS OF UKRAINE
UKRAINIAN ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF FERROALLOYS AND
OTHER ELECTROMETALURGICAL PRODUCTS
ACADEMY OF SCIENCES OF HIGHER EDUCATION OF UKRAINE



The Proceedings
of the International scientific and practical conference
“Innovation in Metallurgy and Strategic adjacent industries for energy efficient
and sustainable development”

dedicated to the
100th anniversary of the Department of Electrometallurgy named after Academician
Mykhailo Gasik

22-23 April 2025

DNIPRO

УДК 669:[005.591.6:620.92](082)

I 66

Рекомендовано до друку вченою радою Українського державного університету науки і технологій

(Протокол № 12 від 28.05.2025)

Рецензенти:

Грищенко С. Г. – голова ради директорів об'єднання “Укркольормет”, проф., д.т.н.

Камкіна Л. В. – декан факультету металургійних процесів та хімічних технологій Українського державного університету науки і технологій, проф., д.т.н.

I 66 Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності і сталого розвитку : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22–23 квітня 2025 р. / за заг. ред. Ю. С. Пройдака, О. В. Жаданоса. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 198 с.

У збірнику подано матеріали, що висвітлюють актуальні проблеми розвитку сучасних технологій в металургійному виробництві, на залізничному транспорті, хімічних виробництвах. Значна увага приділена питанням цифрової трансформації, математичному моделюванню, мультидисциплінарним дослідженням.

ISBN 978-617-8314-05-7(PDF)

Recommended for publication by the Academic Council of the Ukrainian State University of Science and Technologies

(Minutes No. 12 dated May 28, 2025)

Reviewers:

Hryshchenko S. G. – Chairman of the Board of Directors of the Association "Ukrkolormet", Professor, Doctor of Technical Sciences

Kamkina L. V. – Dean of the Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, Professor, Doctor of Technical Sciences

Innovations in Metallurgy and Related Strategic Industries for Energy Efficiency and Sustainable Development : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, April 22–23, 2025 / edited by Yu. S. Proidak, O. V. Zhadanos. – Electronic edition. – Dnipro : USUST, 2025. – 198 p.

The collection presents materials highlighting current issues in the development of modern technologies in metallurgical production, railway transport, and chemical industries. Significant attention is paid to digital transformation, mathematical modeling, and multidisciplinary research.



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[\(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ISBN 978-617-8314-05-7(PDF)
DOI 10.15802/978-617-8314-05-7

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	14
СЕКЦІЯ 1. СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ	15
ПРОДУВАННЯ ВАННИ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ФЕРОНІКЕЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОДНОСОПЛОВИХ ТА ТРИСОПЛОВИХ ФУРМ Акрєєв В.В., Приходько С.В., Мельник С.О., Овчарук А.М.	15
ОГЛЯД ДОСТУПНИХ ДЖЕРЕЛ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА МАРГАНЦЕВИХ СПЛАВІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ УКРАЇНИ Аносов О.В., Гладких В.А., Рубан А.В., Рябцев О.О.	21
ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС ВИПЛАВКИ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ В УМОВАХ АТ НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОДУ ФЕРОСПЛАВІВ Бабуцький В.І., Зінченко О.М.	25
РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СПЛАВІВ МАРГАНЦІО Величко К.О.	30
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО НАГРІВУ ЗАЛІЗО-РУДО-ВУГІЛЬНОГО БРИКЕТУ В ІНДУКЦІЙНОМУ ПОЛІ Грек О.С.	35
ІНТЕНСИФІКУЮЧИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЮ НА ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ Гришин О.М., Надточій А.А., Губа Р.М., Хромовський С.А.	40
ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ Дерев'яно І.В., Жаданос О.В., Агєєв О.Г.	46
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕЦЬКАРБІДОКРЕМНІЄВИХ БРИКЕТІВ В СТАЛЬ-КОВШІ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ Жаданос О.В., Дерев'яно І.В., Шепетяк Є.О., Мацишин В.Г., Петренко М.С.	49
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ТА ПРОКАТКИ У МОДУЛЬНИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ СИСТЕМАХ Ціколія А.З., Кононов Д.О.	54
ХАРАКТЕРИСТИКА ВУГЛЕЦЕВИХ ВІДНОВНИКІВ ДЛЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛЦІО З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ Кравченко В.П., Гладких В.А., Рубан А.В., Малий Є.Д.	59

ІНТЕНСИФІКУЮЧИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЮ НА ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ

Гришин О.М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0000-0665-1179> hryshyn@i.ua

Надточій А.А. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>, Nadtochiy08@ukr.net

Губа Р.М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0003-2173-517X>, roman.guba@sets.space

Хромовський С.А. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, romul.kira@gmail.com

Анотація. Метою роботи є розробка механізму інтенсифікуючого впливу електромагнітного поля на процес твердофазного відновлення оксидів газами. Експерименти проводили у змінному магнітному полі з частотою змінного току в індукторі від 50 Гц до 40 кГц. Процес газового відновлення досліджували із визначенням ступеню відновлення оксиду у діапазоні температур 973-1373 К з використанням різних залізорудних матеріалів. Результати лабораторних експериментів свідчать про вплив високочастотного електромагнітного поля, що інтенсифікує, на процес твердофазного відновлення залізорудних матеріалів. Представлено фізико-хімічну модель механізму інтенсифікуючого впливу ЕМП на процес відновлення. Високочастотне поле суттєво прискорює процеси дифузії, а також підвищує електронну та структурну дефектність кристалічних решіток, що позитивно впливало на розвиток адсорбційно-хімічної ланки.

Ключові слова: твердофазне відновлення, інтенсифікація, оксиди заліза, змінне електромагнітне поле, механізм впливу ЕМП

INTENSIFYING INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE OXIDE REDUCTION PROCESS

Grishin O.M., Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-0665-1179>, hryshyn@i.ua

Nadtochiy A.A., Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>, Nadtochiy08@ukr.net

Guba R.M. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0003-2173-517X>, roman.guba@sets.space

Hromovskiy S.A. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, romul.kira@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to develop a mechanism for the intensifying effect of an electromagnetic field on the process of solid-phase reduction of oxides by gases. The experiments were carried out in an alternating magnetic field with an alternating current frequency in the inductor from 50 Hz to 40 kHz. The process of gas reduction was studied with the determination of the degree of oxide reduction in the temperature range of 973-1373 K using various iron ore materials. The results of laboratory experiments indicate the influence of a high-frequency intensifying electromagnetic field on the process of solid-phase reduction of iron ore materials. A physicochemical model of the mechanism of the intensifying effect of EMF on the reduction process is presented. The high-frequency field significantly accelerates diffusion processes, and

also increases the electronic and structural defects of crystal lattices, which positively affected the development of the adsorption-chemical link.

Keywords: solid-phase reduction, intensification, iron oxides, alternating electromagnetic field, mechanism of EMF influence

Матеріали наукових публікацій та результати наших досліджень свідчать про значний вплив електромагнітного поля (ЕМП), що інтенсифікує, на кінетику процесів твердофазного відновлення оксидів. ЕМП з різною інтенсивністю впливає на ланку газового відновлення та ланку газифікації вуглецю. Оптимізація параметрів електромагнітного поля пов'язана з уявленнями про механізм впливу, що інтенсифікує. Водночас літературні джерела містять дуже обмежений матеріал про механізм електромагнітного впливу на процес відновлення.

Різні зовнішні енергетичні (фізичні) впливи, як можливі регулятори перебігу фізико-хімічних процесів, давно привертають увагу дослідників [1,2]. Встановлено сильний вплив електромагнітних і корпускулярних випромінювань на процеси, що протікають у газовій та рідкій фазах. Так, під впливом α -частинок має місце прискорення реакцій розпаду монооксиду вуглецю, його окиснення та багатьох інших [3]. Ефекти, що спостерігалися, обумовлені збудженням газових молекул, їх іонізацією, утворенням атомів і радикалів. Подібні зміни відбуваються і в рідинах, де вони носять, однак, яскраво виражений локальний характер.

Випромінювання не тільки впливають на хід реагування газів між собою на поверхні твердих тіл (гетерогенний каталіз), але також змінюють швидкість взаємодії останніх з газами. Встановлено, що під опроміненням може прискорюватися окиснення металів та відновлення їх із оксидів. У ряді досліджень (напр. [4,5]) відзначалася значна інтенсифікація відновлення оксидів заліза H_2 та CO під впливом іонізуючого та гамма-опромінення (в ході реагування або попередньо); одночасно знижувалася температура початку перебігу процесу із помітною швидкістю. Слід зауважити, що позитивна дія γ -променів мала місце і у разі використання їх одночасно з каталізаторами [5]. Кінетичні зрушення, що спостерігалися, пов'язують зі сприятливими змінами умов хемосорбції газів, ослабленням зв'язків метал-кисень, з прискоренням дифузії іонів крізь кристалічні решітки і полегшенням зародження нових фаз.

Нами вивчені кінетичні закономірності та механізм відновлення оксидів заліза газами в умовах накладення на систему електромагнітних полів різної частоти, що реагує (до $5 \cdot 10^4$ Гц). В дослідженнях використані різноманітні залізорудні матеріали. Крім хімічно чистих оксидів заліза та промислових концентратів, відновленню піддавалися: Fe_2O_3 кваліфікації ЧДА, кристалічний (розмір частинок 0,5-2 мм); залізні руди в шматках і зернах різної крупності – лисаківська ($Fe_{зар} = 41,6-43,7 \%$), криворізький гематит ($Fe_{зар} = 54,7 \%$), магнетит ($Fe_{зар} = 56,7 \%$), багата мартитова руда (менше 1 % пустої породи); неофлюсовані та офлюсовані окатиші з рядового магнетитового концентрату, сирі та піддані окислювальному випалу при 1523 К; офлюсований агломерат основністю 1,1 та 1,33 з вмістом кисню 22,5 та 22,2 % відповідно.

Контрольні експерименти показали відсутність скільки-небудь помітного розігріву

зразків у змінному магнітному полі невеликих частот ($f \leq 50$ Гц). Це має бути пов'язано з низькими значеннями f і H , при яких індуковані вихрові струми та струми, зумовлені феромагнітними властивостями кристалічних фаз, вкрай малі. Отже, прискорення відновлення, що спостерігалось, не можна пояснити термічним ефектом.

Варіації температури в інтервалі 773-1073 К показали, що накладення магнітного поля найбільше прискорює процес при 873-973 К. До 973 К відновлення розвивалося східчасто; перевищення зазначеної температури призводило до зональної течії процесу. Подібні закономірності мали місце у дослідях із порошковими матеріалами – хімічно чистими Fe_2O_3 та Fe_3O_4 . Магнітне поле промислової частоти помітно форсувало видалення кисню практично протягом усього процесу.

Подальші дослідження були спрямовані на вивчення кінетики процесу за участю залізородних матеріалів промислового типу. Відновлення магнетитового концентрату воднем і монооксидом вуглецю показало, що закономірності впливу магнітного поля, встановлені в дослідях із хімічно чистими препаратами, в основному зберігаються. Подібна картина мала місце й у потоці відновника різного складу – типу продуктів парової конверсії газу. Навіть в умовах досить інтенсивного розпаду CO видалення кисню шихти при накладенні магнітного поля помітно прискорювалося.

Високочастотне електромагнітне поле ($f \geq 2$ кГц) викликало суттєвий розігрів залізородної шихти у процесі її відновлення. Термічний ефект зменшувався із зростанням температури; при 1073 К і вище він був практично відсутній. Розігрів шихти, що спостерігався, може бути переважно пов'язаний з вихровими струмами, обумовленими зміщенням кордонів доменів. Висока частота цих процесів, незважаючи на низьку напруженість поля, давала значний термічний ефект. Зниження f зменшувало фіксований розігрів зразка. У цьому напрямі діяв підйом температури, послаблюючи прояви феромагнетизму кристалічних фаз. Внесок звичайних індукованих струмів у ефект розігріву був порівняно невеликим.

Слід зазначити факт розігріву зразка був майже протягом всього процесу відновлення. Це пояснюється практично безперервною наявністю у шихті Fe_3O_4 або металевого заліза – перевірка показала, що обидві зазначені фази однаково успішно нагріваються у високочастотному полі. Оскільки магнітні силові лінії замикаються не через зовнішню поверхню зразка, а пронизують його, підйом температури мав місце по всьому об'єму шихти. Таким чином є принципова можливість нагрівання електромагнітним шляхом залізородних матеріалів при їх металізації:

- відновлення при 673 К у звичайних умовах;
- відновлення у змінному полі ($f = 25$ кГц; $W = 30$) без стабілізації температури;
- відновлення у відсутності поля, але з відтворенням температурного режиму, ним обумовленого.

Дослідження дозволяють зробити висновок, що прискорення процесу за рахунок підйому температури становить в середньому $\sim 1/3$ загального ефекту інтенсифікації.

Такого висновку дозволяють дійти і результати другої серії експериментів, що відрізняються від попередньої стабілізацією температури у разі електромагнітних впливів:

- відновлення при 673 К у звичайних умовах;

– відновлення в змінному полі ($f = 42$ кГц; $W = 30$) зі стабілізацією температури по зовнішній термодузі на рівні 673 К;

– відновлення в звичайних умовах при 693 К, що практично відповідає максимальному розігріву зразка, що викликається змінним полем.

Зіставлення кінетичних даних свідчить про наявність електромагнітного ефекту, що майже втричі перевершує термічний. Подібна картина мала місце у процесі відновлення лисаківської руди при 773 К та в умовах більш високої напруженості поля $W = 50$.

Результати наших досліджень у сукупності з літературними даними дозволяють вважати, що одним із можливих механізмів впливу випробуваних впливів на процес відновлення є магнітострикційні коливання, що виникають у решітках кристалічних фаз. На користь такого висновку свідчать немонотонна зміна λ зі збільшенням H і зміна знаку магнітострикції заліза, які можуть стати причиною екстремальної залежності швидкості відновлення від величини напруженості поля. Криві лінійної магнітострикції полікристалів заліза за даними різних авторів не збігаються: в одних джерелах відзначається наявність яскраво вираженого максимуму поблизу $H = 24$ кА/м зі зміною знаку λ при $H = 40$ кА/м [6,7]; інші джерела вказують наявність екстремуму на кривій $\lambda = f(H)$. Проте всі характерні значення H досить близькі до оптимуму напруженості поля, при якому газове відновлення залізородних матеріалів за нашими дослідженнями протікало найбільш інтенсивне. Слід зазначити також, що максимальне прискорення процесу зовнішніми енергетичними впливами досягалося в умовах невисоких температур, коли феромагнітні властивості кристалічних фаз і магнітострикційні ефекти знаходилися на високому рівні [7].

Прямим підтвердженням реалізації та суттєвої ролі зазначених ефектів можуть бути результати досліджень газового відновлення лисаківської руди в умовах магнітних впливів низької частоти. Накладення змінного поля викликало диспергування залізородної шихти, особливо сильне в температурному інтервалі 773-833 К. Це пов'язане з магнітострикційними деформаціями, які створювали механічні напруження в рудних зернах і призводили до їх руйнування. Магнітострикційні коливання як фактор інтенсифікації відновлення можуть діяти за декількома напрямками, впливати на різні ланки процесу.

Результати досліджень показали, що прискорюючий ефект низькочастотних полів стає значним лише за підвищених витрат газу і збільшується зі зростанням W . Отже, зовнішній масоперенос не схильний до суттєвого впливу таких факторів. Високочастотні електромагнітні поля, навпаки, в умовах порівняно малих W форсували видалення кисню не менше ніж при підвищених витратах газу. Це свідчить про прискорення зовнішнього газообміну ними і може бути пояснено наступним. Кристалічні фази, що мають феромагнітні властивості, в умовах змінних електромагнітних впливів відіграють роль мініатюрних магнітострикційних вібраторів (малої потужності). Акустичні коливання ультразвукових частот, що генеруються ними, викликають «обурення» газової фази. Це сприяє газообміну між потоком відновника та поверхнею зразка; полегшує газообмін в об'єму шихти, в її міжзеренному просторі. Активація газових молекул ультразвуковими коливаннями в порах рудних частинок, мабуть, може сприяти внутрішньодифузійного транспорту газів.

Розглянуті вище ефекти посилюватимуться зі зростанням потужності електромагнітних впливів. Це, ймовірно, і стало однією з причин залежності швидкості відновлення, що спостерігалася, від величини \mathcal{H} . Подібний вплив може мати також зростання частоти ЕМП. Прояв феромагнетизму вище температури початку окиснення при накладенні зовнішнього поля обумовлює можливість впливу на газообмінні процеси у досить широкому діапазоні температур.

Значного впливу магнітострикційних коливань різних частот слід очікувати на розвиток кристалохімічних перетворень. Безперервна зміна в змінному полі умов рівноваги між вузлами кристалічних решіток має «розхитувати» їх, збільшувати рухливість іонів у твердих фазах. В результаті полегшуватимуться фазові перетворення при відновленні оксидів заліза. Дійсно, цим можна пояснити скорочення тривалості інкубаційного періоду і згладжування перегинів на кінетичних кривих, що спостерігалось в дослідах з накладенням поля.

Крім того, підвищена рухливість іонів повинна створювати сприятливі умови для перебігу реакційної дифузії, яка відіграє важливу роль у ході відновлення залізородних матеріалів. Позитивна дія змінних полів у цьому напрямі підтверджена результатами досліджень кінетики твердофазної взаємодії заліза з Fe_2O_3 та Fe_3O_4 .

Висновки

На базі аналізу кінетичних даних та результатів спеціальних досліджень – електрофізичних, структурно-мікроскопічних, закономірностей дифузійного газообміну, спираючись на положення фізики твердого тіла та теорії магнетизму, висунуто уявлення про механізм впливу змінних електромагнітних полів на швидкість відновлення оксидів заліза газами.

1. Вплив електромагнітного поля переважно обумовлений феромагнітними властивостями кристалічних фаз, які визначають зміну вільної енергії, магнітострикційні коливання решіток, розподіл та рух частинок під зовнішнім впливом; з вибіркоvim поглинанням енергії електромагнітних хвиль частиною іонів кристала (що знаходяться в приповерхневому шарі, в оточенні структурних дефектів) та молекулами адсорбату; про виникнення контактної різниці потенціалів між оксидами заліза, що зумовлює їх односторонню провідність, та ін. В результаті цього форсується зовнішньо- та внутрішньодифузійний газообмін у ході відновлення.

2. «Розхитуються» кристалічні решітки твердих реагентів, утворюються додаткові структурні дефекти, що у свою чергу послаблює зв'язок Fe-O, полегшує зародження нових фаз та розвитку реакційної дифузії. Одночасно змінюється концентрація електронних дефектів та залежні від неї умови хемосорбції; відбувається активація молекул адсорбату, яка сприяє взаємодії H_2 , CO з киснем оксидів і десорбції продуктів – H_2O , CO_2 .

3. Сукупність зазначених ефектів призводить до диспергування твердих продуктів відновлення, утворення розвиненої мережі транспортних каналів і збільшення поверхні, доступної газам.

Бібліографічний список

1. Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J. Handbook of Heterogeneous Catalysis. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1997. 2497 s. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527619474>
2. Pizzini S. Physical Chemistry of Semiconductor Materials and Processes. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. 403 s. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118514610>
3. Singh A., Kremers W. Radiolytic dechlorination of polychlorinated biphenyls using alkaline 2-propanol solutions. *Radiation Physics and Chemistry*. 2002. Vol. 65. Is. 4-5. P. 467-472. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(02\)00360-2](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00360-2)
4. Pospíšil M., Topinka J. Effect of the ionizing radiation on the kinetics of the reduction by hydrogen of NiO-Fe₂O₃ mixed oxides of various genesis. *Collect. Czech. Chem. Commun.* 1986. Vol. 51, P. 1561-1570. DOI: <https://doi.org/10.1135/cccc19861561>
5. Holmboe M. Effect of gammairradiation on the redox states of the structural iron in bentonite clay. 2023:14. ISSN: 2000-0456. Режим доступу: [202314-effect-of-gamma-irradiation-on-the-redox-states-of-the-structural-iron-in-bentonite-clay.pdf](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00360-2)
6. Leszek B. Magalas, Golovin S. A., Darinskiy B. M. Mechanical Spectroscopy, Internal Friction and Relaxation Phenomena in Solids – Suggested Reading. *Solid State Phenomena*. 2006. Vol. 115. P. 15-24. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.115.15](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.115.15)
7. Симонов В.К., Руденко Л.Н., Ростовцев С.Т. Методика определения основных характеристик диффузионного массопереноса в условиях обтекания исследуемого образца газами. *Новые методы исследования процессов восстановления черных металлов*: сб.науч.тр. М.: Наука, 1974. С. 86-89.

Наукове видання

Загальна редакція Ю. С. Пройдака, О. В. Жаданоса

**ІННОВАЦІЇ В МЕТАЛУРГІЇ І СУМІЖНИХ СТРАТЕГІЧНИХ ГАЛУЗЯХ ДЛЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ І СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

Електронне видання

Відповідальні за випуск: Пройдак Ю. С., Жаданос О. В.
Комп'ютерна верстка та дизайн: Жаданос О. В.

*Відповідальність за достовірність інформації, представленої в збірнику,
несуть автори*

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека)
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022