

ОДЕРЖАННЯ РОЗПЛАВУ В'ЮСТИТУ ПРИ ТЕРМІЧНОМУ РОЗКЛАДАННІ ГЕМАТИТОВИХ КОТУНІВ АРГОНОВОЮ ПЛАЗМОЮ

В.О. Шаповалов¹, В.Г. Могилатенко^{1,2}, М.В. Карпець^{1,2}, Р.В. Козін¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

²КПІ ім. Ігоря Сікорського. 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: vmogilatenko@gmail.com)

Для вирішення питань глобального потепління першочергове значення має скорочення викидів CO₂. Негативний внесок металургів України у забруднення атмосфери на 2020 р. за попередні 20 років склав біля 1 млрд т вуглекислого газу. Вихід бачиться у переході на виробництво зеленої сталі, тобто сталі із заліза прямого відновлення воднем. В умовах використання плазмового нагріву за рахунок високих температур відбувається швидке плавлення котунів, розвиваються термічні процеси розкладання оксидів і активується відновлювач (водень). Розкладання оксидів в процесі нагріву і плавлення прискорює загальний процес відновлення котунів до в'юститу. І тільки після цього використання водню для відновлення заліза і його розкиснення стає обґрунтованим. Встановлена можливість утворення в'юститного розплаву без використання відновника при плазмовій плавці в атмосфері аргону. Бібліогр. 19, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: пряме відновлення, котуни, термічне розкладання, кінетика, розплав магнетиту, розбавлення залізом, в'юстит

Вступ. Сталеплавильне виробництво є джерелом великої кількості парникових газів. У 2022 р. було викинуто 1,91 т CO₂ на тонну сталі. При виробництві 1 т сталі залежно від способу виплавки кількість викидів в атмосферу становить 0,4...2,4 т CO₂. Інтенсивність викидів CO₂ та енергоємність розраховуються за середньозваженим виробництвом сталі за різними схемами: доменна піч — кисневий конвертер, доменна піч — електро-дугова піч і виробництво сталі з заліза прямого відновлення у дуговій печі [1].

У 2023 р. 10 найбільших країн-забруднювачів збільшили промислові викиди до рекордних 24,5 млрд т CO₂ у порівнянні з 23,9 млрд т (+2,5 %) за підсумками 2022 р. Трьома найбільшими забруднювачами були Китай, Сполучені Штати Америки та Індія, на які разом припало понад 53 % усіх промислових викидів. Китай викинув рекордні 11,2 млрд т CO₂, що більше порівняно з 2022 р. на 642 млн т та є найбільшим щорічним зростанням з 2011 р. [2, 3]. Щодо України, то за даними ОП «Укрметалургпром» її металургійні підприємства у 2022 р. виробили 6,19 млн т сталі, а за підсумками 2023 р. було вироблено 6,23 млн т. За прогнозами експертів українські металурги в змозі збільшити виплавку сталі до 7...8 млн т. Слід зауважити, що цей прогноз можна вважати дуже оптимістичним і головною причиною цього є втрата ряду підприємств у Донецькій області, а також вимушена зупинка ряду інших підприємств

[4, 5]. Якщо взяти за середнє значення викидів CO₂ 1,4 т на тонну сталі, то металургійні підприємства України викидали в атмосферу не менше 8,7 млн т щорічно у 2022 і 2023 рр., а за 20 років, починаючи з 2000 і до 2020 р., було виплавлено 663,1 млн т сталі [6] та викинуто в атмосферу навіть за заниженими оцінками біля 1 млрд т вуглекислого газу. Таким є негативний внесок України у забруднення атмосфери.

На сьогодні широко визнано, що скорочення викидів CO₂ для боротьби з глобальним потеплінням має першочергове значення. Газ, накопичений в атмосфері, поглинає і зберігає тепло в інфрачервоному діапазоні. Концентрація CO₂ однієї частини на мільйон (1 ppm) еквівалентна додаванню в атмосферу приблизно 7,8 Гт вуглекислого газу [7].

На сьогодні більшість доменних печей в Європі зістарилися, їм більше 25 років, і тільки деякі з них пройшли модернізацію [2, 8]. Таким чином, відкривається можливість заміни деякої частини виробничих потужностей на більш сучасну технологію виробництва сталі прямим відновленням залізородних котунів або руди воднем з наступною плавкою в печах різного типу.

Для переходу на виробництво зеленої сталі існують не тільки технологічні та конструкторські проблеми. Одним із найважливіших напрямків робіт зі зниження викидів вуглецевмісних газів в атмосферу є одержання водню у виробничих масштабах, що безпосередньо пов'язано з розробкою і

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

М.В. Карпець — <https://orcid.org/0000-0001-9528-1850>, Р.В. Козін — <https://orcid.org/0000-0002-8501-0827>

запуском потужних електролізерів і отриманням значної кількості зеленої електроенергії. За наведеними в [2] оціночними даними електролізери будуть споживати приблизно 296 ТВт·год електричної енергії в рік. Як наведено в інтернет виданні «Економічна правда» виробництво електроенергії у 2021 р. знаходилось на рівні 156,56 ТВт·год [9] (156,56 млрд кВт·год), що удвічі менше ніж споживання електроенергії електролізерами.

Щодо технології, то існує два напрямки прямого відновлення заліза з оксидів воднем. Першим способом, який найбільш розвинений і використовує наявні виробничі потужності, є отримання губчастого заліза із застосуванням водневого або воднево-вуглецевого середовища. Застосування природного газу або додавання вуглецю до водневої атмосфери позитивно впливають на кінетику відновлення, але не дають можливості повністю звільнитися від викидів вуглецевмісних газів. Відновлення із застосуванням у якості відновника аміаку може дати позитивні результати зокрема при відновленні заліза в твердому стані [10, 11]. Очікується, що відповідно до термодинамічних розрахунків ступінь металізації значно покращиться за рахунок збільшення кількості аміаку у складі газової атмосфери, досягнувши 97 % при використанні 20 % аміаку.

Метод відновлення воднем і отримання заліза у вигляді губки не є ідеальним. Основними його недоліками є значуща тривалість відновлення та необхідність використання для відновлення та плавки окремого обладнання. Можливе поєднання цих двох процесів, якщо використати у якості джерела енергії високотемпературну водневу плазму для відновлення та плавки.

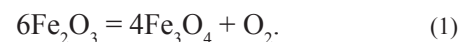
Стан питання. Плазмова плавка порівняно з електродуговою має ряд переваг. Головна перевага постає в тому, що відбувається активізація процесу відновлення заліза за рахунок високих температур плазми (активація водню, прискорення процесів перенесення маси, одержання відновленого заліза в рідкому стані і можливість легування розплаву без проміжного одержання злитків заліза з наступним їх переплавом). І не менш важливою перевагою є зниження питомої витрати електроенергії. Так, в залежності від різних факторів, її загальна питома витрата для електродугової сталеплавильної печі становить від 500 до 700 кВт·год, а для плазмово-дугової печі — приблизно від 350 до 550 кВт·год на 1 т виплавленої сталі [12].

Водень є відмінним відновником як при низьких, так і при високих температурах. Більш того, при переході в стан плазми молекули водню можуть отримувати додаткову внутрішню енергію

коливального і обертального руху, переходити в атомарний та іонізований стан. У плазмі спостерігаються вільні електрони, фотони та інші елементарні частинки. Їх співвідношення залежить від температури плазми, яка може досягти десятків тисяч градусів. Однак температура рідкого металу при плазмово-дуговій плавці набагато менша і в зоні дії плазмового факела становить близько 3000–4000 К [13–15]. Як правило, з металом в реальних температурних умовах взаємодіють збуджені молекули і атомарний водень. Завдяки їх високій реакційній здатності відновлення оксидів заліза відбувається в значно більш сприятливих термодинамічних умовах, ніж відновлення просто газоподібним воднем. ПДП забезпечує та покращує кінетичні умови взаємодії водню з оксидами, які при температурах твердого стану часто визначають швидкість відновлення.

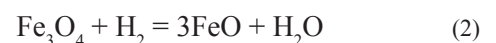
При виробництві заліза прямим відновленням із оксидів з використанням водневої плазми першим етапом є розплавлення шихти (гематиту Fe_2O_3). Саме в цей час немає необхідності використовувати водень як відновник і плавку можна вести в інертному газі (аргоні). Пов'язано це з наступним.

З діаграми стану системи Fe–O, наведеної на рис. 1 за даними [16], випливає, що при температурі 1730 К в атмосфері чистого кисню або при 1663 К на повітрі відбувається дисоціація гематиту з утворенням магнетиту (Fe_3O_4) і кисню, тобто ще до отримання розплаву. Застосування інертної атмосфери або вакууму прискорює цей процес, який відбувається за реакцією:



Таким чином, вміст кисню в оксиді знижується з 30,06 до 28,08 % при 1856 К. Отже первинне відновлення нижчого оксиду з вищого відбувається без витрат водню і без додаткових енергетичних витрат безпосередньо на відновлення, оскільки збігається з процесом нагріву гематиту до температури його плавлення.

Отриманий магнетит має стехіометричну формулу Fe_3O_4 , яку можна записати у вигляді $(\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$. Подальша реакція вже вимагає присутності в системі відновника, в нашому випадку водню, і її можна записати як:



або



Як показують термодинамічні розрахунки, реакція (3) відбувається з великою негативною змі-

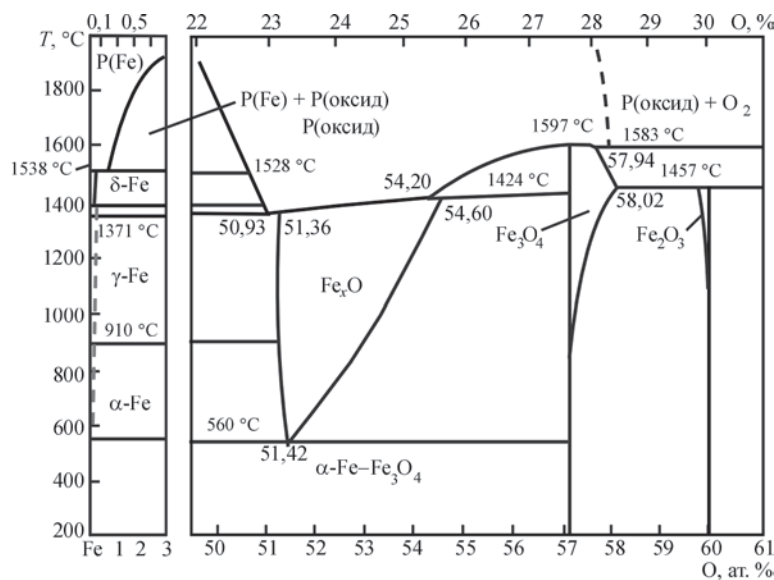


Рис. 1. Діаграма стану системи Fe–O за даними [16]

ною вільної енергії [17]. Оскільки плазмово-дугова піч є проточним реактором, з якого газоподібна волога видаляється або за рахунок очищення газової фази при її рециркуляції, або за рахунок постійної евакуації в навколишню атмосферу, реакція може проходити навіть до повного використання оксиду і отримання відновленого заліза. Тривалість отримання заліза з в'юститу визначається кінетичними характеристиками реакції.

Наступну стадію відновлення заліза з розплаву в'юститу можна описати реакцією:



На цьому достатньо швидко протікання процесу відновлення закінчується. Реакція:



проходить дуже повільно в інтервалі температур від плавлення до 3147 К. Зміна вільної енергії реакції відновлення заліза з розплаву в'юститу в цьому температурному інтервалі становить невелику негативну величину: від -2454 до -3142 Дж/моль, а логарифм константи рівноваги змінюється від $0,0568$ до $-0,0191$ [14].

Наступним етапом є розкиснення заліза воднем. Слід зазначити, що розкиснення воднем за наведеними [18] даними проходить дуже повільно. Кінцевий вміст кисню, що дорівнює $0,001$ %, при розкисненні металу, який містить тільки $0,035$ % кисню, вуглецем в умовах плавки досягався через $0,5$ год. А оброблення воднем у тих же умовах протягом 4 год призвело до зниження вмісту кисню лише до $0,0015$ %, тобто відбувалося повільніше більш ніж у 8 разів.

Таким чином, перш ніж вирішувати питання про подолання кінетичних перешкод при розкис-

ненні розплаву заліза, необхідно з найменшими витратами отримати спочатку розплав в'юститу і потім відновленого заліза з максимальною кількістю розчиненого кисню. Існує принаймні два способи отримання розплаву в'юститу. Це відновлення оксидного розплаву до FeO чи розведення розплаву магнетиту залізом, тобто проведення реакції [19]:



Зміна вільної енергії реакції (6) складає від -32174 до -63752 Дж/моль при температурах від плавлення до 3000 К. Константа рівноваги змінюється в межах $8 \dots 13$ в тому ж температурному інтервалі.

Останній спосіб і розглянуто в цій роботі.

Методика дослідження. *Проведення плавки.* Для одержання розплавів оксидів використовували плазмово-дугову плавку, обладнання для якої було розроблено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [15]. Воно дозволяє проводити плавку при умові, коли вся поверхня рідкої ванни покрита плазмовим факелом. Герметична камера, в якій проводиться плавка, охолоджується водою, є оглядова система спостереження за плазмовою дугою, система юстировки плазмотрону, система регулювання та контролю тиску газу.

Після розплавлення та витримки рідкої ванни в атмосфері плазмоутворювального газу відбувається фіксація високотемпературного стану розплаву в охолоджуваній водою металевій формі. Схему устаткування наведено на рис. 2.

Методика проведення плавки полягає в наступному. Зразок вагою $5,5 \dots 7,5$ г завантажуються в плавильну камеру на закритий кристалізатор. У камері створюється вакуум $0,133$ Па,

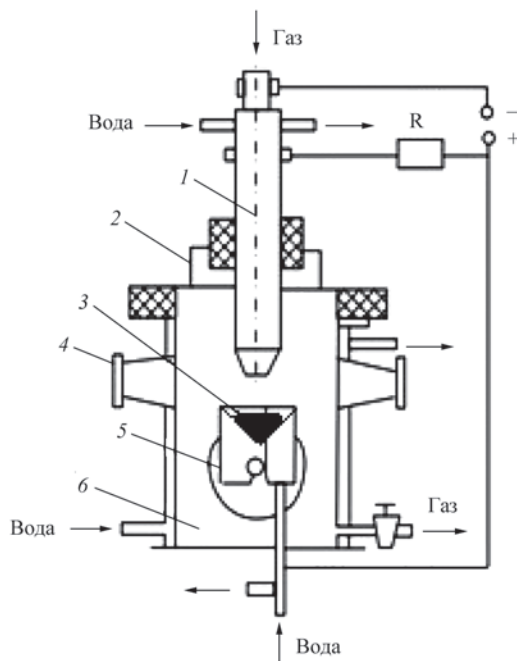
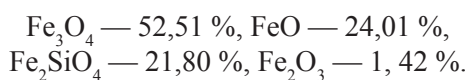


Рис. 2. Схема експериментальної плазмово-дугової установки [15]: 1 — плазмотрон; 2 — кришка; 3 — розплавлений зразок; 4 — оглядовий пристрій; 5 — кристалізатор, що розкривається; 6 — герметична камера

а потім об'єм камери заповнюється інертним плазмоутворювальним газом (аргоном) до тиску 83,36...98,07 кПа. Далі підпалюється дуга плазмотрону. Відбувається нагрівання і плавлення зразка котуна, а потім розплав витримується при плазмовому обігріві. Після закінчення витримки зразок швидко кристалізується у мідному охолоджуваному водою кристалізаторі. Проведено 10 плавок котунів з витримкою 150 с і одержані зразки були усереднені за хімічним складом, який наведено нижче:



Таким чином, кожний експеримент в наступному проводили з однаковим матеріалом. Склад силіциду заліза перерахували на FeO і вихідною

Вихідні дані для плавок і одержані результати для розбавлення розплаву залізом

Розрахунок для проведення експерименту								
Номер плавки з/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Маса Fe_3O_4 , г	4,021	2,913	2,673	3,244	3,826	3,826	3,821	3,101
Маса заліза, г	0	0,110	0,120	0,630	0,760	0,940	1,120	0,920
Fe/ Fe_3O_4	0	0,038	0,045	0,194	0,199	0,246	0,293	0,297
Результат експерименту								
Кількість Fe_3O_4 , %	57,11	23,25 20,32	25,86 17,25	20,1 20,08	31,06 29,45	17,39 17,14	0 0	0 0
Кількість FeO, %	42,89	76,75 79,68	74,14 82,75	79,9 79,92	68,95 70,55	82,61 82,86	100 100	100 100

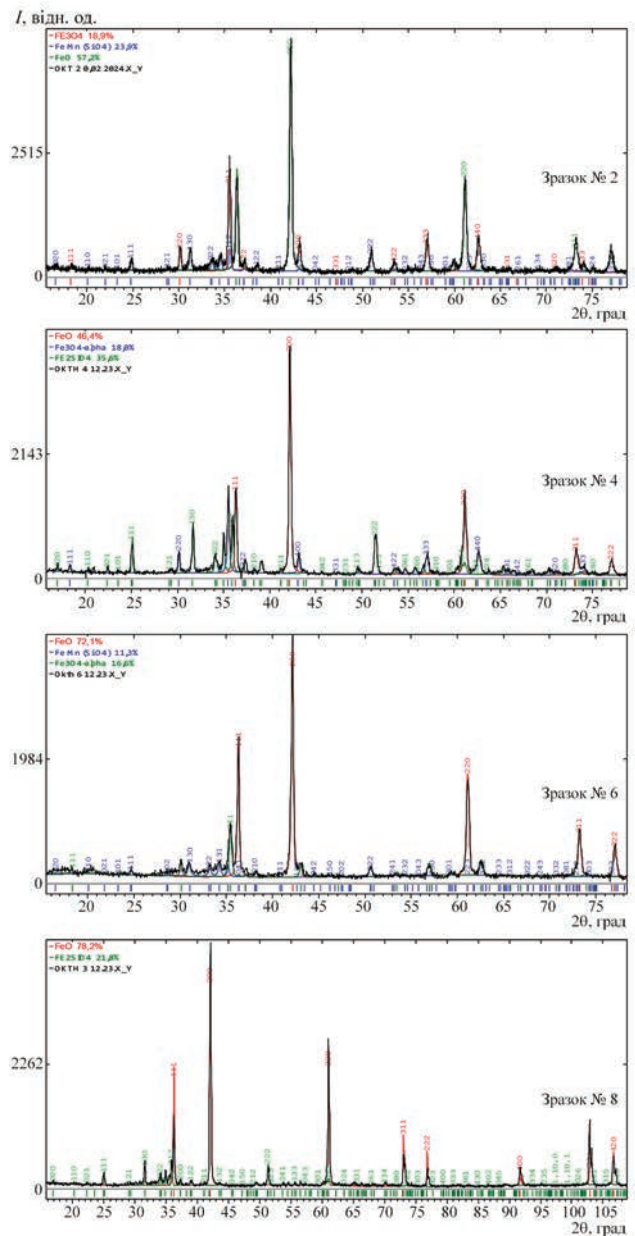


Рис. 3. Приклади рентгенівських спектрів зразків плавок 2, 4, 6, 8 (див. табл.)

точкою було взято суміш із двох складових Fe_3O_4 і FeO, яка складала 100 %. До оксидів додавали пев-

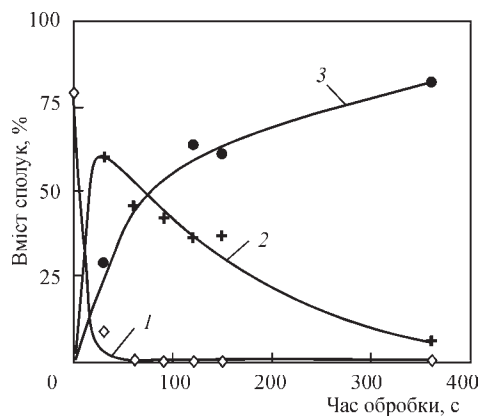


Рис. 4. Зміна вмісту оксидів у швидко закристалізованому розплаві після різної витримки при ПДП в атмосфері аргону: 1 — Fe₂O₃; 2 — Fe₃O₄; 3 — FeO

ну кількість заліза, яку попередньо розраховували. Дані розрахунків наведені у таблиці.

Рентгеноструктурні дослідження зразків проводили на дифрактометрі ДРОН УМ-1 у монохроматичному мідному K_{α} випромінюванні методом крокового сканування ($U = 35$ kV; $I = 25$ mA, час експозиції в точці 5 с, крок $0,05^{\circ}$, вихідні щілини 1×12 мм). Розшифрування отриманих дифрактограм виконували з використанням програми для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів від суміші полікристалічних фазових складових PowderCell 2.4. Профілі дифракційних максимумів апроксимували функцією псевдо-Войта (Pseudo-Voigt). Для розрахунків використовували міжнародну кристалографічну базу даних PCPDFWIN (1973).

Приклади одержаних рентгенівських спектрів зразків 2, 4, 6 і 8, відповідно таблиці, наведено на рис. 3. Після перерахунку кількість магнетиту і в'юститу відповідає наведеному у таблиці.

Експериментальні результати та їх обговорення. У роботі [19] дослідження кінетики розкладання котунів з технічних причин були обмежені терміном 150 с. Було вирішено подовжити термін плавки для перевірки можливості переведення розплаву в однорідний стан, який відповідає в'юститу, без розбавлення залізом.

Дослідження (рис. 4) показали, що зі збільшенням часу витримки розкладання продовжується по меншій мірі до 360 с.

Дослідження проводили як при безперервній витримці розплаву протягом 360 с, так і з періодичною кристалізацією і наступним нагріванням. Тобто зразок нагрівався протягом 30 с до розплавлення, витримувався 60 с і кристалізувався. Потім цикл повторювався. Кількість таких циклів дорівнювала 6. Таким чином, зразок у рідкому стані перебував протягом 360 с, а у стані нагрівання 180 с. Результати по цих двом схемам проведення

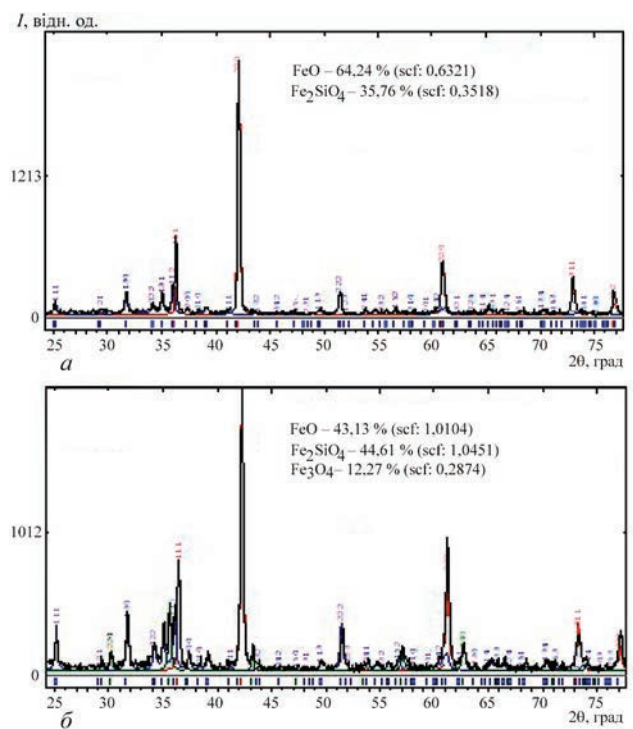


Рис. 5. Рентгенівські спектри зразків при ступінчастій і безперервній витримці розплаву: а — 6 циклів по 60 с, б — 1 цикл 360 с

плавок дещо різнилися. Так при безперервній витримці розплаву впродовж 6 хв при плазовому обігріві вміст в'юститу збільшується до 74,6 %, а магнетиту зменшується до 12,3 % (рис. 5, б). Решту складає SiO₂. При ступінчастому нагріві та кристалізації можливо за рахунок додаткового часу, який витрачається на повторні нагрівання, з твердої оксидної системи і з розплаву видаляється кисень і магнетит зникає (рис. 5, а). Таким чином, ми одержуємо розплав в'юститу, хоча при певному зростанні енергетичних витрат.

Головним негативним висновком є значне зменшення швидкості розкладання розплаву Fe₃O₄ до FeO зі збільшенням часу витримки розплаву оксидів у рідкому стані навіть при ПДП. Особливо,

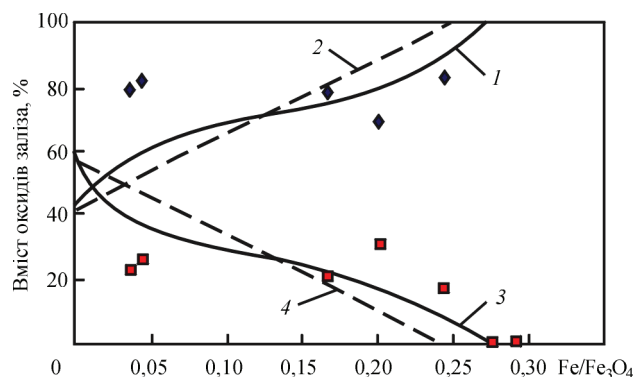


Рис. 6. Зміна складу оксидного розплаву в залежності від кількості доданого до магнетитного розплаву заліза: 1, 2 — вміст в'юститу; 3, 4 — вміст магнетиту; 1, 3 — експеримент, 2, 4 — теоретичний розрахунок

якщо враховувати розмірний фактор при переході від невеликих лабораторних наважок до реальних промислових мас металу.

Що стосується іншого способу, то теоретичний розрахунок для вихідних значень компонентів реакції (6) (див. таблицю) показав, що при додаванні заліза у розплав магнетиту залежність вмісту оксидів заліза від кількості заліза, щодо відношення Fe/Fe_3O_4 , має лінійний характер (рис. 6) і описується вказаними нижче рівняннями.

Зміна вмісту FeO (теоретична):

$$(FeO) = 237 \frac{Fe}{Fe_3O_4} + 42,9.$$

Зміна вмісту Fe_3O_4 (теоретична):

$$(Fe_3O_4) = -237 \frac{Fe}{Fe_3O_4} + 57,1.$$

Якщо відношення Fe/Fe_3O_4 дорівнює 0,241, то це означає, що весь магнетит, відповідно до реакції (6), переходить у в'юстит.

Різниця між теоретичною і експериментальною залежностями пов'язана, скоріш за все, з використанням невеликих наважок матеріалу при проведенні експериментів. Однак кінцева різниця між теоретичним значенням відношення вихідних компонентів реакції 0,241 і експериментальним 0,293 складає в абсолютних величинах 0,052 або приблизно 20 %, що можна вважати прийнятним.

Висновки

1. Встановлено, що при безперервній витримці розплаву в аргоновій плазмі в умовах експерименту протягом 360 с вміст в'юститу збільшується до 74,6 %, а магнетиту зменшується до 12,3 %. За 6 циклів періодичної кристалізації розплаву і наступному розплавленні з витримкою 60 с повністю зникає магнетит і утворюється розплав в'юститу FeO_{max} .

2. Спостерігається значне зменшення швидкості розкладання рідкого Fe_3O_4 до FeO зі збільшенням часу безперервної витримки розплаву оксидів у рідкому стані навіть при плазмово-дуговому нагріванні.

3. При додаванні заліза у розплав магнетиту теоретична залежність вмісту оксидів заліза від відношення Fe/Fe_3O_4 описується лінійними залежностями. Експериментальні значення відрізняються від теоретичних на 20 %, але дозволяють використовувати такий спосіб для одержання в'юститного розплаву.

Список літератури/References

1. *World steel in figures*. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures/>

- Kolisnichenko, V. *Carbon emissions in metallurgy will be reduced by 30 % by 2050 — Woodmac* [in Ukrainian]. <https://gmk.center.ua/news/vybrosy-ugleroda-v-metallurgii-k-2050-godu-sokratyatsya-na-30-woodmac-2/>
- Kolisnichenko, V. *10 biggest polluting countries emitted record amount of CO₂ in 2023* [in Ukrainian]. <https://gmk.center.ua/news/10-najbilshih-krain-zabrudnjuvachiv-u-2023-roci-vikinuli-rekordnu-kilkist-so2/>
- In 2024 steel production in Ukraine will amount 7-8 mln tons according to experts*. <https://delo.ua/ru/industry/v-2024-godu-vyplavka-stali-v-ukraine-sostavit-7-8-mln-tonn-429900/>
- By the results of 2023 Ukrainian metallurgists produced 5,37 mln t of roll stock*. <https://gmk.center/news/ukrainskie-metallurgi-po-itogam-2023-goda-proizveli-5-37-mln-t-prokata/>
- Metallurgy of Ukraine: 30 years of evolution and partnership*. <https://mind.ua/ru/publications/20230257-metallurgiya-ukrainy-30-let-evolyucii-i-partnerstva>
- Behera, P., Rajput, P., Bhoi, B. (2022) A sustainable technology to produce green and clean steel by hydrogen plasma smelting reduction. In: *Proc. of the IEI Conf. on Advanced Materials Technology Department CSIR-Institute of Minerals and Materials Technology, Bhubanswar, Odisha, India*, 751013. DOI: https://doi.org/10.36375/prepare_u.iei.a282. <https://preprint.prepare.org.in/index.php/iei/article/view/282/155>
- (2021) *Carbon-free steel production: Cost reduction options and usage of existing gas infrastructure*. European Parliamentary Research Service. Brussels. EU. DOI: <https://doi.org/10.2861/01969>. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU\(2021\)690008_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU(2021)690008_EN.pdf)
- Electricity production in Ukraine increased by 5 % over the year*. *Ekonomichna Pravda*. [in Ukrainian]. <https://www.epravda.com.ua/news/2022/01/11/681292/>
- Tiara Triana, Geoffrey Brooks, M. Akbar Rhamdhani (2024) Ammonia direct reduction of iron oxides-preliminary assessment. In: *Proc. of the Iron & Steel Technology Conf. (AISTech 2024), Columbus, Ohio, USA*, 295–302. DOI: <https://doi.org/10.33313/388/035>
- Tiara Triana, Geoffrey A. Brooks, M. Akbar Rhamdhani, Mark I. (2024) Iron oxide direct reduction and iron nitride formation using ammonia: Review and thermodynamic analysis. *J. of Sustainable Metallurgy*, **10**, 1428–1445. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00860-z>
- Shapovalov V.O., Biktagirov F.K., Mogylatenko V.G. (2023) *Out-of-furnace processing of steels: Methods, processes, technologies*. PWI, Kyiv, Khimgest.
- Tiago Bristt Gonoring, Adonias Ribeiro Franco, Estefano Aparecido Vieira, Ramiro Conceição Nascimento (2022) Kinetic analysis of the reduction of hematite fines by cold hydrogen plasma. *J. of Materials Research and Technology*, **20**, 2173–2187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.174>
- Lakomsky, V.I. (1974) *Plasma arc remelting: Monography*. Kyiv, Tekhnika [in Russian].
- Grigorenko, G.M., Pomarin, Yu.M. (1989) *Hydrogen and nitrogen in metals during plasma melting*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Shurkhal, V.Ya., Larin, V.K., Chernega, D.F. et al. (2000) *Physical chemistry of metallurgical systems and processes: Manual*. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Ukrainian].
- Kozin, R.V., Shapovalov, V.O., Mogylatenko, V.G., Biktagirov, F.K. (2023) Analysis of direct reduction of iron by hydrogen. In: *15th Inter. Sci.-Tekhn. Conf. on New Materials and Technologies in Mechanical Engineering, 9 April 27–28, 2023, Kyiv, KPI, IPMS, PWI*.
- Knyuppel, G. (1973) Deoxidation and vacuum treatment of steel. Pt 1. Thermodynamic and kinetic regularities. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

19. Shapovalov, V.O., Mogylatenko, V.G., Karpets, M.V., Kozin, R.V. (2023) Thermal decomposition of hematite pellets at

heating by argon plasma. *Suchasna Elektrometal.*, 3, 13–18 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.03.03>

PRODUCING A WUSTITE MELT BY THERMAL DECOMPOSITION OF HEMATITE PELLETS WITH ARGON PLASMA

V.O. Shapovalov¹, V.G. Mogylatenko^{1,2}, M.V. Karpets^{1,2}, R.V. Kozin¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

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

Reducing CO₂ emissions is of paramount importance, in order to address the issues of global warming. The negative contribution of metallurgists in Ukraine to atmospheric pollution over the past 20 years amounted to about 1 billion tons of carbon dioxide by the year 2020. The solution appears to lie in the transition to the production of “green steel”, i.e. steel manufactured from direct hydrogen-based reduction iron. Under the conditions of plasma heating application, high temperatures lead to rapid melting of the pellets, thermal decomposition of oxides occurs, and the reducing agent (hydrogen) is activated. Decomposition of oxides during the heating and melting process accelerates the overall process of pellet reduction to wüstite. Only after that the use of hydrogen for reduction of iron and its deoxidation becomes justified. It has been established that formation of a wüstite melt is possible without the use of a reducing agent during plasma melting in an argon atmosphere. 19 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: direct reduction, pellets, thermal decomposition, kinetics, magnetite melt, dilution with iron, wüstite

Отримано 16.09.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 21.10.2024

Прийнято 16.02.2025

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ВИРОБНИЦТВО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТА

Компанія «ПлазмаТек», об'єднавши компетенції Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», у 2018 р. заснувала R&D центр, задачою якого було створення конкурентних інноваційних розробок і технологічних рішень для забезпечення промисловості принципово новими методами виробництва. Технологічним ядром центру є обробка матеріалу високоенергетичним пучком електронів в установках електронно-променевого переплаву. Потенціал і ресурси R&D центру дозволяють вести повний комплекс робіт, що включає:

- проведення наукових досліджень;
- проектування виробів та прогнозування робочого ресурсу;
- індивідуальну розробку технологій виробництва твердосплавних деталей.

Переваги R&D центру:

- володіння технологіями повного циклу переробки вторинної сировини і виробництва нових деталей на основі твердих сплавів WC–Co;
- наявність власної науково-виробничої лабораторії, що забезпечує контроль процесу розробки технологій та виробництва на кожному етапі;
- висококваліфікована спеціалізація в електронно-променевих технологіях зварювання, переплаву, термообробки, спікання та нанесення покриттів.

Деталі, які виробляються на регулярній основі:

- твердосплавні ролики для станів з намотування дроту;
- ролики металургійні направляючі та окалиноломачі для станів підкату дроту (матеріал WC–Co);
- ролики для станів волочіння дроту з твердосплавними вставками WC–Co.

Всі рішення ми розробляємо індивідуально відповідно до вимог замовника
<https://plasmatec-weld.com.ua/>



D — 26 мм
 d — 18 мм
 H — 20 мм



D — 56 мм
 d — 28 мм
 H — 45 мм