

ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ГЕМАТИТОВИХ КОТУНІВ ПРИ НАГРІВАННІ АРГОНОВОЮ ПЛАЗМОЮ

В.О. Шаповалов¹, В.Г. Могилатенко^{1,2}, М.В. Карпець², Р.В. Козін¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: shapovalov@paton.kiev.ua

²НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: vmogilatenko@gmail.com

У зв'язку з глобальним потеплінням виникло питання зменшення викидів парникових газів при будь-яких промислових процесах і у тому числі в металургії. Рішення цього питання в металургійній галузі пов'язане з прямим відновленням заліза воднем і використанням висококонцентрованих джерел енергії для нагрівання, зокрема плазми. При високих температурах у рідкому розплаві оксидів можливе розкладання оксидів ще до використання водню для відновлення. Це дає можливість одержати в'юститний розплав за вмістом кисню без гематиту і магнетиту. Одержані висновки підтверджені термодинамічними розрахунками і результатами дослідження кінетики розкладання оксидів котуна при плазово-дуговій плавці в атмосфері аргону. Бібліогр. 18, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: оксиди заліза, термічне розкладання, термодинаміка дисоціації, кінетика розкладання, плазово-дугова плавка, в'юститний розплав

Вступ. Глобальне потепління визнано однією з основних проблем людства і тому вже зараз йдеться про кліматичну мобілізацію усіх країн щодо вирішення цього питання. При цьому Україна та ЄС мають об'єднати зусилля для цілковитої декарбонізації та екомодернізації економіки [1]. Для переходу на «Зелену» енергетику потрібна державна підтримка саме відновлюваних джерел енергії, які будуть постачати енергію для промисловості. «Зелена» енергетика є неодмінною умовою для виробництва будь-якої продукції, у тому числі «зеленої» сталі.

Щодо металургії, то парникові гази, особливо CO₂, утворюються у великих кількостях при виробництві сталі. До 2050 р. ЄС прагне зменшити викиди CO₂ з 1300 до 80...320 кг на тонну сталі. Крім того, ЄС запровадить податок на прикордонне вуглецеве коригування, від чого Україна може суттєво постраждати, особливо її металургія та деякі інші галузі промисловості: хімічна промисловість, виробництво цементу і графітових електродів, теплоенергетика та ін. [1].

Парникові гази утворюються практично на всіх етапах металургійного переділу: при спалюванні палива, протіканні реакцій зневуглецювання металу, розкисненні розплаву вуглецем, розкладанні компонентів флюсу тощо.

Пряме відновлення заліза з оксидів відомо досить давно. У роботах [2–7] наведено результати вивчення процесів відновлення заліза в твердому стані з руди або котунів різними відновними газами та газовими сумішами. Аналіз цих робіт показує, що відновлення воднем має велику пере-

вагу перед способом відновлення заліза у газовому середовищі вуглецем або в атмосфері водяного газу. Головна перевага його полягає в тому, що різко знижуються викиди металургійним підприємством пилу, сірчистих газів, оксиду та діоксиду вуглецю в атмосферу. Одержуваний після відновлення продукт — губчасте залізо, практично не містить сірки та фосфору.

Стан питання. Поєднання відновлення заліза з котунів спочатку у твердому, а потім і у рідкому стані, проведено в роботі [8]. Одночасне плавлення та відновлення зразків досягалося у плазово-дуговій печі. Було встановлено, що гематит (Fe₂O₃) відновлюється до суміші магнетиту (Fe₃O₄) та в'юститу (FeO) у суто аргонній плазмі. Втрата кисню гематитом внаслідок термічного розкладання при безперервному нагріванні більше 15 хв становить приблизно 14 % загального його зниження. Аналіз літературних джерел показує, що більшість досліджень спрямовані в основному на відновлення залізняку в твердому стані, а досліджень в області відновлення воднем рідкої залізної руди недостатньо.

Аналіз досліджень розкиснення заліза аргонно-водневою високотемпературною плазмою, проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [9–12], показав, що водневе розкиснення не набуло належного розвитку переважно внаслідок низької швидкості процесу. І хоча відновлення заліза з розплаву оксидів до FeO відбувається досить легко, але остання стадія відновлення до Fe протікає дуже мляво [13].

В.О. Шаповалов — <http://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, В.Г. Могилатенко — <http://orcid.org/0000-0002-6550-2058>, М.В. Карпець — <http://orcid.org/0000-0001-9528-1850>, Р.В. Козін — <http://orcid.org/0000-0002-8501-0827>

У той же час, відновлення заліза при плазмово-дуговій плавці (ПДП) забезпечується інтенсифікацією процесів відновлення як застосуванням водню замість вуглецю або водяного газу, так і високою температурою плазми [14]. При плазмовій плавці температура дуги на зрізі сопла плазмотрона становить до 18000...25000 К і в зоні дуги відбуваються утворення атомів з молекул водню, їх іонізація та збудження. Атоми при зіткненні з металом можуть передавати йому не тільки свою кінетичну енергію, а й внутрішню енергію коливального та обертального руху [15–18]. У такому стані водень є дуже активним і відновлює залізо швидше ніж вуглець.

Температура поверхневого шару розплаву залежить від багатьох факторів: струму плавки, довжини дуги, витрати плазмоутворювального газу та його природи. За межами зони анодної плями температура металу значно знижується приблизно з 3700...4000 до 2300...2800 К [17, 18]. Все це впливає на термодинаміку та кінетику розкладання оксидів заліза. Термічне розкладання оксидів при ПДП може заощаджувати водень, який не є дешевим. І в той же час, термічне розкладання котунів при ПДП в аргоні у відомій нам науковій літературі відображено дуже слабо. Тому є сенс розглянути термодинаміку і кінетику цього процесу.

Методика дослідження і устаткування для плавлення. Загальний вигляд плазмово-дугової установки УПІ показано на рис. 1. Вона дозволяє вивчати поглинання газу із плазми рідким металом або шлаком при умові, коли вся поверхня рідкої ванни покрита плазмовим факелом і з ванною контактує активний газ. Герметична камера охолоджується водою, є оглядова система спостереження за плазмовою дугою, системи юстировки плазмотрона, регулювання та контролю тиску газу.

Методика проведення плавки полягає в наступному. Зразок вагою 5,5...7,5 г завантажується в

плавильну камеру на закритий клиновий кристалізатор. У камері створюється вакуум 98,07 кПа, а потім об'єм камери заповнюється інертним газом (аргон) до тиску 83,36...98,07 кПа. Надалі проводиться підпал дуги плазмотрона, у якості плазмоутворювального газу використовується аргон. Протягом 30 с відбувається плавлення зразка котуна, а потім витримка при плазмовому обігріві. Після закінчення витримки зразок швидко кристалізується у клиновому мідному охолоджуваному водою кристалізаторі.

Рентгеноструктурні дослідження зразків проводили на дифрактометрі ДРОН УМ-1 у монохроматичному мідному K_α випромінюванні методом крокового сканування ($U = 35$ кВ; $I = 25$ мА, час експозиції в точці 5 с, крок $0,05^\circ$, вихідні щілини 1×12 мм). Обробку 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 PDF-2.

Результати експериментів та їх обговорення. Термодинаміка розкладання оксидів заліза. При температурах розплавлених оксидів заліза і особливо при плазмовому нагріванні, коли температура поверхневих шарів розплаву може сягати 4000°C , створюються умови для розкладання оксидів заліза. У табл. 1 наведено дані розрахунку температур рівноваги реакцій розкладання оксидів заліза у розрахунку на один моль кисню, що видаляється з розплаву, а на рис. 2 — зміну вільної енергії Гіббса цих реакцій.

Реакція розкладання Fe_2O_3 до Fe_3O_4 відбувається ще до розплавлення гематиту, а після переходу у рідкий стан одержуємо рідкий оксид складу

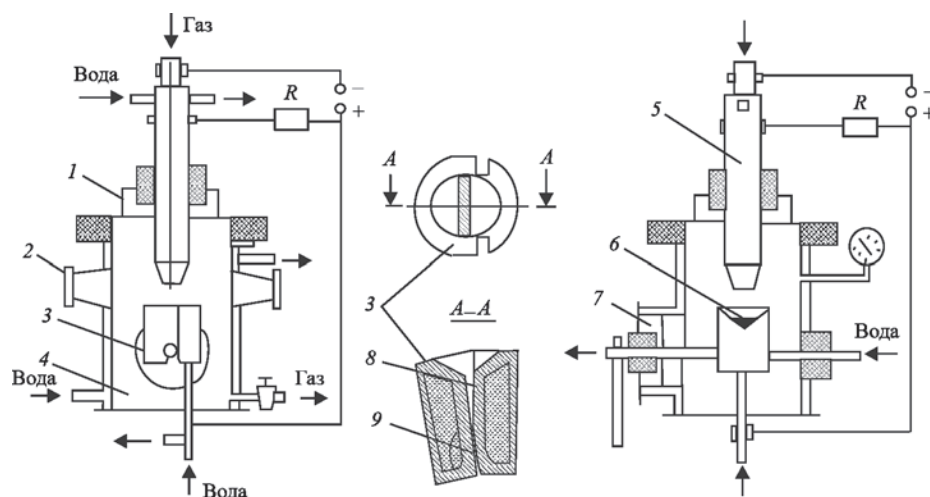


Рис. 1. Схема експериментальної плазмово-дугової установки УПІ [11]: 1 — кришка; 2 — оглядовий пристрій; 3 — кристалізатор, що розкривається; 4 — реакційна камера; 5 — плазмотрон; 6 — розплавлений зразок; 7 — центрувальний фланець; 8 — зразок, що закристалізувався; 9 — вісь повороту рухомого елемента кристалізатора

магнетиту та кисень. Подальше видалення кисню з магнетиту його розкладанням можливе лише при зростанні температури розплаву вище приблизно 3175 К за реакцією $2\text{Fe}_3\text{O}_4 = 6\text{FeO} + \text{O}_2$.

При швидкому нагріванні вище приблизно 2250 К можливе утворення в'юститу за реакцією 2 (рис. 2, а), за температур вище 3152 К розкладання гематиту буде відбуватися до заліза (реакція 3, рис. 2, а). Таким чином, проходження реакцій розкладання (рис. 2) буде визначатися швидкістю нагрівання гематиту і швидкістю протікання реакцій розкладання оксидів.

З наведених даних можна зробити висновок: по-перше, досягнення температур розплаву понад 3000 К можливе лише при застосуванні висококонцентрованих джерел нагріву (наприклад, плазми), і по-друге, немає сенсу використовувати для відновлення заліза водень з самого початку розплавлення, якщо при високих температурах всі наведені реакції йдуть до кінця та при використанні для нагріву плазми температура поверхні розплаву в анодній плямі дуги може сягати до 4000 К. Як випливає з табл. 1, на протікання реакцій можуть накладатися лише деякі кінетичні обмеження, які призведуть до повільного перебігу певних із них у залежності від температури. Слід зауважити, що в умовах експерименту поверхня всього розплавленого зразка знаходилася в зоні анодної плями.

Таким чином, термічному розкладанню може бути підданий будь-який тип залізняку: гематит, магнетит, гетит (гідрооксид $\text{FeO}(\text{OH})$ складом Fe_2O_3 — 89,9 і H_2O — 10,1 %). Однак найбільшу термодинамічну ймовірність проходження мають реакції розкладання гематиту або гетиту після його зневоднення. Реакції розкладання можуть проходити одночасно і при умові досягнення необхідної високої температури буде одержано розплав заліза. Найповільнішою ланкою процесу є розкладання магнетиту і в'юститу, на що вказують розрахункові дані констант рівноваги реакцій (табл. 1).

Якщо врахувати, що в реальних умовах ПДП температура поверхневого шару розплаву в анодній плямі (3700...4000 К) значно відрізняється від температури за її межами (2300...2800 К) [17, 18],

Таблиця 1. Температури рівноваги, зміна вільної енергії Гіббса та константа рівноваги реакцій розкладання оксидів заліза при 4000 К

Реакція	Температура рівноваги реакції ($\Delta G = 0$), К	$\lg K_p^{4000\text{K}}$	$\Delta G^{4000\text{K}}$, Дж
$6\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$	1578	18,92	-1445526
$2\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4\text{FeO} + \text{O}_2$	2250	7,12	-543893
$2/3\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4/3\text{Fe} + \text{O}_2$	3152	3,69	-281561
$2\text{Fe}_3\text{O}_4 = 6\text{FeO} + \text{O}_2$	3175	1,22	-93077
$1/2\text{Fe}_3\text{O}_4 = 3/2\text{Fe} + \text{O}_2$	3517	1,78	-136065
$2\text{FeO} = 2\text{Fe} + \text{O}_2$	3562	1,97	-150395

то не всі вище розглянуті реакції можуть проходити. Але за умови видалення кисню з атмосфери печі за межами анодної плями не буде відбуватися оборотна реакція утворення оксидів. При великій витримці розплаву під дією плазми можливе проходження всіх реакцій до кінця. А в реальних умовах є можливість одержання розплаву в'юститу.

Кінетика розкладання оксидів заліза. Розкладання оксидів заліза вивчали при плазмовому нагріванні зразка котуна вагою до 7,5 г. Склад швидко закристалізованих розплавів визначали рентгеновським методом. Рентгенограми вихідного і кінцевого зразків наведені на рис. 3, а всі одержані результати по вмісту оксидів у зразках — у табл. 2.

Слід зауважити, що хоча анодна пляма плазми перекривала повністю розплавлений об'єм зразка, однак водоохолоджуваній мідній клиновий кристалізатор охолоджував зразок до такого ступеня, що він не мав змогу перегрітися до температур розкладання оксидів до заліза. У кількості в'юститу, що утворився, враховували і FeO , зв'язаний у силікат $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$.

При витримці 180 і 210 с розплав розігрівався достатньо сильно, зростала його рідкоплинність, він затікав у щілину кокілю та кристалізувався. Тому останні два результати, що наведені у табл. 2, не враховували при побудові графіка (рис. 4).

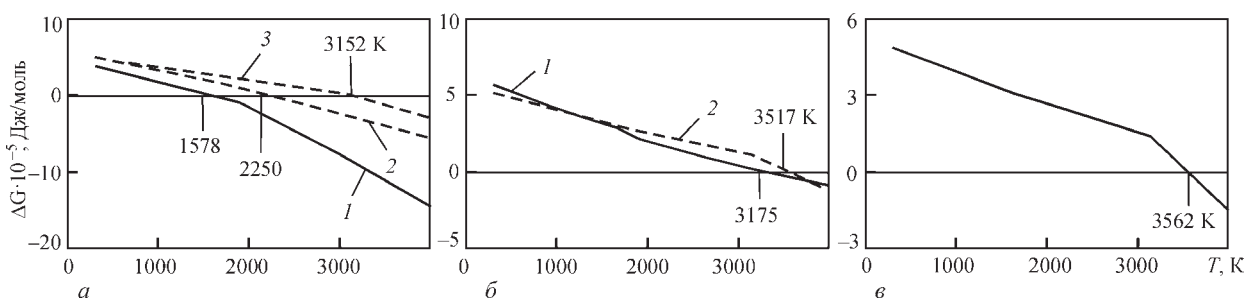


Рис. 2. Зміна вільної енергії Гіббса реакцій розкладання (дисоціації) оксидів заліза: а — гематиту (1 — $6\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$; 2 — $2\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4\text{FeO} + \text{O}_2$; 3 — $2/3\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4/3\text{Fe} + \text{O}_2$); б — магнетиту (1 — $2\text{Fe}_3\text{O}_4 = 6\text{FeO} + \text{O}_2$; 2 — $1/2\text{Fe}_3\text{O}_4 = 3/2\text{Fe} + \text{O}_2$); в — в'юститу ($2\text{FeO} = 2\text{Fe} + \text{O}_2$)

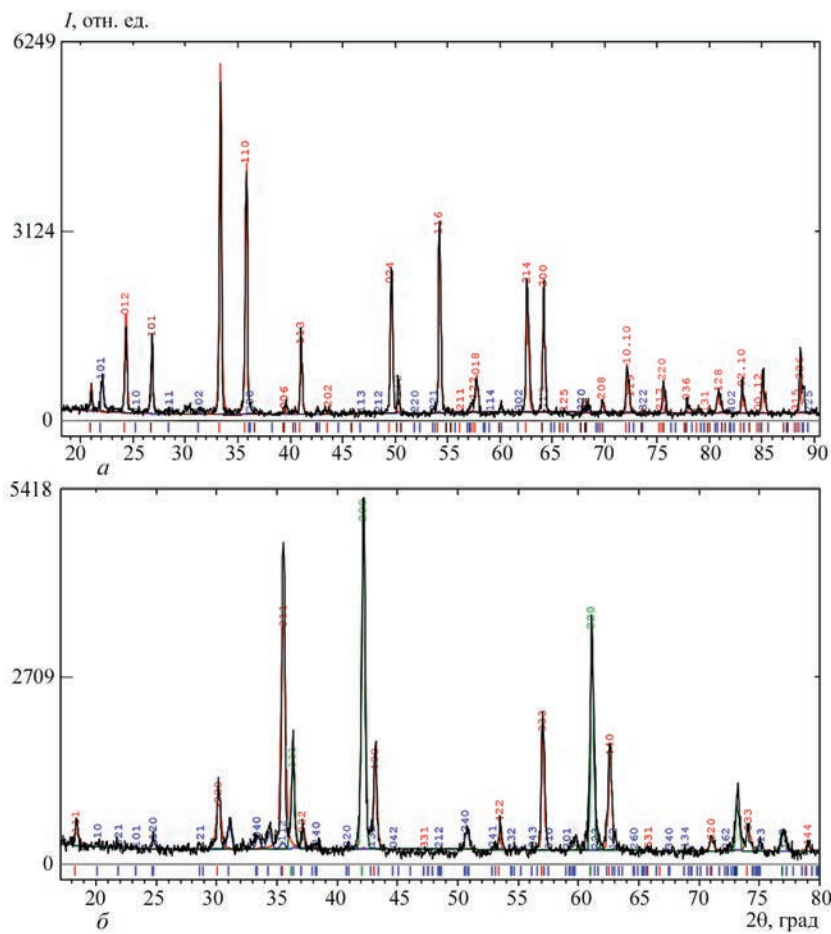


Рис. 3. Рентгенограми вихідного (а) і кінцевого (б) зразків оксидів (150 с витримки, табл. 2)

Таблиця 2. Кінетика зміни кількості оксидних фаз котуна при ПДП

Фаза	Час плавки, с							
	0	30	60	90	120	150	180	210
Fe ₂ O ₃	79,2	8,9	0	0	0	0	0	0
Fe ₃ O ₄	0	59,8	45,6	42,4	36,1	37,1	61,1	63,4
Σ FeO	0	29,0	44,0	53,3	63,5	60,9	38,9	32,0
2FeO·SiO ₂	0	8,1	35,4	13,9	4,8	7,0	0	0
SiO ₂	20,8	—	—	—	—	—	—	—

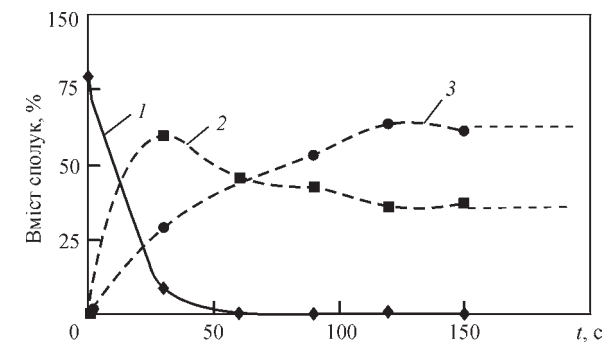


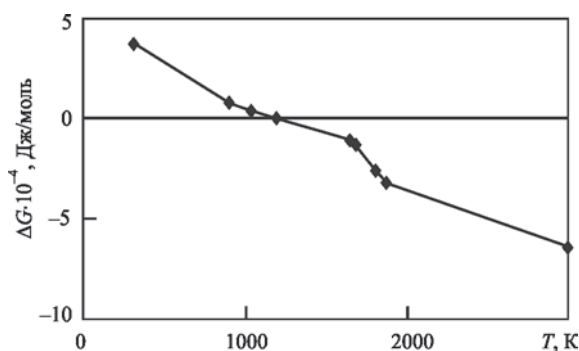
Рис. 4. Зміна вмісту оксидів у швидко закристалізованому розплаві після різної витримки при ПДП: 1 — Fe₂O₃; 2 — Fe₃O₄; 3 — FeO

Можна припустити, що відбувається певна стабілізація складу оксидів розплаву, що пов'язано з обмеженнями у протіканні реакції розкладання вищих оксидів заліза до в'юститу. Приблизний склад такого розплаву наступний: 37 % Fe₃O₄ і 63 % FeO, тобто 24,21 % кисню та 75,79 % Fe. Таким чином, зменшення вмісту кисню за рахунок термічного розкладання за 150 с обробки розплаву аргонною плазмою склало в абсолютних одиницях приблизно 5,8 %.

Одним із способів одержання розплаву в'юститу може бути додавання в магнетито-в'юститний розплав заліза. Тоді може відбуватися реакція

Таблиця 3. Термодинамічні характеристики рівняння хімічної реакції $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe} = 4\text{FeO}$

T, K	$\Delta H, \text{Дж/моль}$	$\Delta S, \text{Дж/(моль} \cdot \text{K)}$	$\Delta G, \text{Дж/моль}$	$\lg K_p$
298	54500	56,24	37740	-6,6307
900	34038	29,40	7577	-0,4408
1033	29982	25,31	3834	-0,1943
1184	27057	22,72	160	-0,0071
1650	153639	99,49	-10515	0,3336
1673	153258	99,26	-12808	0,4008
1809	141985	93,12	-26463	0,7659
1870	5723	20,27	-32174	0,9008
3000	39770	34,51	-63752	1,1126

Рис. 5. Зміна вільної енергії Гіббса реакції $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe} = 4\text{FeO}$

$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe} = 4\text{FeO}$, особливо при температурах вище плавлення заліза, незважаючи на відносно невелике значення константи рівноваги реакції (рис. 5, табл. 3).

Таким чином, існує можливість одержання розплаву в'юстити плазмово-дуговою плавкою в атмосфері аргону з додаванням у оксидний розплав чистого заліза. Цей висновок буде перевірено найближчим часом.

Висновки

1. Використання аргонно-водневої плазми є перспективним для одержання так званого «зеленого» заліза з котунів оксидів, що запобігає виділенню парникових газів.

2. Термічне розкладання оксидів заліза, яке відбувається при нагріванні та розплавленні котунів, в умовах високих температур плазми і відтоку кисню, що при цьому виділяється, може грати позитивну роль у зменшенні витрат водню при відновленні заліза. Водень можна використовувати тільки на останньому етапі відновлення заліза з FeO.

3. Зменшення вмісту кисню за рахунок термічного розкладання за 150 с обробки розплаву аргонно-водневою плазмою склало приблизно 5,8 % і є перспектива подальшого його зменшення.

4. Термодинамічні розрахунки показали, що існує можливість одержання чисто в'юститного розплаву додаванням чистого заліза до розплаву

котуна, який надалі можна піддавати обробці аргонно-водневою плазмою.

Список літератури

1. Гура К.Ю., Петрук В.Г. (2021) Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації та екомодернізації енергетики України і світу. *Вісник ВПІ*, **5**, 19–26. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>
2. Da Costa A.R., Patisson F. (2013) Modelling a new, low CO₂ emissions, hydrogen steelmaking process. *J. of Cleaner Production*, **46**, 27–35. DOI: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.1715.pdf>
3. 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>
4. Zuo Hb., Wang C., Dong Jj. et al. (2015) Reduction kinetics of iron oxide pellets with H₂ and CO mixtures. *Inter. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, **22**(7), 688–696. DOI: [10.1007/s12613-015-1123-x](https://www.researchgate.net/publication/282499310). <https://www.researchgate.net/publication/282499310>
5. Donghui Liu, Xiaozhe Wang, Jianliang Zhang et al. (2017) Study on the controlling steps and reduction kinetics of iron oxide briquettes with CO–H₂ mixtures. *Metall. Res. Technol.*, **114**(6), 611. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2017072>. <https://www.researchgate.net/publication/320229625>
6. 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>
7. 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>
8. Isnaldi R. Souza Filho, Hauke Springer, Yan Ma et al. (2022) Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores. DOI: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.13356.pdf>
9. Забарилло О.С., Слышанкова В.А., Лакомский В.И. (1968) Поведение кислорода в металле оплавающейся заготовки при плазменно-водородном раскислении. *Специальная электрометаллургия*, **1**, 128–134.
10. Забарилло О.С., Лакомский В.И. (1968) Водородное раскисление при плазменно-дуговом переплаве пермалоя 50Н. *Специальная электрометаллургия*, **2**, 61–69.
11. Забарилло О.С., Лакомский В.И. (1968) Поведение углерода при плазменно-дуговом переплаве сплава 50Н и железа армо. *Специальная электрометаллургия*, **4**, 78–85.
12. Забарилло О.С. (1969) Плазменно-водородное раскисление железа, никеля и их сплавов: дис ... канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
13. Shapovalov V.O., Mogylatenko V.G., Biktagirov F.K., Kozin R.V. (2023) Analysis of direct reduction of iron by hydrogen. *Сб. тр. XV Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023»*, 27–28

- квітня 2023 р., м. Київ, сс. 33–40. DOI: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf
14. Mogylatenko V.G., Shapovalov V.O., Biktagirov F.K., Kozin R.V. (2023) Thermal decomposition of hematite pellets during plasma-arc smelting in argon atmosphere. *Сб. тр. XV Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023»*, 27–28 квітня 2023 р., м. Київ, сс. 23–29. DOI: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf
 15. Лакомский В.И. (1974) *Плазменно-дуговой переплав*. Киев, Техника.
 16. Naseri M., Seftjani, Schenk J. (2018) Reaction kinetics of molten iron oxides reduction using hydrogen. *La Metallurgia Italiana*, July, 7–8, 5–14. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/327594827>
 17. Григоренко Г.М., Помарин Ю.М. (1989) *Водород и азот в металлах при плазменной плавке*. Киев, Наукова думка.
 18. Патон Б.Є., Григоренко Г.М., Шейко І.В. та ін. (2013) *Плазмові технології та устаткування в металургії і ливарному виробництві*. Київ, Наукова думка.
- References**
1. Gura, K.Yu., Petruk, V.G. (2021) Analysis of modern tendencies of decarbonization and eco-modernizing of power engineering in Ukraine and in the world. *Visnyk VPI*, 5, 19–26 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>
 2. Da Costa, A.R., Patisson, F. (2013) Modelling a new, low CO₂ emissions, hydrogen steelmaking process. *J. of Cleaner Production*, 46, 27–35. DOI: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.1715.pdf>
 3. 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>
 4. Zuo, Hb., Wang, C., Dong, Jj. et al. (2015) Reduction kinetics of iron oxide pellets with H₂ and CO mixtures. *Inter. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, 22(7), 688–696. DOI: 10.1007/s12613-015-1123-x. <https://www.researchgate.net/publication/282499310>
 5. Donghui Liu, Xiaozhe Wang, Jianliang Zhang et al. (2017) Study on the controlling steps and reduction kinetics of iron oxide briquettes with CO–H₂ mixtures. *Metall. Res. Technol.*, 114(6), 611. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2017072>. <https://www.researchgate.net/publication/320229625>
 6. 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>
 7. Patisson, F., Mirgaux, O., Birat, J.-P. (2021) Hydrogen steel-making. Pt 1: Physical chemistry and process metallurgy. *Matériaux & Techniques*, 109(3–4), 303–313. DOI: <https://doi.org/10.1051/mattech/2021025>
 8. Isnaldi, R. Souza Filho, Hauke Springer, Yan Ma et al. (2022) Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores. DOI: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.13356.pdf>
 9. Zabarilo, O.S., Slyshankova, V.A., Lakomsky, V.I. (1968) Behavior of oxygen in metal of melted billet at plasma-hydrogen deoxidizing. *Spets. Elektrometallurgiya*, 1, 128–134 [in Russian].
 10. Zabarilo, O.S., Lakomsky, V.I. (1968) Hydrogen deoxidizing in plasma-arc remelting of permalloy 50H. *Spets. Elektrometallurgiya*, 2, 61–69 [in Russian].
 11. Zabarilo, O.S., Lakomsky, V.I. (1968) Behavior of hydrogen in plasma-arc remelting of 50H alloy and armco iron. *Spets. Elektrometallurgiya*, 4, 78–85 [in Russian].
 12. Zabarilo, O.S. (1960) *Plasma-hydrogen deoxidizing of iron, nickel and their alloys*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Russian].
 13. Shapovalov, V.O., Mogylatenko, V.G., Biktagirov, F.K., Kozin, R.V. (2023) Analysis of direct reduction of iron by hydrogen. In: *Proc. of 15th Int. Sci.-Techn. Conf. on New Materials and Technologies in Machine-Building-2023 (Kyiv, April 27–28, 2023)*, 33–40. DOI: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf
 14. Mogylatenko, V.G., Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Kozin, R.V. (2023) Thermal decomposition of hematite pellets during plasma-arc smelting in argon atmosphere. In: *Proc. of 15th Int. Sci.-Techn. Conf. on New Materials and Technologies in Machine-Building-2023 (Kyiv, April 27–28, 2023)*, 23–29. DOI: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf
 15. Lakomsky, V.I. (1974) *Plasma-arc remelting*. Kyiv, Tekhnika [in Russian].
 16. Naseri Seftjani, M., Schenk, J. (2018) Reaction kinetics of molten iron oxides reduction using hydrogen. *La Metallurgia Italiana*, 7–8, 5–14 <https://www.researchgate.net/publication/327594827>
 17. Grigorenko, G.M., Pomarin, Yu.M. (1989) *Hydrogen and nitrogen in metals during plasma melting*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 18. Paton, B.E., Grigorenko, G.M., Sheiko, I.V. et al. (2013) *Plasma technologies and equipment in metallurgy and foundry*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

THERMAL DECOMPOSITION OF HEMATITE PELLETS AT HEATING BY ARGON PLASMA

V.O. Shapovalov¹, V.G. Mogylatenko^{1,2}, M.V. Karpets², R.V. Kozin¹¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: shapovalov@paton.kiev.ua²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».37 Pobedy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: vmogilatenko@gmail.com

Global warming raised the issue of reducing greenhouse gas emissions in any industrial processes, including metallurgy. Solution of this problem in the metallurgical field is associated with direct reduction of iron ore with hydrogen and application of highly concentrated energy sources for heating, in particular plasma. At high temperatures, oxides can decompose in the liquid oxide melt even before hydrogen is used for reduction. It enables producing the wustite melt by oxygen content without hematite and magnetite. The conclusions reached were confirmed by thermodynamic calculations and results of studying the kinetics of decomposition of pellet oxides in plasma-arc melting in argon atmosphere. 18 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

Keywords: iron oxides, thermal decomposition, dissociation thermodynamics, decomposition kinetics, plasma-arc melting, wustite melt

Надійшла до редакції 21.06.2023