

Гришин О.М., Величко О.Г., Грек О.С., Надточій А.А.

**Вуглецевотермічне відновлення оксидів заліза в умовах електромагнітного впливу**

Grishin O.M., Velychko O.G., Grek O.S., Nadtochiy A.A.

**Carbothermal reduction of iron oxides under electromagnetic influence**

**Мета.** З метою отримання кількісних характеристик впливу електромагнітного поля на процес відновлення оксидів заліза вуглецем у твердій фазі та вивчення механізму цього процесу проведено експериментальні дослідження вуглецевотермічного та комплексного відновлення заліза з гематиту, магнетиту та окалини. **Методика.** Експерименти проводили у змінному магнітному полі індукційної печі з частотою змінного току в індукторі від 50 Гц до 40 кГц. з використанням термогравіметричної методики. Процес відновлення моделювали в умовах вуглецевотермічного відновлення із визначенням кінцевого ступеню відновлення оксиду та часу відновлення у діапазоні температур 973-1373 К з використанням різних рудо-вугільних матеріалів. **Результати.** Отримані дані свідчать про прискорення процесів газифікації вуглецю та газового відновлення оксидів під впливом ЕМП на 10-20 %. Встановлено що вплив магнітного поля тим вищий чим вище частота змінного струму в індукторі печі а також що вплив магнітного поля вищий у низькотемпературних діапазонах відновлення. **Наукова новизна.** Експериментально підтверджено вплив ЕМП на кінетику відновлення оксидів заліза. Запропоновано механізм впливу поля що інтенсифікує процес відновлення заліза. **Практична значущість.** Інтенсифікація процесів вуглецевотермічного відновлення оксидів заліза забезпечує зниження енерговитрат та підвищення продуктивності процесу.

**Ключові слова:** вуглецевотермічне відновлення, інтенсифікація, оксиди заліза, змінне електромагнітне поле, ступінь відновлення.

**Objective.** To obtain quantitative characteristics of the effect of the electromagnetic field on the process of reduction of iron oxides by carbon in the solid phase and to study the mechanism of this process, experimental studies of carbon-thermal and complex reduction of iron from hematite, magnetite, and rolling scale were carried out. **Methods.** The experiments were carried out in an alternating magnetic field of an induction furnace with an alternating current frequency in the inductor from 50 Hz to 40 kHz using the thermogravimetric technique. The reduction process was modelled under conditions of carbothermal reduction with the determination of the final degree of oxide reduction and the reduction time in the temperature range of 973-1373 K using various ore-coal materials. **Results.** The obtained data indicate an acceleration of carbon gasification and gas oxide reduction processes under the influence of EMF by 10-20 %. It was found that the influence of the magnetic field is higher the higher the frequency of the alternating current in the furnace inductor and that the influence of the magnetic field is higher in the low-temperature reduction ranges. **Scientific novelty.** The effect of EMF on the kinetics of iron oxides reduction has been experimentally confirmed. The mechanism of the field effect intensifying the iron reduction process is proposed. **Practical significance.** The intensification of the processes of carbon-thermal reduction of iron oxides provides a reduction in energy consumption and an increase in process productivity.

**Keywords:** carbon-thermal reduction, intensification, iron oxides, alternating electromagnetic field, reduction degree.

**Вступ**

Можливість інтенсифікації вуглецевотермічного відновлення залізородних матеріалів за рахунок прискорення будь-якої з ланок процесу дає підстави очікувати сприятливих результатів у разі зовнішніх енергетичних впливів на систему, що реагує. Такого роду впливи позначаються на газифікації вуглецю і на процесі відновлення оксидів газами [1].

**Аналіз літературних даних**

Про принципову можливість активування твердого вуглецю фізичними методами та прискорення його газифікації свідчать літературні матеріали [2]. Зазначають, що бомбардування графіту нейтронами збільшує дефектність його кристалічної решітки, призводить до зміщення атомів вуглецю з рівноважних положень у міжвузля; спостерігається

зростання міжплощинних відстаней. Відбувається ослаблення зв'язків C-C, збудження атомів вуглецю. У результаті підвищується реакційна здатність графіту у взаємодії з газами (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), знижується енергія активізації процесу. Ефективним виявляється не тільки опромінення зразків під час реагування з газами, а й попереднє бомбардування їх, оскільки значна частина радіаційних дефектів зберігається при нагріванні до високих температур.

Інтенсифікуючий вплив на реакцію графіту з газами здійснюють γ-промені [3-5]. Ефект, спостережуваний під час опромінення в ході реакції, зазвичай пов'язують з іонізацією газових молекул. Прискорення процесу в разі попередньої обробки C<sub>тв.</sub>, певного пояснення не має, оскільки необоротних змін графіту в потоці γ-променів виявлено не було.

© Гришин О.М. – д.т.н., доц УДУНТ  
Величко О.Г. – д.т.н., проф. УДУНТ, академік НАН України

Грек О.С. – аспірант УДУНТ  
Надточій А.А. – к.т.н., доц. УДУНТ

© Grishin O. – d.t.s., docent USUST  
Velychko O. – d.t.s., professor, USUST Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine  
Grek O. – PhD student at USUST  
Nadtochiy A. – c.t.s., docent USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Автори [6-8] спостерігали, зокрема, інтенсифікацію реакції горіння та газифікації вуглецю під впливом ультразвукових коливань. Цей ефект був, переважно, пов'язаний із прискоренням розпаду поверхневих вуглець-кисневих комплексів через збільшення кінетичної енергії і молекул  $\text{CO}_2$ . У дослідженнях [9] відзначалося істотне зростання швидкості горіння вуглецю в результаті акустичних впливів звукових частот. Одночасно підвищувалася концентрація  $\text{CO}_2$ , у газах, що відходять.

Літературні дані свідчать також про вплив на твердий вуглець електричних і магнітних полів. Зазначені поля можуть чинити, наприклад, орієнтувальну дію на лусочки графіту [10].

Застосування фізичних методів з метою прискорення не тільки окремих ланок вуглецевотермічного відновлення, а й процесу загалом, дає можливість значної інтенсифікації відновлення залізородних матеріалів твердим вуглецем. Інтенсифікація обох ланок вуглецевотермічного відновлення може бути реалізована за допомогою електромагнітного впливу. Застосування сучасних методів фізико-хімічного аналізу дає змогу детально дослідити процес твердофазного відновлення в усіх його аспектах.

Таким чином, інтенсифікація обох ланок вуглецевотермічного відновлення може бути реалізована за допомогою електромагнітного впливу. Застосування сучасних методів фізико-хімічного аналізу дає змогу детально дослідити процес твердофазного відновлення в усіх його аспектах.

Автори [11-12] досліджували відновлення магнетиту воднем нижче температури Кюрі в присутності зовнішнього магнітного поля методом термогравіметричного аналізу. Швидкість відновлення порошку магнетиту збільшувалася зі збільшенням напруженості зовнішнього магнітного поля нижче температури Кюрі магнетиту.

ЕМП впливає і на стан поверхні відновленого заліза, що також має практичне значення [13].

Автори [14] встановили, що магнітне поле впливає на уявну енергію активації відновлення об'ємного оксиду і не впливає на енергію активації процесу відновлення. Висловлено припущення, що зміни кінетичних параметрів зумовлені впливом зовнішнього магнітного поля на дефекти структури твердого тіла.

Методом магнітометрії досліджено кінетику відновлення воднем  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [15]. Спостерігалось збільшення швидкості реакції відновлення магнетиту з утворенням наночастинок металевого заліза за  $T=693\text{ K}$ .

У роботі [16] досліджено вплив напруженості магнітного поля на ефективність відновлення, фазові зміни залізодіючих мінералів і кінетичну поведінку відновлення. Зв'язок між ефективністю відновлення, напруженістю магнітного поля і часом відновлення було виявлено методом поверхні відгику.

Авторами [17] був проведений експеримент з ізотермічного відновлення за  $1223\text{ K}$  для вивчення характеристик низькотемпературного самовідновлення вуглецевмісних окатишів бідних залізних руд в статичному магнітному полі. Також було досліджено механізм дії магнітного поля з точки зору процесу відновлення, ефективності реакції, фазового складу, змін мікроструктури та динамічної поведінки залізних руд. Результати показали, що магнітне поле може збільшити швидкість низькотемпературного відновлення вуглецевмісних окатишів з бідних залізних руд.

Встановлено [18], що магнітне поле збільшило швидкість відновлення гематиту,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , у водні за температури близько  $573\text{ K}$ . Автор спробував пояснити цей ефект великим тиском «парамагнітного» ортоводню поблизу намагнічених частинок заліза.

Матеріали та методи дослідження.

Вплив змінних магнітних полів промислової частоти ( $H=24\text{ kA/m}$ ) на швидкість відновлення хімічно чистих оксидів заліза і магнетитового концентрату графітом, антрацитом і деревним вугіллям було вивчено в температурному діапазоні  $1273-1273\text{ K}$ . Компоненти рудо-вугільної суміші брали в кількостях, що забезпечують атомне співвідношення  $C/O=1$ . Газом-носієм слугував аргон.

#### Результати дослідження.

Дослідження показали можливість деякого прискорення процесу випробування методом. Так, час повного відновлення  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  графітом за  $1273\text{ K}$  скорочувався на  $\sim 10\%$  (Рис. 1а). Змінне поле не змінювало характер кінетичних кривих і не вносило помітних корективів до складу газів, що відходять. Схожу картину було зафіксовано в царині вищих температур і в разі відновлення  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Дієвість поля дещо зростала в разі заміни хімічно чистих оксидів заліза магнетитовим концентратом:  $\tau_{\omega=100}$  зменшувалося на  $15\%$  (Рис. 1б).

Дослідження показало, що швидкість відновлення антрацитом в умовах магнітних впливів залишається низькою, хоча відносні зрушення перевищують  $10\%$ . У дослідях з деревним вугіллям ефект інтенсифікації виявився мінімальним. Характер спостережуваних закономірностей істотно не змінювався внаслідок переходу від сипучих до брикетованих шихт. Змінне поле прискорювало перебіг процесу, але ступінь цього впливу залишався невеликим.

Подальші дослідження були пов'язані з комплексним відновленням залізородних матеріалів ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , магнетитового концентрату і прокатної окалини) - різними формами  $\text{C}_{\text{ТВ}}$  у потоці  $\text{CO}$ , витрата якої становила  $15\text{ cm}^3/\text{хв}$ , Співвідношення  $C/O$  в шихтовій суміші підтримувалося на рівні одиниці. Випробування проводили в температурній області  $1173-1323\text{ K}$ .

Накладення магнітного поля промислової частоти дало змогу дещо формувати відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  з участю графіту за  $1173\text{ K}$  (Рис. 2а); час

повного видаленні кисню скоротилися на 8 %, однак підйом температури до 1273 К майже повністю усунув ефект прискорення. Подібна картина мала місце в дослідах з окалиною (Рис. 2б). У разі

відновлення залізородного концентрату за температури 1173 К спостерігалась більш істотна позитивна дія поля (Рис. 2в); вона в основному зберігалась і за температури 1273 К.

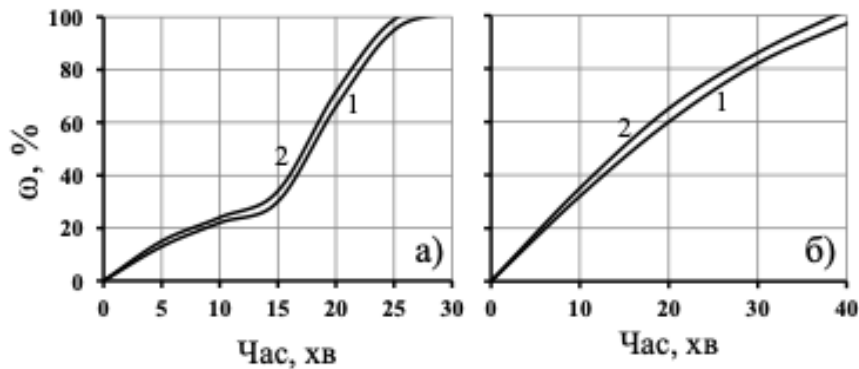


Рис. 1. Кінетика відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  за 1273 К (а); магнетитового концентрату за 1373 К (б) графітом в умовах ЕМП промислової частоти ( $H=24$  кА/м): 1-зовні поля; 2-під впливом поля

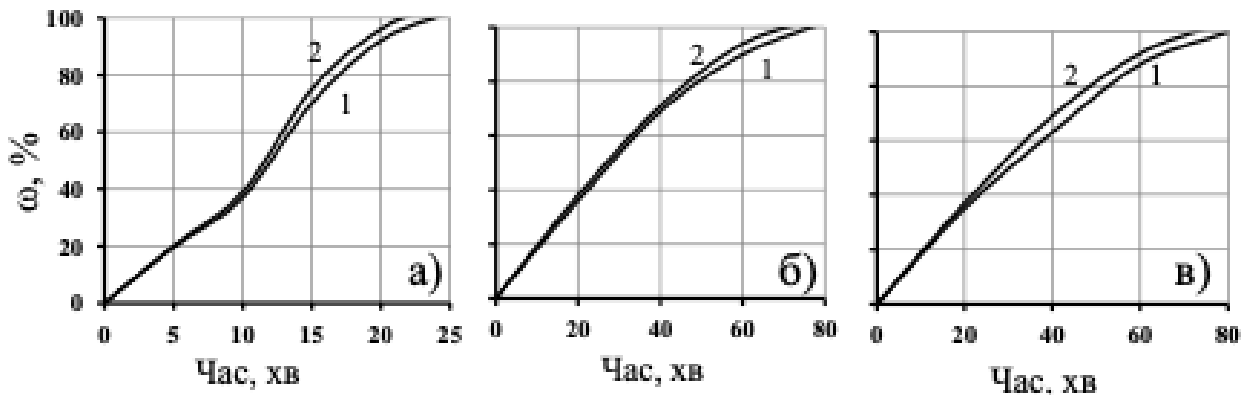


Рис. 2. Кінетика відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (а), прокатної окалини (б) і магнетитового концентрату (в) графітом у потоці СО за температури 1173 К, в умовах магнітного поля промислової частоти ( $H=24$  кА/м): 1-зовні поля; 2-у полі.

Порівняно ефективним виявилося поле промислової частоти в дослідах за участю антрациту. Зростання швидкості відзначалося під час комплексного відновлення всіх зазначених раніше залізородних матеріалів, особливо  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і окалини. Відносно прискорення було на рівні, зафіксованому в присутності графіту, або дещо вищим за нього.

Використання в шихті деревного вугілля обмежувало можливості застосування низькочастотних впливів для інтенсифікації комплексного відновлення. Помітне прискорення процесу (на рівні, зазначеному в дослідах з графітом) за 1273 К мало місце лише під час відновлення концентрату. Швидкість видалення кисню з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і окалини майже не залежала від цього виду впливів.

Загальний характер кінетичних кривих і склад газів, що відходять, істотно не змінювалися в разі накладення змінного магнітного поля. Розглянуті вище закономірності відновлення зберігалися при брикетуванні шихтової суміші.

Більш ефективними в плані інтенсифікації процесу виявилися електромагнітні впливи підвищених частот. Про це свідчать результати

відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і магнетитового концентрату деревним вугіллям, графітом і сажистим вуглицем. Досліди проводилися в діапазоні 973-1223 К і, як правило, зі стабілізацією температури, в потоці аргону за співвідношення  $C/O=1$ . Частоту і напруженість поля змінювали.

Більш інтенсивна дія електромагнітного поля проявлялася найсильніше у випадку низькотемпературного відновлення. Це ілюструється Рис. 3а, на якому представлено кінетичні криві відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  у деревному вугіллі за 973 К у різних умовах. Співставлення свідчить про те, що електромагнітний вплив ( $f=25$  кГц,  $W=50$  В,  $H\sim 5$  кА/м) збільшував середню швидкість процесу в 1,5 рази. Подібні зрушення мали місце під час відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  вуглицем розпаду СО (Рис. 3б), а також у дослідах із магнетитовим концентратом. Однак кисень останнього видалявся з дуже малою швидкістю. З підвищенням температури, ефективність електромагнітних впливів на процес падала, але все ж таки залишалася істотною навіть за 1173-1223 К. Це впливає з даних, представлених на Рис. 3в, та в Таблиці 1.

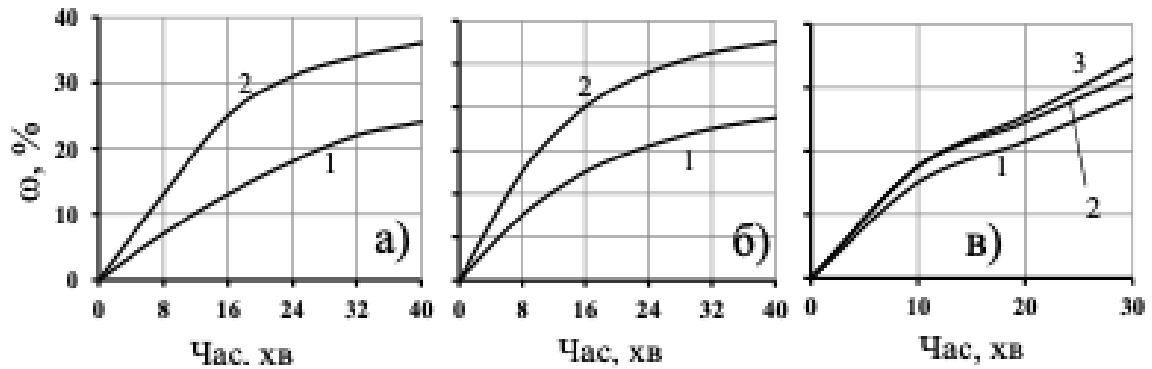
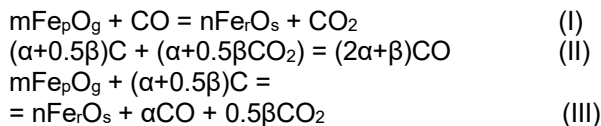


Рис. 3. Вплив високочастотного ЕМП на кінетику відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   
а) деревним вугіллям за 973 К; б) сажистим вуглецем за 973 К: 1-поза полем; 2-під дію поля ( $f=25$  кГц,  $W=50$  В); в) деревним вугіллям за 1173 К: 1-зовні поля; 2-під впливом поля ( $f=40$  кГц,  $W=50$  В); 3- ( $f=40$  кГц,  $W=90$  В).

Таблиця 1. Вплив електромагнітного поля на кінетику відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  деревним вугіллям за різних температур ( $f = 40$  кГц,  $W = 50$  В).

Умови		Поза полем			В полі		
Т, К	$\Delta\omega$ , %	( $u_v$ )ср. %О/хв.	( $u_r$ )ср. мгС/хв.	(% CO)	( $u_v$ )ср. %О/хв.	( $u_r$ )ср. мгС/хв.	(% CO)
1173	0-30	3,57	11,9	69	4,69	15	75,5
	30-60	1,8	6,1	27,5	-	-	-
	30-67	-	-	-	1,56	6,9	28,8
1273	0-30	5,66	19,2	65,4	6,28	21,1	71,2
	30-80	3,47	15,5	26,4	4,0	17,7	27,1
	80-85,5	1,50	7,5	13,2	-	-	-
	80-100	-	-	-	1,55	7,7	14,5

Дані свідчать про те, що накладення поля форсувало всі стадії відновлення гематиту. Деяке збагачення газоподібних продуктів діоксидом вуглецю вказує на більше прискорення ланки (I) порівняно з реакцією (II).



Ефективність електромагнітних впливів зростала з підвищенням потужності, що підводиться до індуктора. За  $W=90$  В середня за дослід швидкість відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  деревним вугіллям зменшувалася більш ніж на 20 % (Рис. 3в). Слід зауважити, що в діапазоні 1173-1223 К накладення поля випробуваних параметрів не викликало помітного розігріву зразка, і спеціальних заходів для стабілізації температури не було потрібно.

Дієвим важелем прискорення процесу залишалися високочастотні електромагнітні поля і в разі переходу від вуглецевотермічного до комплексного відновлення заліза. Час повної металізації  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  деревним вугіллям у потоці і  $\text{H}_2$ , і  $\text{CO}$  за 1173 К в умовах накладення поля ( $f=40$  кГц,  $W=50$  В) скорочувався майже на 20 % (Рис. 4).

Незначна зміна складу газів, що відходять (збагачення їх на 1-2 %  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ), за одночасного зростання  $u_r$  дає змогу пов'язати спостережувану

інтенсифікацію процесу з прискоренням усіх складових його реакцій.

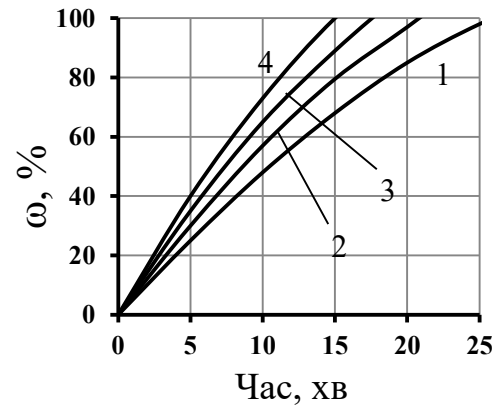


Рис. 4. Кінетика комплексного відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  за участю деревного вугілля в потоці  $\text{CO}$  (1, 2) і  $\text{H}_2$  (3, 4) за 1173 К: 1, 3-поза полем; 2, 4-під дію поля ( $f=40$  кГц,  $W=50$  В)

Позитивний вплив високочастотних полів на кінетику комплексного відновлення посилювався в разі зниження температури. Так, під час відновлення гематиту сажистим вуглецем у потоці  $\text{CO}$  (температура 1173 К)  $t_{\omega=100}$  скорочувалося в 1,3 рази (Рис. 5а). У цих умовах відзначався розігрів шихти, який компенсували зниженням температури нагрівача. За відсутності такої компенсації  $u_v$  зростала ще більше (Рис. 5б).

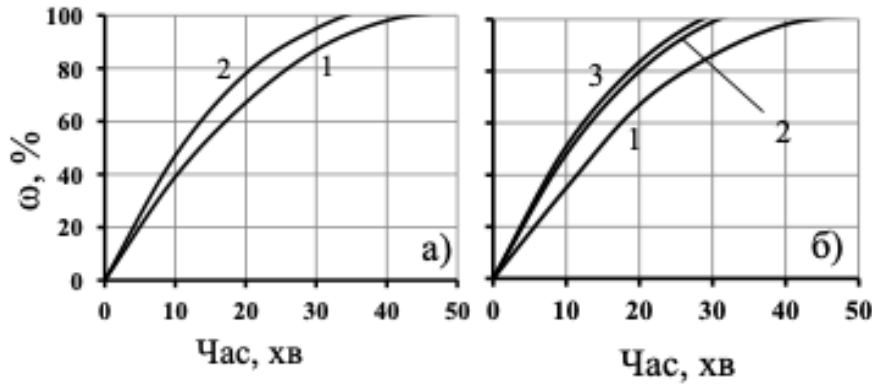


Рис. 5. Вплив ЕМП ( $f=40$  кГц) на кінетику відновлення  $Fe_2O_3$  сажистим вуглецем у потоці  $CO$  за  $1073$  К, а) зі стабілізацією температури і б) без стабілізації температури: 1-поза полем; 2-під впливом поля ( $W=50$  В); 3-під впливом поля ( $W=90$  В).

**Обговорення результатів.**

На підставі результатів досліджень було запропоновано спосіб відновлення руд твердим вуглецем (самостійно або в комплексі з газами), що передбачає інтенсифікацію процесу шляхом впливу змінного магнітного поля на реагуючу систему.

Зовнішні енергетичні впливи в процесах за участю твердого вуглецю, як і в разі суто газового відновлення, істотно впливали на окиснюваність металізованого продукту. Це було підтверджено експериментально.

Раніше зазначалося, що залізо, отримане в результаті високотемпературних процесів вуглецевотермічного і комплексного відновлення, починає енергійно реагувати з киснем повітря але нижче  $573$  К. Магнітне поле промислової частоти піднімало  $T_{ок}$  на  $10-20$  К, одночасно знижувалися швидкість і граничний ступінь окиснення.

Високочастотний електромагнітний вплив також сприятливо позначався на температурі початку реагування металізованого продукту з киснем повітря - вона помітно збільшувалася. Але водночас спостерігалось деяке зростання  $u_{ок}$ .

Загалом можна зазначити, що зовнішні енергетичні впливи, даючи змогу певною мірою форсувати вуглецевотермічне та комплексне відновлення заліза, сприяли пасивації отриманого металу.

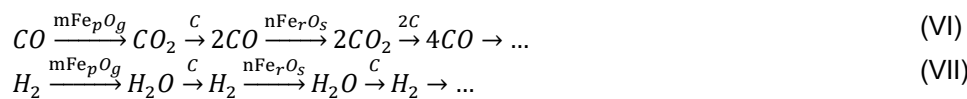
Прискорювальну дію електромагнітних полів під час вуглецевотермічного і комплексного відновлення заліза слід розглядати в тісному зв'язку з їхнім впливом на розвиток окремих ланок зазначених складних процесів. Імовірний механізм інтенсифікації ланок газового відновлення піддався докладному аналізу раніше. Тут слід зробити деякі застереження, що враховують специфіку процесів за участю твердого вуглецю. Ці застереження зумовлені насамперед порівняно високими температурами вуглецевотермічного і комплексного відновлення, що перевищують, як правило, точку Кюрі. У таких умовах ефекти, пов'язані з феромагнітними властивостями заліза та його оксидів, можуть або бути відсутніми, або проявлятися в міру реабілітації феромагнетизму вище  $T_c$  під дією зовнішнього поля, тобто у меншій мірі. Більш істотна роль належить, очевидно, впливу електромагнітного поля на іони кристалічних решіток і молекули хемосорбованих газів, збудженню їх. Можлива реалізація ефектів, пов'язаних із виникненням контактної різниці потенціалів на межах відновлюваних оксидних фаз і з рухом через ці межі електричних зарядів під впливом зовнішнього поля. Сутність таких ефектів було розглянуто раніше.

З огляду на особливості механізму вуглецевотермічного і комплексного відновлення залізородних матеріалів прискорення реакцій (I), і (IV) сприяє, у свою чергу, форсованому перебігу реакцій (II), (V).



У тому самому напрямі мають позначатися: інтенсифікація газообміну в об'ємі шихти, зумовлена магнітострикційними коливаннями, що сприяє розвитку циклів (VI) та (VII)(VII); полегшення фазових

перетворень у системі Fe-O, що приводить до ранньої появи металевого заліза-катализатора процесу газифікації  $C_{тв}$ .



Не менш важливу роль може відігравати, звичайно, безпосередній вплив змінного поля на кінетику цього процесу.

Зокрема, за не надто високих температур зовнішні енергетичні впливи генерують магнітострикційні коливання феромагнітних кристалів і

спричиняють за їх посередництвом збурення газового середовища. Відбувається активація газових молекул, що сприяє розвитку адсорбційно-десорбційних процесів у реакціях (II) і (V), посиленню ударного руйнування вуглець-кисневих (або вуглець-водень-кисневих) комплексів на поверхні  $S_{\text{ТВ}}$ . З цим та іншими ефектами, зумовленими феромагнітними властивостями заліза та його оксидів, слід більшою мірою пов'язати вельми значне прискорення відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  за 973-1073 К, яке спостерігали в разі накладення поля (Рис. 3б і Рис. 5а).

У всьому діапазоні випробуваних температур важлива роль у прискоренні ланки газифікації вуглецю належить, мабуть, дії електромагнітного випромінювання на вуглецеву складову шихти як систему заряджених частинок. На користь такого висновку свідчать такі міркування.

Частотний спектр коливань атомів вуглецю в решітці графіту характеризується особливостями, зумовленими його різко анізотропною шаруватою структурою. Міжвуглецеві зв'язки в базисних площинах багато перевершують сили зв'язку між цими площинами. Тому графіт відносять до числа гетеродинамічних структур [10]. Його частотний спектр можна розділити на дві частини: вищі частоти коливань, аж до максимальної, мають двовимірні континууми (шари); знижені частоти характерні для системи пов'язаних між собою двовимірних континуумів. Викладене дає змогу очікувати істотного поглинання енергії електромагнітних впливів, що застосовувалися в роботі, деякою частиною атомів вуглецю або їхньої групи.

Можливості поглинання енергії випромінювання порівняно невисоких частот ще більше розширюються за рахунок атомів вуглецю, які перебувають у приповерхневому шарі кристалів і поблизу структурних дефектів ґратки. Як уже зазначалося, вони, а також хемосорбовані молекули газів, мають знижену частоту теплових коливань [19].

Тому виникають сприятливі умови для вибіркового поглинання енергії, що підводиться ззовні. Відбувається збудження атомів вуглецю і молекул адсорбенту. Наслідком має бути полегшення хемосорбції  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  на поверхні  $S_{\text{ТВ}}$  і виділення продуктів реакції в газову фазу, тобто прискорення реакцій (II), (V).

Істотний внесок розглянутих ефектів у спостережану картину процесу підтверджується експериментальними даними, наведеними вище. Вони свідчать про те, що інтенсифікуючий вплив поля промислової частоти з'являвся сильніше в дослідях з низько реакційноздатними формами  $S_{\text{ТВ}}$  - графіт і антрацит, газифікація яких здебільшого регламентує швидкість відновлення. Дієвість поля знижувалася в разі використання в шихті більш активного деревного вугілля.

Помітні переваги в плані інтенсифікації процесу мали електромагнітні хвилі підвищеної частоти. Вони забезпечували значне зростання швидкості видалення кисню навіть у дослідях із деревним

вугіллям (Рис. 3, 4). Головна причина цього полягає, мабуть, у безпосередньому впливі поля на атоми вуглецю в решітці  $S_{\text{ТВ}}$ , що призводить до їхнього збудження. Останнє природно посилювалося зі збільшенням  $W$  (Рис. 3в).

Вплив електромагнітних полів на характеристики окиснюваності відновлених зразків має бути пов'язаний з особливостями формування металевого продукту в умовах зовнішніх енергетичних впливів. Про це свідчать, зокрема, однакові тенденції у зміні  $T_{\text{ок}}$ ,  $U_{\text{ок}}$  і  $\omega_{\text{ок}}$  за зазначених впливів на систему що реагує під час відновлення газами і в процесі за участю твердого вуглецю.

Механізм впливу змінних полів на формування фізичної структури металевої фази було розглянуто раніше. Очевидно, він зберігається в умовах підвищених температур вуглецевотермічного та комплексного відновлення заліза з оксидів.

Результати досліджень давали змогу загалом зробити висновок, що електромагнітні випромінювання форсують відновлення за участю вуглецю за рахунок прискорення всіх ланок процесу. Вплив на реакції газового відновлення забезпечує одночасно деякий підйом температури початку окислення металевого продукту киснем повітря.

#### Висновки.

У результаті досліджень, виконаних у температурному діапазоні 973-1373 К з використанням різних рудо-вугільних матеріалів, експериментально встановлено інтенсифікуючу дію змінних електромагнітних полів на розвиток вуглецевотермічного та комплексного відновлення заліза. Накладання полів промислової частоти (50 Гц) давало змогу скоротити тривалість повної металізації зразків на 10-15 %. Більш ефективними виявилися електромагнітні впливи підвищених частот: 25-40 кГц. При низькотемпературному відновленні заліза (973 К) вони забезпечували зростання швидкості процесу в середньому в 1,5 рази. Підйом температури зменшував ефект інтенсифікації, але він все ж залишався значним. Так, час повної металізації гематиту деревним вугіллям у потоці  $\text{H}_2$  або  $\text{CO}$  за 1173 К в умовах накладання поля частотою 40 кГц зменшувався ~ на 20 %.

Встановлено, що електромагнітні поля форсують вуглецевотермічне і комплексне відновлення заліза за рахунок прискорення всієї сукупності реакцій, що розвиваються. Деяко більшою мірою спостережуваний ефект реалізується через ланки газового відновлення. Аналіз експериментальних даних у світлі фундаментальних положень фізики твердого тіла, теорії магнетизму і каталізу дав змогу переважно зв'язати механізм прискорювального впливу змінних електромагнітних полів із впливом на іони кристалічних ґраток твердих реагентів і хемосорбованих молекул, із збудженням їх унаслідок виборного поглинання енергії, що підводиться ззовні. У царині помірних температур (973-1073 К) додатково реалізуються ефекти, пов'язані з феромагнітними властивостями кристалічних фаз.

Високочастотні електромагнітні поля доцільно використовувати для прискорення металізації залізородних матеріалів у процесах відновлення,

організованих за участю твердого вуглецю. При цьому може здійснюватися індукційний нагрів рудовугільної шихти.

#### Перелік посилань

1. Симонов В. К., Гришин А. М. Влияние низкочастотного электромагнитного воздействия на кинетику восстановления железа газами и развитие диффузионных процессов. *Электromеталлургия*. 2012. Т. 7. С. 12-26.
2. Walker P. L., Rusinko F., Austin L. G. Gas reactions of carbon. *Advan. Catal.* 1959. Т. 11. С. 133-221.
3. Molinari E. Processes of photoadsorption on semiconductors and their relevance to the electronic theory of chemisorption. *Electronic phenomena in chemisorption and catalysis on semiconductors*. Moscow, 1968. <https://doi.org/10.1515/9783111665832>
4. Irradiation damage in graphite due to fast neutrons in fission and fusion systems. IAEA, Vienna, 2000.
5. Zhabarova G. M., Vladimirova V. I., Gesalov A. A., Kadenatsi B. M. Electronic mechanisms of catalytic and chemisorption processes induced by ionizing radiation. *Electronic phenomena in chemisorption and catalysis on semiconductors*. Moscow, 1968. <https://doi.org/10.1515/9783111665832>
6. Jiang G., Zheng Y., Pan J., Tian J. The enhancement of pulverized-coal combustion by using sound waves. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. Т. 4. № 131. P. 3468-3468. <https://doi.org/10.1121/1.4709076>
7. Lall V. *Effect of acoustic oscillations on the burning of carbon*. Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University, 1991
8. Kan T., Mattat L. M., Jagoda J. L., Zinn B. T. *Combustion of solids in an acoustic field*. Atlanta: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1998
9. Yavuzkurt S., Ha M. Y., Reethof G., Koopmann G. H., Scaroni A. W. Effect of an acoustic field on the combustion of coal particles in a flat flame burner. *Journal of Energy Resources Technology-transactions of The Asme*. 1991. Т. 4. № 113. P. 286-293. <https://doi.org/10.1115/1.2905913>
10. Radovic L. R. *Chemistry&Physics of Carbon*, Boca Raton: CRC Press, 2012. <https://doi.org/10.1201/b12960>
11. Kim K. Y., Jang E. J., Kim D. Y., Jung S. M. Effect of magnetic field on reduction of magnetite. *Ironmaking&Steelmaking*. 2017. Т. 44. № 1. P. 6-16. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1152011>
12. Alimer D., Rowe M. W. Effects of a strong external magnetic field on reduction of cobalt and iron oxides: Confirmation. *J. Chem. Phys.* 1983. Т. 78. P. 2094-2095. <https://doi.org/10.1063/1.444920>
13. Melander M., Laasonen K., Jonsson H. Effect of magnetic states on the reactivity of an FCC(111) iron surface. *J. Phys. Chem. C*. 2014. Т. 118. P. 15863-15873. <https://doi.org/10.1021/jp504709d>
14. Chernavskii P. A., Kazak V. O., Pankina G. V., Perov N. S. Effect of external magnetic field on the Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> reduction kinetics. *Kinetics and Catalysis*. 2014. Т. 55. № 1. P. 117-120. <https://doi.org/10.1134/S0023158414010017>
15. Karpacheva G., Pankina G., Perov N. Effect of an external magnetic field on the hydrogen reduction of magnetite nanoparticles in a polymer matrix. *Magnetochemistry*. 2023. Т. 9. P. 123. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry9050123>
16. Jiang J., Zhang K., Guo J. Effect of magnetic field intensity on carbothermal reduction characteristics of Bayan Obo iron ore. *JOM*. 2024. Т. 76. P. 3427-3438. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06467-9>
17. Jin Y., Jiang J., Dai H. Reaction characteristics of carbon-bearing pellets of Bayan Obo lean iron ores in a static magnetic field. *J. Iron Steel Res. Int.* 2023. Т. 30. P. 1687-1700. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-00912-w>
18. Svare I. Effect of magnetic field on reduction of hematite. *Nature physical Science*. 1973. Т. 244. P. 78-79. <https://doi.org/10.1038/physci244078a0>
19. Alymov M. I., Seplyarskii B. S., Rubtsov N. M., Vadchenko S. G. Macrokinetic investigation of the interaction mechanism of the pyrophoric iron nanopowder compacts with air. *Pure Appl. Chem.* 2020. Т. 92. № 8. P. 1321-1328. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1112>

#### References

1. Simonov, V. K., & Grishin, A. M. (2012). Vliianie nizkochastotnogo elektromagnitnogo vozdeistviia na kinetiku vosstanovleniia zheleza gazami i razvitie diffuzionnykh protsessov. *Elektrometallurgii*, 7, 12-26.
2. Walker, P. L., Rusinko, F., & Austin, L. G. (1959). Gas reactions of carbon. *Advan. Catal.*, 11, 133-221
3. Molinari, E. (1968). Processes of photoadsorption on semiconductors and their relevance to the electronic theory of chemisorption. *Electronic phenomena in chemisorption and catalysis on semiconductors*. Moscow. <https://doi.org/10.1515/9783111665832>
4. *Irradiation damage in graphite due to fast neutrons in fission and fusion systems*. (2000). IAEA, Vienna
5. Zhabarova, G. M., Vladimirova, V. I., Gesalov, A. A., & Kadenatsi, B. M. (1968). Electronic mechanisms of catalytic and chemisorption processes induced by ionizing radiation. *Electronic phenomena in chemisorption and catalysis on semiconductors*. Moscow. <https://doi.org/10.1515/9783111665832>
6. Jiang, G., Zheng, Y., Pan, J., & Tian, J. T(2012). he enhancement of pulverized-coal combustion by using sound waves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 4(131), 3468-3468. <https://doi.org/10.1121/1.4709076>
7. Lall, V. (1991). *Effect of acoustic oscillations on the burning of carbon*. Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University
8. Kan, T., Mattat, L. M., Jagoda, J. L., & Zinn, B. T. (1998). *Combustion of solids in an acoustic field*. Atlanta: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc
9. Yavuzkurt, S., Ha, M. Y., Reethof, G., Koopmann, G. H., & Scaroni, A. W. (1991). Effect of an acoustic field on the combustion of coal particles in a flat flame burner. *Journal of Energy Resources Technology-transactions of The Asme*, 4(113), 286-293. <https://doi.org/10.1115/1.2905913>

10. Radovic, L. R. (2012). *Chemistry&Physics of Carbon*, Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12960>
11. Kim, K. Y., Jang, E. J., Kim, D. Y., & Jung, S. M. (2017). Effect of magnetic field on reduction of magnetite. *Ironmaking&Steelmaking*, 44(1), P. 6-16. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1152011>
12. Alimer, D., & Rowe, M. W. (1983). Effects of a strong external magnetic field on reduction of cobalt and iron oxides: Confirmation. *J. Chem. Phys.*, 78, 2094-2095. <https://doi.org/10.1063/1.444920>
13. Melander, M., Laasonen, K., & Jonsson, H. (2014). Effect of magnetic states on the reactivity of an FCC(111) iron surface. *J. Phys. Chem. C*, 118, 15863-15873. <https://doi.org/10.1021/jp504709d>
14. Chernavskii, P. A., Kazak, V. O., Pankina, G. V., & Perov, N. S. (2014). Effect of external magnetic field on the  $\text{Co}_3\text{O}_4$  reduction kinetics. *Kinetics and Catalysis*, 55(1), 117-120. <https://doi.org/10.1134/S0023158414010017>
15. Karpacheva, G., Pankina, G., & Perov, N. (2023). Effect of an external magnetic field on the hydrogen reduction of magnetite nanoparticles in a polymer matrix. *Magnetochemistry*, 9, 123. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry9050123>
16. Jiang, J., Zhang, K., & Guo, J. (2024). Effect of magnetic field intensity on carbothermal reduction characteristics of Bayan Obo iron ore. *JOM*, 76, 3427-3438. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06467-9>
17. Jin, Y., Jiang, J., & Dai, H. (2023). Reaction characteristics of carbon-bearing pellets of Bayan Obo lean iron ores in a static magnetic field. *J. Iron Steel Res. Int.*, 30, 1687-1700. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-00912-w>
18. Svare, I. (1973). Effect of magnetic field on reduction of hematite. *Nature physical Science*, 244, 78-79. <https://doi.org/10.1038/physci244078a0>
19. Alymov, M. I., Seplyarskii, B. S., Rubtsov, N. M., & Vadchenko, S. G. (2020). Macrokinetic investigation of the interaction mechanism of the pyrophoric iron nanopowder compacts with air. *Pure Appl. Chem.*, 92(8), 1321-1328. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1112>

*Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 09.05.2024*  
*Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.08.2024*