

Грек О.С., Величко К.О.

**Індукційна піч - універсальний металургійний агрегат
для твердофазного відновлення та плавлення сталі
і високо вуглецевого феромарганцю***

Grek O.S., Velychko K.O.

**Induction furnace - a universal metallurgical unit
for solid-phase reduction and melting of steel
and high-carbon ferromanganese***

Запропоновано спосіб твердофазного відновлення оксидів заліза та марганцю та плавлення сталі та феромарганцю в індукційній печі. Наведено схему процесу відновлення оксидів заліза та марганцю. У якості шихтових матеріалів запропоновано використовувати окатиші (брикети), які складаються з суміші рудо-вугільної складової та матеріалу, що містить залізо, або феромарганець-рудо-вугільні окатиші (брикети) у разі відновлення оксидів марганцю. Розглянуто механізм нагрівання такого окатишу (брикету) в індукційній печі і проведено експериментальну перевірку можливостей методу. Показана висока ефективність твердофазного відновлення та плавлення сталі та феромарганцю в умовах лабораторних та промислових індукційних печей.

Ключові слова: твердофазне відновлення, індукційна піч, оксиди заліза, оксиди марганцю.

A method of solid-phase reduction of iron and manganese oxides and melting of steel and ferromanganese in an induction furnace is proposed. The scheme of the process of reduction of iron and manganese oxides is presented. It is proposed to use pellets (briquettes) consisting of a mixture of ore-coal component and iron-containing material as charge materials, or ferromanganese-ore-coal pellets (briquettes) in the case of manganese oxides reduction. The mechanism of heating of such pellets (briquettes) in an induction furnace is considered and the capabilities of the method are experimentally verified. The high efficiency of solid-phase reduction and melting of steel and ferromanganese in laboratory and industrial induction furnaces is shown.

Keywords: solid-phase reduction, induction furnace, iron oxides, manganese oxides.

Вступ. Безумовний практичний інтерес представляє завдання отримання продукту твердофазного відновлення, його та плавлення сталі в одному металургійному агрегаті. Автори запропонували в якості такого універсального агрегату використовувати індукційну піч. Володіючи хорошими енергетичними можливостями [1], ореол використання індукційних печей чітко представлений ливарними цехами машинобудівних заводів, там, де потрібен рідкий метал для лиття, там, де реалізують переплавлення металевих брухту, зокрема, не тільки залізного, а й кольорових металів і сплавів. Відомі приклади невеликих заводів (наприклад, в Індії) [2], з відносно малими індукційними печами, які виплавляють сталь, переплавляючи металевий брухт і губчасте залізо твердофазного відновлення з отриманням надалі сортового прокату. По-різному можна оцінювати таке сталеплавильне виробництво, але зазираючи в недалеке майбутнє, з нашого погляду та уявлення, воно заслуговує на розгляд.

Аналіз літературних даних. То чому ж індукційна піч? Насамперед виходячи з концепції виплавки сталі на малих металургійних заводах [3].

Сьогодні вже працюють індукційні печі ємністю 30-35 т і зі збільшенням потужності індукційного нагріву, цілком ймовірно, будуть використовуватися і більш великотоннажні печі, до прикладу найбільша індукційна піч в світі на 65 т експлуатується з 2014 року у Китаї [4]. Що стосується тривалості плавки, то вдосконалення обладнання та технологій, нові технічні рішення зроблять скорочення тривалості плавки питанням часу і цілком очікуваним (як це сталося досить швидко під час виплавки сталі в дугових електросталеплавильних печах).

Відсутність можливості рафінування розплаву, як це реалізують у кисневому конвертері та дуговій електросталеплавильній печі, є великою проблемою індукційної печі, але способи позапічної обробки сталі, які широко застосовують сьогодні, дадуть змогу звести до мінімуму і цю проблему. А результати, наприклад одержувані на установках вакуумної індукційної плавки та інших з використанням індукційних печей підтверджують можливість виплавки якісних металів і сплавів [5-6]

Невисока стійкість футерування індукційної печі [7], на наш погляд, цілком розв'язуване інже-

*Роботу виконано під керівництвом члена-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Величко О.Г. / The work was carried out under the supervision of Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor Velychko O.G.

© Грек О. С. –УДУНТ
Величко К.О. –УДУНТ

© Grek O.S. – USUST
Velychko K.O. – USUST



нерне завдання, яке знайде рішення в міру збільшення кількості індукційних печей, зайнятих у масовому виробництві сталі та нарощуванні обсягів виплавки сталі.

Отже, чотири основні причини, які стримують використання індукційних печей у масштабному виробництві сталі:

- мала ємність печей;
- тривала плавка;
- відсутність можливостей рафінування металу безпосередньо в індукційній печі;
- низька стійкість футерування.

Ці проблеми мають місце й обмежують вико-

ристання індукційних печей для масової виплавки сталі, хоча й переборні в перспективі.

Технології отримання продуктів твердофазного відновлення та їх використання для плавлення сталі отримують розвиток і сьогодні обсяги виробництва металізованих DRI і Sponge досягають 135 млн тон на рік [8]. Процеси твердофазного відновлення виключають доменне виробництво, але вимагають переплаву металізованих продуктів у дуговій електросталеплавильній печі (Рис. 1) [9]. Зберігаються проблеми з продуктивністю установок твердофазного відновлення та енергетичними витратами на процес.



Рис. 1. Традиційна послідовність отримання продуктів твердофазного відновлення та їх використання для плавлення сталі.

Металізовані брикети (окатиші), (губчасте залізо - Sponge), у цьому технологічному ланцюжку слугують для підшихтовування в кисневому конвертері або дуговій електросталеплавильній печі [10]. У всіх випадках присутній агрегат для відновлення та отримання заліза у вигляді заліза прямого відновлення, губчастого заліза, і сталеплавильний агрегат для розплавлення останніх.

Автори розглядають інший технологічний ланцюжок, що передбачає використання індукційної печі. Відповідно до нього, під час виплавки сталі не застосовують доменну піч, виключають кокс і коксохімічне виробництво, не використовують киснево-конвертерний агрегат або дугову електросталеплавильну піч (Рис. 2).



Рис. 2. Технологічна послідовність отримання сталевих продуктів з використанням індукційної печі та продуктів твердофазного відновлення.

Принциповим у запропонованій технологічній схемі є використання індукційної печі як суміщеного металургійного агрегату - печі для твердофазного відновлення і розплавлення продуктів твердофазного відновлення з подальшим рафінуванням. Твердофазне відновлення може проводитися вуглецем, частково вуглецем і воднем або тільки воднем. В останньому випадку, що дуже важливо, реалізується концепція «зеленої» металургії. Так індукційна піч стає основним робочим металургійним агрегатом для виплавки сталі.

Узагальнюючи переваги використання індукційної печі в цьому випадку, виділимо:

- можливість використання перворудної рудної шихти (залізної, марганцевої, хромової руди і вугілля);
- реалізацію твердофазного відновлення з високими показниками за продуктивністю і ступенем відновлення;
- не використовується кокс;
- в одному агрегаті проводиться як твердофазне відновлення, так і отримання розплавленого продукту;
- реалізується концепція «зеленої» металургії;
- мале випаровування легуючих елементів і заліза;
- можливості тонкого регулювання температури під час ведення процесів;
- відсутність графітових електродів як у дугової електросталеплавильної печі;

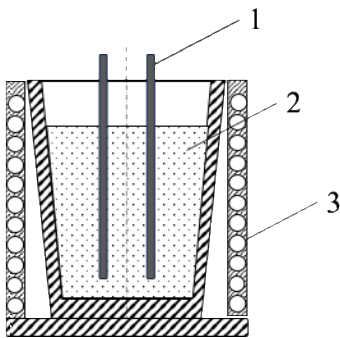


Рис. 3. Схема опосередкованого нагріву рудо-вугільної суміші в індукційній печі за допомогою графітових електродів (1 – графітовий обігрівач індукційна піч, 2 – рудо-вугільна суміш, 3 – індуктор печі).

Як показали експерименти, реалізація такого нагріву має суттєві недоліки: неможливість реалізації розплавлення відновленої шихти; досить складна конструкція системи обігріву з графітовими електродами; відносно тривалий процес із проблемами з довантаженням шихти; низька продуктивність; відносно великий ступінь недо-відновлення рудної складової.

Аналіз інших можливостей дозволив запропонувати використання в якості обігрівального елемента - залізозмісний матеріал. На першому етапі використовували подрібнений легковаговий металевий лом, який завантажували в індукційну піч разом із рудо-вугільною сумішшю. Спостерігали ефективне нагрівання рудо-вугільної суміші, відновлення та подальше розплавлення шихти. У цьому випадку плавку проводили до отримання

- перспективи, що відкриваються, ширшого застосування індукційного нагріву для високоякісної металургії та рециклінгу.

Індукційна піч може розглядатися як універсальний агрегат для міні металургійних заводів. Універсальність індукційної печі у цьому випадку ще й у тому, що технологію можна реалізувати та завершити як на етапі отримання продукту твердофазного відновлення, так і отримання рідкої сталі.

Основним принципом роботи індукційної печі є наведення магнітним полем струмів Фуко в металевій шихті, перетворення електричної енергії в теплову, нагрів та розплавлення металу [11-12]. Завдяки цій специфіці її роботи, проведення нагріву оксидної складової для твердофазного відновлення в індукційній печі раніше не розглядали.

Автори реалізували опосередкований нагрів рудо-вугільної суміші в індукційній печі за допомогою графітових електродів (Рис. 3). В індукційну піч поміщали графітові електроди, засипали рудо-вугільну шихту і проводили індукційний нагрів графітових електродів, які, в свою чергу, обігрівали, рудо-вугільну суміш що їх оточувала. Рудо-вугільна суміш досить швидко прогрівалась біля поверхні графітових електродів і з невеликою швидкістю, в зонах, віддалених від графітових електродів. Для прискорення нагрівання віддалених ділянок потрібно було розташування більшої кількості графітових електродів та зменшення відстані між обігрівальними електродами.

рідкого металу, і на етапі отримання продукту твердофазного відновлення, відокремити його від металевого лому не виявлялося можливим.

Оптимальним із розглянутих виявився варіант використання рудо-вугільної суміші з дрібнодисперсним відновленим губчастим залізом (залізозмісним матеріалом - ЗВМ). У цьому випадку, як показано на Рис. 4, розташування частинок в окатиші включає частинки металізованої губки, вугілля та залізорудного концентрату. Як показали обчислення при розмірах (радіусі) частинок ЗВМ, вугілля та рудного концентрату 0,5 мм, 0,25 мм і 0,5 мм відповідно, та вмісту ЗВМ у суміші, наприклад, 40 %, на одну частинку ЗВМ в елементі об'єму окатишу (брикету) припадає 2 частинки рудного концентрату і 9 частинок вугілля.

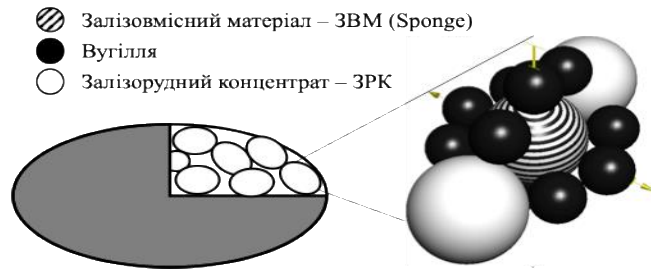


Рис. 4. Схема розташування частинок у залізо-рудно-вугільному брикеті.

Схема твердофазного відновлення у запропонованій суміші у складі окатишу (брикету) представлена на Рис. 5.

Частинки заліза у складі окатишу (брикету) є обігрівальним елементом, які при обігріві передають тепло оточуючим їх частинкам вугілля та рудного концентрату. Обігрів частинок вугілля

призводить до їх газифікації, а монооксид вуглецю, який при цьому вивільнюється, відновлює оксиди заліза у нагрітих частинках рудного концентрату. Враховуючи n - кількість частинок заліза вони організовують нагрівання окатишу (брикету) всередині його об'єму.

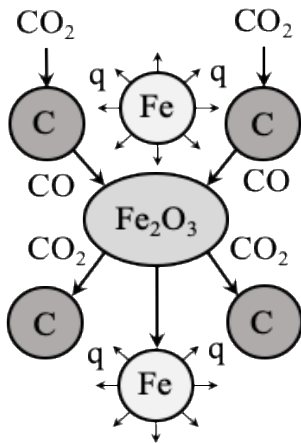
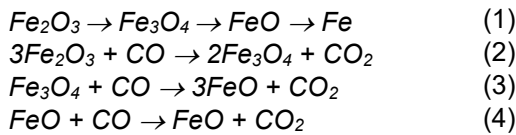


Рис. 5. Схема відновлення оксидів заліза в залізо-рудно-вугільному окатиші (брикеті).

Відновлення гематиту іде по схемі (1) при цьому послідовно проходять реакції відновлення (2-4) [13].



Паралельно досліджували можливість відновлення оксидів марганцю у брикеті: марганцевий концентрат – вугілля – високо вуглецевий феромарганець. Для послідовного відновлення $MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 \rightarrow Mn_3O_4 \rightarrow MnO$ кількість вугілля обирали достатнім для відновлення оксидів марганцю (Рис. 6). При цьому вуглецевий феромарганець слугував основним нагрівачем в умовах роботи індукційної печі.

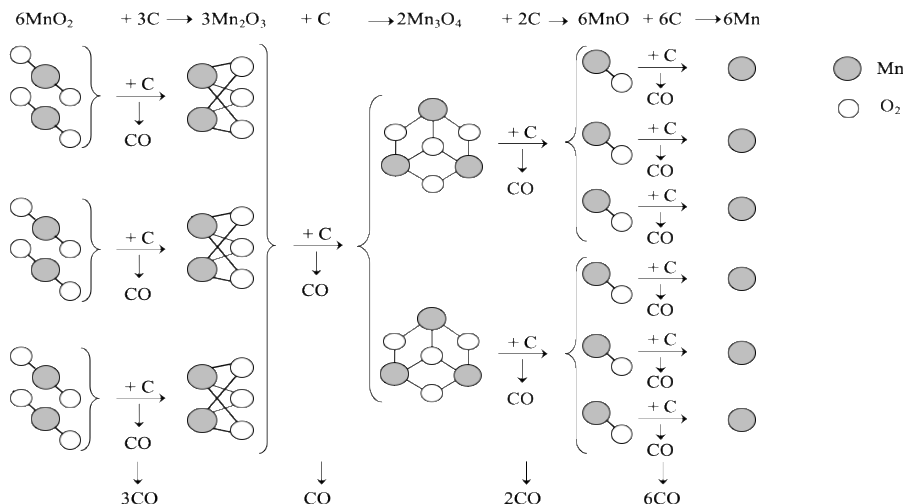


Рис. 6. Схема послідовного відновлення оксидів марганцю.

На Рис. 7 наведено схему послідовного твердофазного відновлення в рудо-вугільному окатиші та елементі феромарганець-рудо-вугільного окатиша (брикету). В обох випадках відновником є монооксид вуглецю як продукт газифікації вугілля. При твердофазному відновленні окатиша його нагрівання реалізується нагрітим монооксидом вуглецю, що обтікає поверхню окатиша. В елементі окатиша (брикету) концентрат марганцевої руди і вугілля нагріваються частинкою вуглецевого феромарганцю в окатиші (брикеті). З огляду на

те, що механізм і послідовність твердофазного відновлення в обох випадках близькі, принципним є розміри окатишів (брикетів) з нагріванням від поверхні до центру і відновлюваної частинки концентрату марганцевої руди [14], нагрівання якої відбувається від поверхні металевої частинки вглиб рудо-вугільної шихти. Розмір окатишу (брикету), наприклад, може становити 20-30 мм, тоді як розмір частинки концентрату марганцевої руди в окатиші (брикеті) до 1-2 мм, тобто на 2-3 порядки менший.

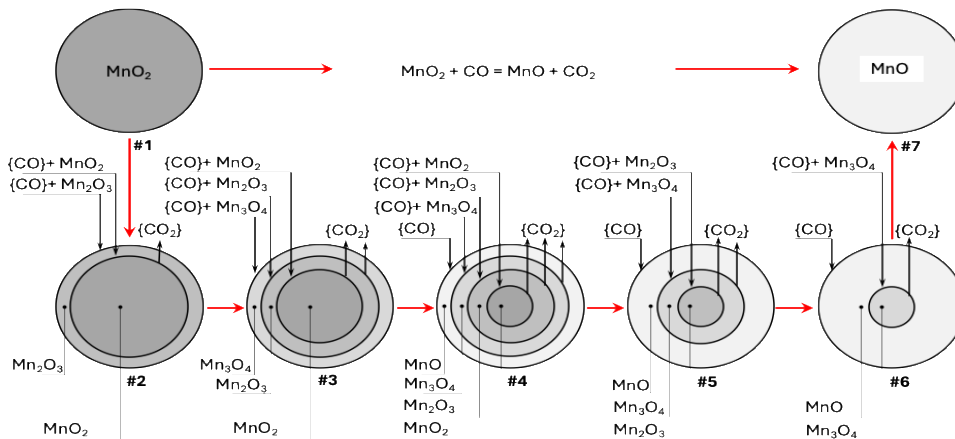


Рис. 7. Схема послідовного твердофазного відновлення в рудо-вугільному окатиші та елементі залізо-рудо-вугільного окатиша (брикету).

Позиція 1 на Рис. 7 представляє інкубаційний період, коли в системі, насамперед за рахунок нагрівання, формуються умови для протікання реакцій твердофазного відновлення. Після досягнення температури газифікації вугілля і початку процесу твердофазного відновлення на поверхні окатишів або частинки залізородного концентрату протікає реакція відновлення монооксидом вуглецю MnO_2 до Mn_2O_3 з утворенням скоринки відновленого оксиду на поверхні (позиція 2 на Рис. 7).

Подальше просування нагріву монооксиду вуглецю вглиб створює умови протікання там також відновлювальної реакції MnO_2 до Mn_2O_3 . Водночас у ділянці, близькій до поверхні, йде відновлення Mn_2O_3 до Mn_3O_4 . У позиції 3 Рис. 7 показано просування фронту підведення відновника і в протилежному напрямку відведення газоподібного продукту відновлення CO_2 . Періоди 2 і 3 характеризуються інтенсивним протіканням твердофазного відновлення.

Позиція 4 на Рис. 7 показує, як реакції твердофазного відновлення отримують подальший розвиток. Нагрівання і підведення монооксиду вуглецю від периферії до центру дає змогу умовно виділити чотири області. В ділянці, близькій до поверхні, процеси відновлення оксидів марганцю марганець-рудного концентрату завершені на етапі формування скоринки MnO .

Наступна вглиб область представлена Mn_3O_4 . У ній завершені реакції відновлення Mn_2O_3 до

Mn_3O_4 . Далі проходить область, де завершуються перетворення MnO_2 на Mn_2O_3 . У центральній області, куди не доставлено відновник, ще зберігаються оксиди MnO_2 . У позиції 4 Рис. 7 інтенсивність твердофазного відновлення зменшується, оскільки скоринка MnO , що утворилася на поверхні, перешкоджає доставці відновника в зони реакції. Для окатишів (брикетів) розміром 20-30 мм останнє може бути істотним фактором уповільнення твердофазного відновлення. В феромарганець-рудо-вугільних окатишах (брикетах), очевидно, процеси відновлення йдуть у зональному режимі, а не ступінчасто, нагрівання частинок і доставка відновника до елементів марганець-рудного концентрату окатишів (брикетів) відбуваються дуже швидко (практично миттєво), проблема з утворенням корочки MnO на поверхні елемента малоімовірна й очевидно, найімовірніше, відсутня.

Позицію 5 Рис. 7 характеризує відсутність в окатиші або в часточці марганець-рудного концентрату оксиду марганцю MnO_2 . Центр представлений тепер Mn_2O_3 , області Mn_3O_4 і MnO збільшуються. Процеси твердофазного відновлення сповільнюються і йдуть до свого завершення. У позиції 6 Рис. 7 представлені тільки дві відносно великі області: у центрі невідновлений Mn_3O_4 і далі до поверхні відновлений оксид MnO . При подальшій доставці монооксиду вуглецю до центру і протіканні відновлення Mn_3O_4 процес твердофазного відновлення завершується, і окатиш

або частинка марганець-рудного концентрату окатишу (брикету) (як і весь брикет) представлені свіжовідновленим MnO (позиція 7 на Рис. 7).

Представлена схема дає змогу виокремити три характерні періоди твердофазного відновлення: інкубаційний, зі зростаючою інтенсивністю твердофазного відновлення та зі зменшеною інтенсивністю твердофазного відновлення. Останній має виражене представлення при відновленні рудо-вугільних окатишів у потоках нагрітого відновного газу і відсутній в умовах твердофазного відновлення за розробленим способом твердофазного відновлення за умови індукційного нагріву феромарганець-рудо-вугільних

брикетів, що істотно підвищує швидкість твердофазного відновлення і ступінь відновлення.

Наведена на Рис. 7 схема є аналогічною і у випадку відновлення гематиту у формі рудо-вугільного та залізо-рудо-вугільного окатишу (брикету) з тією лише відмінністю що в цьому випадку кінцевим продуктом відновлення є металеве залізо яке одразу включається в процес нагріву від магнітного поля індукційної печі що робить такий процес автокатолітичним.

Проведено порівняння основних характеристик відновлення рудно-вугільного та залізо-рудо-вугільного окатишу (брикету) (

Таблиця 1. Порівняння основних характеристик відновлення рудо-вугільного та залізо-рудо-вугільного брикету.

	Рудо-вугільний Окатиш (брикет)	Залізо-рудо-вугільний окатиш (брикет)
Матеріали:		
Рудна складова	+	+
Вугілля	+	+
ЗВМ	-	+
Можливість нагріву в індукційній печі	-	+
Відновник	C, внутр.	C, внутр.
Теплоносій	Зовнішній	Зовнішній
Тип відновлювального процесу	Фронтально-шаровий	фронтальний
Визначальні параметри	Температура, розмір брикету	Температура
Гرادієнт температур	+	-
Градієнт концентрацій	-	-
Теплові потоки	від периферій до центру	В об'ємі
Потоки відновника	В об'ємі	В об'ємі
Швидкість відновлення	Не висока	Висока
Ступінь відновлення	Достатньо висока	Висока
Енергоспоживання	Високе	Низьке

Матеріали та методи дослідження. Проведено експериментальне підтвердження запропонованого методу відновлення у лабораторних індукційних печах потужністю 5 і 50 кВт. Використовували брикети діаметром 35 мм і товщиною до 7 мм, а також діаметром 18 мм і товщиною 8 мм. Суміш магнетитового концентрату, вугілля та металізованого заліза піддавали брикетуванню. Брикети поміщали в індукційну піч.

Контроль температури здійснювали за допомогою термодатчиків, поміщених в тигель. Швидкість нагрівання до температури початку вуглецевотермічного відновлення, приблизно 1000 °C, становила 20-25 °C/хв.

У початковий період нагріву потужність печі становила 30–40 %, що дозволяло нагріти шихту до температури початку відновлення. В міру розвитку процесу відновлення і появи металевого заліза (продукту відновлення), температура та інтенсивність процесу відновлення зростала, що супроводжувалося інтенсивним виділенням газів. Далі, для забезпечення більш повного твердофазного відновлення навантаження печі трошки

знижувалась. В міру завершення відновлення інтенсивність виділення газів зменшувалась.

Весь процес відновлення протікав в ізотермічному режимі, при постійній температурі 1100–1200 °C. Повна металізація концентрату завершувалась приблизно за 1 годину. Продукт відновлення охолоджували та піддавали аналізу. Окремі експерименти завершували розплавленням отриманого металізованого продукту і вливанням в літник.

Хімічний аналіз відновленої металеві губки (зливка) показав вміст Fe > 98 %. Висока ефективність запропонованого методу твердофазного відновлення та виплавки сталі була підтверджена на плавках в промисловій 7 т індукційній печі.

В експериментах з феромарганець-рудо-вугільними брикетами твердофазне відновлення супроводжувалося горінням факелу над поверхнею шихти та завершувалося на стадії відновлення оксидів до MnO. Підвищення температури призводило до розплавлення та відновлення MnO відбувалось у рідкій фазі з отриманням високого вуглецевого феромарганцю.

Результати дослідження. Розраховано кількість частинок залізородного концентрату та вугілля, які припадають на одну частинку нагрівального залізородного матеріалу в елементі об'єму брикету, при частці залізородного матеріалу в брикеті 10, 20, 30, 40 і 50 %.

У Табл. 2 показано, що при частці залізородного матеріалу 10 %, одна частинка останнього (розміром 0,5 мм) повинна нагріти 11 частинок залі-

зородного концентрату (розміром 0,5 мм) і 87 частинок вугілля (розміром 0,25 мм). Зі збільшенням кількості залізородного матеріалу в брикеті кількість частинок залізородного концентрату та вугілля що нагріваються зменшується. Так, при 30 % частці залізородного матеріалу в брикеті, кількість частинок залізородного концентрату та вугілля що нагріваються складе 3 і 23 відповідно, а при 50 % частці - 1 і 10.

Таблиця 2. Кількість частинок в елементі об'єму брикету

Доля ЗВМ в брикеті, %	10	20	30	40	50
Матеріал					
	число частинок в елементі об'єму брикету				
ЗВМ	1	1	1	1	1
Вугілля	87	39	23	15	10
ЗРК	11	5	3	2	1

На Рис. 8 наведено результати розрахунку динаміки нагрівання залізородного концентрату в окатиші (брикеті) в залежності від частки залізородного матеріалу, фактично від кількості частинок залізородного концентрату, які припадають на 1 частинку залізородного матеріалу що гріє. У

розрахунках теплообміну, масу і властивості матеріалів приймали постійними протягом всього процесу нагрівання. Розрахунок нагрівання проводили для швидкості нагрівання частинки залізородного матеріалу 1 К/с.

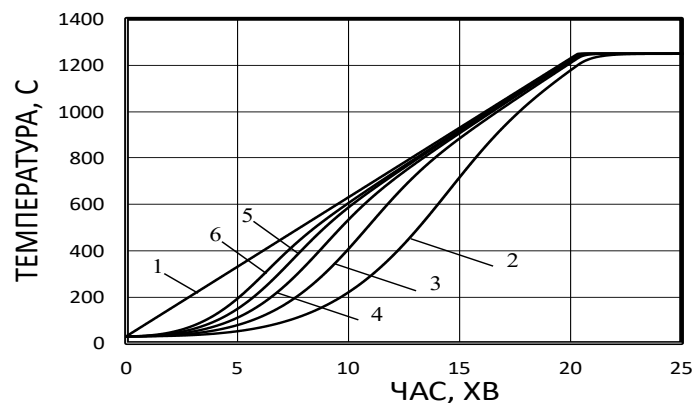


Рис. 8. Динаміка нагрівання залізородного концентрату в залежності від вмісту ЗВМ (1 – температура ЗВМ; 2–6 – температура залізородного концентрату при вмісті ЗВМ – 10, 20, 30 ... 50 % відповідно).

Коли одна частинка залізородного матеріалу що гріє припадає на одну частинку залізородного концентрату (вміст залізородного матеріалу в шихті окатишу (брикету) становить 50 %), нагрівання останньої відбувається швидко, і градієнт температур між нагрівальними та тими що нагріваються частинками низький (на 10-ій хвилині нагрівання градієнт становить 20 °С). При зменшенні вмісту залізородного матеріалу в шихті окатишу (брикету) кількість частинок залізородного концентрату, яка припадає на одну частинку залізородного матеріалу, збільшується, що уповільнює нагрівання частинок концентрату і збільшує градієнти температур між нагрівальними частинками та частинками що нагріваються (на 10-ій хвилині нагрівання градієнти температур становлять, відповідно, 40, 100, 220, 430 °С при вмісті залізородного матеріалу 40, 30, 20 та 10 %).

Зі збільшенням вмісту залізородного матеріалу в брикеті теплові можливості ефективного нагріву частинок залізородного концентрату та вугілля, які нагріваються частинками залізородного матеріалу, зростають. Теплові потоки від частинки залізородного матеріалу швидше та ефективніше нагрівають меншу кількість часточок залізородного концентрату та вугілля.

Таким чином, існує мінімально допустимий вміст залізородного матеріалу в брикеті, при якому (і вище) забезпечується ефективне нагрівання брикету. Як показали розрахунки та проведені експерименти, при вмісті в брикеті 30 % та більше залізородного матеріалу, нагрівання відбувалося досить швидко, а при вмісті менше ніж 30 % реалізація нагріву була практично важко здійсненою.

Окрім принципової можливості нагріву та відновлення залізо-рудно-вугільного брикету в індукційній печі, змінюється характер теплообміну в брикеті. Джерело тепла знаходиться безпосередньо в зоні реакції газифікації та відновлення, у той час, як в рудо-вугільному брикеті, при зовнішній подачі тепла, внутрішні шари брикету отримують тепло із запізненням внаслідок спротиву теплопровідності. В залізо-рудно-вугільному брикеті відсутні градієнти температур і концентрацій, а визначальним параметром є температура процесу, яка своєю чергою задається потужністю індукційного нагріву. В результаті забезпечуються високі швидкості і ступінь відновлення.

Універсальність запропонованої технології в індукційній печі полягає у проведенні плавки в єдиному металургійному агрегаті з мінімальними енергетичними та матеріальними витратами. Подальші дослідження показали більш широкі можливості отримання марганцевих сплавів з використанням марганцевого концентрату та високо вуглецевого феромарганцю.

Висновки

Запропоновано твердофазне відновлення та виплавку сталі проводити в одному металургій-

ному агрегаті. В якості універсального агрегату використовувалася індукційна піч. Апробували нагрів рудо-вугільної суміші в індукційній печі за допомогою графітових електродів, металевого лому. Оптимальним виявився варіант використання окатишів (брикетів), що включають металізовану губку, вугілля та залізорудний концентрат.

У залізо-рудно-вугільному брикеті реалізується фронтальний механізм відновлення: теплоносій і відновлювач знаходяться всередині брикету, відсутні градієнти температур і концентрацій, а визначальним параметром є температура процесу. Проведені експерименти підтвердили високу ефективність запропонованого способу твердофазного відновлення та виплавки сталі. Універсальність способу та використання індукційної печі, як показали експерименти, у тому, що реалізувати та завершувати технологічний процес можна як на етапі отримання продукту твердофазного відновлення, так і отримання рідкої сталі.

Доведена принципова можливість відновлення оксидів марганцю в індукційній печі з подальшим плавленням і отриманням високо вуглецевого феромарганцю.

Перелік посилань

1. V. R. Gandhewar, S. V. Bansod та A. B. Borade, «Induction Furnace - A Review,» *International Journal of Engineering and Technology*, т. 3, № 4, pp. 277-284, 2011
2. S. Ghosh, S. Gupta та A. Dutta, «Steelmaking through induction furnace route in India,» *Steel Tech*, т. 7, № 4, pp. 35-38, 2013.
3. M. Chaabet та E. Dotsch, «abpinduction.com,» January 2012. [Онлайнвий]. Available: https://abpinduction.com/wp-content/uploads/2020/02/ABP-Steelmaking_based_on_inductive_melting_M._Chaabet_E._Doetsch.pdf.
4. «castingssa.com» BA Crawford Specialised Publications (Pty) Ltd, 01 12 2014. [Онлайнвий]. Available: <https://castingssa.com/the-worlds-largest-coreless-induction-furnace-abp-induction/>.
5. S. Viswanathan, D. Apelian, R. J. Donahue, B. DasGupta, M. Gywn, J. L. Jorstad, R. W. Monroe, M. Sahoo, T. E. Prucha та D. Twarog, «Vacuum Induction Melting,» в *CASTING, Vol 15, ASM Handbook*, ASM International, 2008, pp. 116-123.
6. DSTI/SC, «Latest developments in steelmaking capacity,» OECD, 2020.
7. Г. О. Козлов та В. Л. Тополов, Конструкція електromеталургійних агрегатів. Підручник для здобувачів освіти ЗФПО та ЗВО (електронне видання), Нікополь: ВСП НФК УДУНТ, 2023, p. 246.
8. W. S. Association, «worldsteel.org,» World Steel Association, May 2024. [Онлайнвий]. Available: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>.
9. Y. Lakhtin, *Engineering Physical Metallurgy*, University Press of the Pacific, 2000, p. 448.
10. www.midrex.com, «DRI Products & Applications,» April 2018. [Онлайнвий]. Available: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexDRI_ProductsBrochure_4-12-18-1.pdf.
11. S. L. Semiatin, *Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications*, S. Zinn, Ed., ASM International, 1988, p. 335.
12. А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов та А. В. Бамунэр, Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов, А. Е. Слухоцкий, Ред., Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981, p. 328.
13. E. Donskoi, D. S. McElwain та L. J. Wibberley, «Estimation and Modeling of Parameters for Direct Reduction in Iron Ore/Coal Composites: Part II. Kinetic Parameters,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, т. 34B, pp. 255-266, 2003.
14. Б. І. Бондаренко, В. А. Шаповалов та Н. І. Гармаш, Теорія та технологія безкоксової металургії, Київ: Наукова Думка, 2003.

References

1. Gandhewar, V. R., Bansod, S. V. & Borade, A. B. (2011). Induction Furnace - A Review. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(4), 277-284
2. Ghosh, S., Gupta, S. & Dutta, A. (2013). Steelmaking through induction furnace route in India. *Steel Tech*, 7(4), 35-38.
3. Chaabet, M. & Dotsch, E. (2012). Steelmaking based on inductive melting. *Induction Technology*. <https://surl.li/sfqjtf>

4. *The world's largest coreless induction furnace – ABP Induction.* (2014). BA Crawford Specialised Publications (Pty) Ltd, 01 12 2014. <https://castingssa.com/the-worlds-largest-coreless-induction-furnace-abp-induction/>
5. Viswanathan, S., Apelian, D., Donahue, R. J., DasGupta, B., Gywn, M., Jorstad, J. L., Monroe, R. W., Sahoo, M., Prucha, T. E. & Twarog, D. (2008). Vacuum Induction Melting. *Casting, 15, ASM Handbook*, ASM International, 116-123
6. *DSTI/SC. Latest developments in steelmaking capacity.* (2020). OECD
7. Kozlov, G. O. & Topolov, V. L. (2023). Design of Electrometallurgical Units. VSP NFK USUNT
8. Association, W. S. (2024). World Steel in Figures. *World Steel Association*. <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
9. Lakhtin, Y. (2000). *Engineering Physical Metallurgy*. University Press of the Pacific
10. DRI Products & Applications. (2018). https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexDRI_ProductsBrochure_4-12-18-1.pdf
11. Semiatin, S. L. (1988). *Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications*. ASM International
12. Slukhotsky, A. E., Nemkov, V. S., Pavlov, N. A. & Bamuner, A. V. (1981). *Induction Heating Installations*. Energoizdat. Leningrad Branch
13. Donskoi, E., McElwain, D. S. & Wibberley, L. J. (2003). Estimation and Modeling of Parameters for Direct Reduction in Iron Ore/Coal Composites: Part II. Kinetic Parameters. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 34B, 255-266
14. Bondarenko, B. I., Shapovalov, V. A., & Garmash, N. I. (2003). *Theory and Technology of Coke-Free Metallurgy*. Naukova Dumka

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 09.09.2023
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.11.2023