



УКРАЇНА

(19) UA (11) 79850 (13) C2

(51) МПК (2006)

C21B 13/00

C21B 13/06 (2007.01)

C21B 13/14

F27B 15/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВІДНОВЛЕННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНОЇ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ І ВІДНОВНИЙ РЕАКТОР БОДРОВА В.В. - КОСТЮЧЕНКА В.І.

1

(21) а200507480

(22) 27.07.2005

(24) 25.07.2007

(46) 25.07.2007, Бюл. № 11, 2007 р.

(72) Бодров Володимир Вікторович, Костюченко Віталій Іванович

(73) Бодров Володимир Вікторович, Костюченко Віталій Іванович

(56) SU, 304763, A1, 25.05.1971

SU, 426374, A3, 15.10.1974

RU, 2197530, C1, 27.01.2003

RU, 2205229, C2, 27.05.2003

JP, 62238301, A, 19.10.1987

US, 3985547, A, 12.10.1976

GB, 1170690, A, 12.11.1969

GB, 634938, A, 15.07.1947

Тулин Н. А., Кудрявцев В. С., Пчелкин С. А. и др. Развитие бескоксовой металлургии. - М.: Металлургия, 1987. - С. 62 - 65

(57) 1. Спосіб відновлення дрібнодисперсної залізної руди, що включає завантаження руди в камеру попереднього нагрівання, її нагрів в псевдозрізженому шарі в цій камері, відновлення в псевдозрізженому шарі в реакторі першого ступеня, магнітну сепарацію і відновлення магнітної складової в псевдозрізженому шарі в реакторі другого ступеня до міри металізації не менше 92%, який **відрізняється** тим, що в камері попереднього нагрівання залізню руду нагрівають до температури 400–450°C і відновлюють у реакторі першого ступеня до перетворення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  у  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  при температурі 400–540°C, магнітну сепарацію проводять у температурному інтервалі 500–540°C, а магнітну складову відновлюють у реакторі другого ступеня при температурі 500–570°C.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що перед завантаженням руди в камеру попереднього нагрівання її здрібнюють до розміру частинок менше 50мкм високошвидкісним ударним впливом, що забезпечує механоактивацію структури матеріалу.

3. Спосіб за п. 1 або 2, який **відрізняється** тим, що немагнітну складову магнітної сепарації охоло-

2

джують до температури менше 100°C і піддають вторинній магнітній сепарації, причому магнітну складову вторинної магнітної сепарації відновлюють окремо від магнітної складової первинної сепарації.

4. Відновний реактор, що включає корпус, до бічної стінки якого закріплені багатоярусні секції з отворами для пересипання матеріалу, а також пристрою для підведення і відводу газу, верхній торець корпуса з пристроєм для завантаження матеріалу на верхню секцію, а також нижній торець корпуса з пристроєм для виведення з реактора обробленого матеріалу, який **відрізняється** тим, що корпус має вигляд прямокутного паралелепіпеда, секції виконані у виді аерожолобів, які включають жалюзійні пластини, ширина цих аерожолобів дорівнює внутрішній ширині корпуса, при цьому один кінець кожного аерожолоба примикає до вузької бічної стінки корпуса, а інший кінець розташований з проміжком від протилежної вузької бічної стінки і межує з верхнім торцем каналу для пересипання матеріалу, під нижніми кінцями каналів для пересипання матеріалу встановлені, з можливістю повороту навколо горизонтальної осі, підтиснуті до крайок каналів клапани, корпус розділений горизонтальними перегородками на модулі, з яких складаються реактори першого і другого ступенів, а також камера попереднього нагрівання, усередині модулів розташовані від одного до чотирьох аерожолобів, простір під нижнім аерожолобом кожного модуля реакторів з'єднано з колектором підведення відновного газу, простір над кожним верхнім аерожолобом з'єднано з колектором відводу відпрацьованого газу, у модулях камери попереднього нагрівання простір під нижніми і простір над верхніми аерожолобами з'єднаний відповідно з колекторами підведення свіжого і відводу відпрацьованого теплоносія, верхні модулі камери попереднього нагрівання і реактора другого ступеня обладнані приймальними бункерами, канали для пересипання матеріалу під нижніми аерожолобами нижніх модулів реакторів виведені за межі корпуса, інші модулі каналами для пере-

(13) C2

(11) 79850

(19) UA

сипання матеріалу сполучені один з одним, вивідний канал для пересипання матеріалу реактора першого ступеня сполучений з приймальним пристроєм установки магнітної сепарації, при цьому установка магнітної сепарації включає пристрій видачі магнітної складової, який сполучений через транспортуючий пристрій із приймальним бункером для завантаження матеріалу на верхній аеро-

жолоб верхнього модуля реактора другого ступеня.

5. Відновний реактор за п. 4, який **відрізняється** тим, що аерожолоби встановлено під кутом до обрію з підйомом у бік підйому жалюзійних пластин аерожолобів, а жалюзійні пластини встановлені з можливістю зміни кута їхнього нахилу до площини аерожолобів.

Винахід відноситься до металургії заліза і може бути використаний в порошковій металургії.

За останні сто років розроблялися десятки технологічних процесів виробництва рідких чавуна і сталі на основі прямого відновлення заліза. У кожному з них вирішувалися й експериментально перевірялися різні варіанти способів і пристроїв, що вирішують окремі аспекти загальної проблеми безкоксової металургії. Огляд цих процесів приведений у роботі [1].

Найближчим технічним рішенням до способу, що заявляється, по істотних ознаках і розв'язуваній задачі є процес «Новальфер», розроблений для одержання заліза з особливо дрібної руди (більш 90% складає фракція 100-0мкм). Процес включає операції нагрівання руди до 850°C у псевдозрідженому шарі в камері попереднього нагрівання (у нижній частині якої спалюється водень і природний газ у гарячому повітрі), переміщення її у відновний реактор першого ступеня, де руда при температурі 850°C воднем металізується в псевдозрідженому шарі до 67%, охолодження до 550-580°C, магнітної сепарації, переміщення магнітної складової у відновний реактор псевдозрідженого шару другого ступеня, де при 580°C вона відновлюється до 92%.

Двоступінчасте відновлення з проміжним охолодженням прийнято щоб уникнути раптового осадження псевдозрідженого шару через злипання часток матеріалу зі ступенем відновлення більш 75% в атмосфері водню при температурі порядку 900°C.

Установка, що проробила кілька років, була зупинена через низьку економічність, див., наприклад, [1, с.63].

Низька економічність процесу обумовлена досягненням необхідної продуктивності за рахунок проведення першої стадії відновлення руди при підвищеній температурі. При цьому:

- виробляється низькосортна продукція з підвищеним вмістом шкідливих домішок - сірки, фосфору, миш'яку, міді, оскільки, по-перше, легковідновні навіть при порівняно низьких температурах миш'як і мідь при температурі більш 800°C частково розчиняються в металевому залізі, вміст якого в матеріалі при 67% ступені відновлення перевищує 50%, по-друге, з фосфорнокислих солей заліза фосфор відновлюється вже при 800°C [2, с.56] і утворює із залізом фосфіди, у третє, арка з відновного газу і відновлених при цій температурі сірчано-кислих солей заліза також активно поглинається залізом;

- конструкції камери попереднього нагрівання, відновного реактора і передатних систем необхідно виготовляти з дорогих, особливо жаростійких сталей, або втрачати теплову енергію в системі охолодження елементів конструкції;

- порівняно висока енергоємність процесу - необхідно нагріти матеріал до 850°C, потім охолодити його до 550-580°C;

- імовірне злипання відновлених часток заліза, що приводить до аварійної зупинки відновного реактора.

Найближчим технічним рішенням до пристрою, що заявляється, по істотним ознакам і розв'язуваній задачі є реактор на основі розробленого в середині минулого століття для хімічних технологій [3] і використаний для здійснення способу прямого відновлення заліза в багатоподовій печі [4].

Реактор являє собою багатоподову піч, що включає корпус у виді циліндричної камери, до бічної стінки якої закріплені багатоярусні горизонтальні кільцеві газонепроникні поди (секції) з отворами для пересипання матеріалу на нижче розташовану секцію, причому отвори розміщені поперемінно з протилежних країв секцій - з боку бічної поверхні корпусу, потім з боку осі і т.д. Верхній торець корпусу обладнаний пристроєм для завантаження на верхню секцію залізозмісного пилу і з'єднаний із трубопроводом для відведення димових газів, бічна стінка обладнана пристроями для завантаження на верхні секції пилового вугілля, пальниками з підведеними до них повітропроводами для допалювання паливних газів, що виділяються з матеріалу, фурмами для подачі в нижню частину реактора відновного газу, а також трубопроводами для відводу з реактора частини димових газів. Нижній торець корпусу обладнаний пристроєм для виведення з реактора відновленого матеріалу.

Внутрішня поверхня корпусу футерована вогнетривкою цеглою, секції також виготовлені з вогнетривкої цегли - їхня нижня частина виконана у виді самопідтримуваного зводу.

На рівні кожної секції мають ся шкребки, розташовані під кутом до радіуса і до обрію, жорстко з'єднані з центральною охолоджуваною колоною, установленою з можливістю обертання осю до корпусом. Діаметр колони приблизно дорівнює внутрішньому діаметрові кільцевих секцій. Шкребками матеріал перемішується і переміщається по окружності уздовж кільцевих секцій (поперемінно)

від периферії до осі, потім навпаки, для пересипання на наступний рівень.

Ферооксидвмісний матеріал, що завантажується на верхню секцію, переміщується і переміщується шкребками до корпусу, нагрівається димовими газами і пересипається на другу секцію, куди подають частину вугільного пилу. Суміш, продовжуючи нагріватися, переміщується до осі і пересипається на третю секцію, де до неї додають вугільний пил. На виході з третьої секції температура суміші, що нагрівається від димових газів над шаром матеріалу, досягає  $1100^{\circ}\text{C}$  і в повній мірі розвивається процес відновлення ферооксидів вуглецем і, частково, монооксидом вуглецю. Вихідний із шару матеріалу газ горить у струменях повітря, тепловий потік від смолоскипа компенсує тепло, затрачуване на ендотермічну реакцію прямого відновлення.

Швидкість обертання колони зі шкребками і кути нахилу шкребків приймаються такими, щоб тривалість перебування відновлюваного матеріалу в реакторі була достатня для заданого ступеня відновлення заліза.

Принципові недоліки пристрою:

- проведення реакцій не в псевдозрідженому шарі дрібнодисперсних часток, де тепломасообмін найбільш інтенсивний, а в товстих малорухомих шарах на поверхні газонепроникних секцій, різко негативно позначається на продуктивності процесу, оскільки реакція відновлення металів вуглецем ендотермічна, а теплопідведення від смолоскипа над шаром у середній і нижній обрії практично теплоізоляційного пилового шару здійснюється теплопровідністю в протипотоковій з оксидами вуглецю, що утворюються в процесі реакції;

- механічне перемішування і переміщення матеріалу, по-перше, вимагає великих питомих витрат електроенергії, по-друге, виключає задовільну працездатність конструкції при продуктивності, необхідній для металургійних агрегатів, оскільки термін служби металевих шкребків в умовах інтенсивної силової взаємодії з абразивним пиловим матеріалом при високій температурі вкрай обмежений, заміна зношених шкребків без руйнування реактора можлива тільки у випадку відстані між секціями, достатнього для переміщення людини (що різко збільшує загальний обсяг реактора) і наявності відповідних люків і засобів доставки ремонтного персоналу до шкребків, при цьому перед ремонтом реактор необхідно охолодити, а після заміни знову нагріти, що вкрай негативно позначається на працездатності вогнетривів.

Задачею, на рішення якої спрямований винахід, є істотне підвищення якості виробленого заліза і рентабельності його виробництва, а також спрощення конструкції, підвищення довговічності, зниження енергоємності при експлуатації пристрою для реалізації способу шляхом нового конструктивного виконання елементів реактора і нової сукупності дій над об'єктом.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що в способі відновлення дрібнодисперсної залізної руди, що включає її нагрів в псевдозрідженому шарі в камері попереднього нагрівання, відновлення в псевдозрідженому шарі в реакторі

першого ступеня, магнітну сепарацію і відновлення магнітної складової в псевдозрідженому шарі в реакторі другого ступеня до ступеня металізації не менше 92%, відповідно до винаходу, у камері попереднього нагрівання залізну руду нагрівають до температури  $400-450^{\circ}\text{C}$  і відновлюють у реакторі першого ступеня до перетворення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  у  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  при температурі  $400-540^{\circ}\text{C}$ , у температурному інтервалі  $500-540^{\circ}\text{C}$  роблять магнітну сепарацію, магнітну фракцію (концентрат) відновлюють у реакторі другого ступеня при температурі  $500-570^{\circ}\text{C}$ , причому:

- перед завантаженням руди в камеру попереднього нагрівання її здрибнюють до розміру часток менше 50 мкм високошвидкісним ударним впливом (дезінтеграцією), що приводить до механоактивації структури матеріалу;

- немагнітну фракцію магнітної сепарації прохолоджують до температури менше  $100^{\circ}\text{C}$  і піддають вторинній магнітній сепарації, магнітну фракцію вторинної магнітної сепарації відновлюють окремо від магнітної фракції первинної сепарації.

Відновний реактор, що включає корпус, до бічної стінки якого закріплені багатоярусні секції з отворами для пересипання матеріалу, а також пристрою для підведення і відводу газу, верхній торець корпусу з пристроєм для завантаження матеріалу на верхню секцію, а також нижній торець корпусу з пристроєм для висновку з реактора обробленого матеріалу, відповідно до винаходу, корпус виконаний у виді прямокутного паралелепіпеда, секції виконані у виді аерожолобів жалюзійного типу, ширина яких дорівнює внутрішній ширині корпусу, при цьому один кінець кожного аерожолоба примикає до вузької бічної стінки корпусу, а інший кінець відстоїть від протилежної вузької бічної стінки і граничить з верхнім торцем каналу для пересипання матеріалу, під нижніми кінцями каналів для пересипання матеріалу встановлені з можливістю повороту навколо горизонтальної осі підтиснуті до крайок каналів клапани, корпус розділений горизонтальними перегородками на модулі, з яких складаються реактори першого і другого ступеня, а також камера попереднього нагрівання, усередині модулів розташовані від одного до чотирьох аерожолобів, простір під нижнім аерожолобом кожного модуля реакторів з'єднаний з колектором підведення відновного газу, простір над кожним верхнім аерожолобом з'єднано з колектором відводу відпрацьованого газу, у модулях камери попереднього нагрівання простір під нижніми і простір над верхніми аерожолобами з'єднані відповідно з колекторами підведення свіжого і відводом відпрацьованого теплоносія, верхні модулі камери попереднього нагрівання і реактора другого ступеня обладнані прийомними бункерами, канали для пересипання матеріалу під нижніми аерожолобами нижніх модулів реакторів виведені за межі корпусу, інші модулі каналами для пересипання матеріалу сполучені один з одним, вивідний канал для пересипання матеріалу реактора першого ступеня сполучений із прийомним пристроєм установки магнітної сепарації, у якій пристрій видачі концентрату сполучений через транспортуючий пристрій із прийомним бункером

для завантаження матеріалу на верхній аеролоб верхнього модуля реактора другого ступеня, причому:

- аеролоба встановлені під кутом до обрію з підйомом убк підйому жалюзійних пластин аеролобів, а жалюзійні пластини встановлені з можливістю зміни кута їхнього нахилу до площини аеролобів.

Чим вище ступінь збагачення залізної руди, тим менше в шихті шкідливих елементів, наприклад, сірки і фосфору і тим більш економічний металургійний процес. Практично всі залізні руди, у тому числі і гематитові, більш-менш магнітні, але основний компонент гематитових руд,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , - не магнітний. У зв'язку з цим сухе збагачення руди магнітною сепарацією приводить до істотних втрат заліза в хвостах, а збагачення з використанням флотації зв'язано з великими енерговитратами на сушіння. Включення в пропонований процес операції попереднього відновлення має на меті повне відновлення не зв'язаного з іншими оксидами  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , який вміщується в металургійній сировині, до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  для наступного практично повного виділення ферооксидів мінімальними енерговитратами, виведення з подальшого процесу шкідливих домішок і супутніх металів, чому в істотному ступені сприяє особливо тонке здрібнювання руди шляхом руйнування зростків магнітних кристалів з немагнітними.

Відновлення вільного  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  необоротно відбувається при температурі вище  $300^\circ\text{C}$  навіть при малій концентрації відновного газу в газовому потоці, але чим менше температура, тим менше швидкість реакції і нижче  $400^\circ\text{C}$  продуктивність реактора першого ступеня буде незадовільно низкою, а вище  $540^\circ\text{C}$  піднімати температуру недоцільно щоб уникнути необхідності в деякому охолодженні залізної руди перед магнітною сепарацією, тому що вище  $540^\circ\text{C}$  магнітність  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  швидко убуває і при  $580^\circ\text{C}$  магнетит не магнітний [5]. Крапка Кюрі феромагнітного нікелю і його оксидів, а також практично всіх магнітних феритів - нижче  $520^\circ\text{C}$ , [6]. Цими факторами і визначений заявлений температурний інтервал ведення процесу до другого ступеня відновлення.

З метою мінімізації тепловтрат і здешевлення технологічного устаткування процес відновлення ферооксидів повинний вестися при мінімально припустимій по термодинамічних умовах температурі, але зниження температури процесу, як відзначено вище, істотно знижує швидкість реакції відновлення. Компенсації температурного зниження швидкості реакції досягають по-перше, особливо тонким здрібнюванням сировини, по-друге, його механоактивацією при високоінтенсивному ударному здрібнюванні в дезінтеграторі [7] - при такому впливі руйнування часток супроводжується створенням дуже великої поверхні мікрорасколів не тільки по гранях мікрокристалів, але і, частково, з розривом внутрішньокристалічних зв'язків. Усі гетерогенні реакції включають початковий етап - абсорбцію газового реагенту на поверхні розділу, потік абсорбованого газу пропорційний питомої поверхні (зовнішньої та внутрішніх мікрорасколів) твердого реагенту, величина якої назад пропор-

ційна розмірові часток. Крім того, починаючи зі ступеня відновлення 50-60%, процеси у твердій фазі є такими, що лімітують [8, с. 53, 69], а тривалість дифузійного процесу назад пропорційна квадратові радіуса частки. У зв'язку з цим результатом швидкість реакції відновлення назад пропорційна розмірові часток оксидів у ступені, що значно перевищує одиницю.

Нижче температури  $570^\circ\text{C}$  процес відновлення заліза йде за схемою  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}$  [8, с.35, 38], тому що  $\text{FeO}$  розпадається на  $\text{Fe}$  і  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . У зв'язку з тим, що швидкість відновлення  $\text{Fe}$  стає істотною тільки вище  $800^\circ\text{C}$ , економічно доцільно вести процес відновлення другого ступеня нижче  $570^\circ\text{C}$ . Нижня межа температури в реакторі другого ступеня  $500^\circ\text{C}$  обрана по мінімально припустимій швидкості відновлення  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Фосфор утримується в залізних рудах переважно у виді фосфорнокислих солей заліза - (немагнітного віаніту  $3\text{FeO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  і магнітного нижче  $300^\circ\text{C}$  керченіту  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), а також солі кальцію - стійкого до  $900^\circ\text{C}$  апатиту ( $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ ) [2, с.56], тому магнітною сепарацією при температурі вище  $450^\circ\text{C}$  весь фосфор відокремлюється від  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , частина його ( $\text{Fe} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ ) уловлюється вторинною магнітною сепарацією.

Побічні метали в залізних рудах утримуються здебільшого у виді феритів і інших складних з'єднань, що не відновлюються нижче  $800^\circ\text{C}$  і, як було відзначено раніше, немагнітні при температурі вище  $520^\circ\text{C}$ , тому також відокремлюються від концентрату, але нікель, а також ферити марганцю, міді, нікелю та ін., уловлюються вторинною магнітною сепарацією.

Таким чином, низькотемпературне відновлення залізної руди дозволяє одержувати перворodne залізо високої якості - практично не утримуюче шкідливих домішок і побічних металів, а вторинна магнітна сепарація при температурі навколишнього середовища дозволяє витягти ці метали і підвищити практично до верхньої межі ступінь витягу заліза з руди.

Нагрівання і відновлення руди в псевдозрізеному шарі і переміщення її в реакторі газовим потоком при використанні аеролобів жалюзійного типу, що направляють газовий потік під кутом до обрію, дозволяють виключити потребу в швидкозношувомому і енергоємному механічному устаткуванні в реакторі і підвищити його довговічність і надійність на кілька порядків. При температурі менше  $600^\circ\text{C}$  в якості відновлювача  $\text{H}_2$  значно менш активний, чим  $\text{CO}$ , а рівноважне відношення  $\text{CO}/\text{CO}_2$  не перевищує 0.13, тому, щоб уникнути необхідності подавати таку кількість відновного газу, при якому його потоком із псевдозріженого шару неслася б велика частина дрібнодисперсного матеріалу, використаний прийом поділу процесу відновлення на етапи, після кожного з яких відновний газ регенерують - відновлюють вміст  $\text{CO}$  до концентрації 80% - значно більшої, ніж рівноважна. При цьому поділ реактора на однакові модулі, у кожному з яких проводять один етап відновлення, додатково дозволяє уніфікувати, а значить спрос-

тити й здешевити виготовлення, монтаж і профілактичне обслуговування реакторів.

Сутність запропонованого винаходу пояснюється кресленнями, де зображені на:

Фіг.1 - схема відновного реактора;

Фіг.2 - схема роботи клапана;

Фіг.3 - схематичний фрагмент вертикального розрізу аерожолоба в робочому а) і в закритому - б) стані.

Технологічне устаткування комплексу включає ділянку підготовки матеріалів, оснащену дезінтеграторами, газогенератором і вапняно-випалювальною піччю, ділянку виробництва заліза, що включає декілька паралельно працюючих відновних реакторів з установками первинної магнітної сепарації й установку вторинної магнітної сепарації, ділянку виробництва сталі і ділянку утилізації вторинних матеріалів.

Відновний реактор (Фіг.1) поєднує в одному корпусі 1 камеру попереднього нагрівання, що складає з модулів 2а і 2б, реактор першого ступеня 3 і реактор другого ступеня, розділений на модулі 4а, 4б, 4с і 4д. Модулі розділені горизонтальними перегородками 5. Корпус 1 являє собою прямокутний у плані короб, до бічних широких граней якого жорстко закріплені аерожолоби 6 і перегородки 7, що утворюють з бічними стінками корпусу 1 канали 8, під якими встановлені з можливістю підтиску до перегородок 7 пластинчасті клапани 9 (Фіг.1, 2). Підтиск шарнірно закріплених клапанів 9 до торців каналів 8 контрвантажами 10 (Фіг.2) відрегульовано так, що при вазі матеріалу, висота стовпа якого в каналах 8 (Фіг.1) створює аеродинамічний опір потокові газу в кілька разів більше, ніж опір межуючого з каналом аерожолоба 6 із шаром матеріалу на ньому, клапани 9 повертаються і пропускають матеріал униз, підтримуючи в каналах 8 необхідну висоту стовпа матеріалу. Під прийомними бункерами 11 і 12 (Фіг.1) верхніх модулів камери попереднього нагрівання 2а і реактором другого ступеня 4а також установлені клапани 9. З реактора першого ступеня матеріал виводять через канал 8а, з реактора другого ступеня залізо виводять через канал 8б.

У модулях камери попереднього нагрівання 2а і 2б, у реакторі першого ступеня 3 і в кожному модулі 4а-д установлені по два аерожолоба 6. Кожний аерожолоб 6 включає прямокутну несучу раму 13 (Фіг.3), пластини 14, які встановлені в рамі 13 з можливістю повороту навколо осей 15, і керуючу раму 16, шарнірно з'єднану по осях 17 із пластинами 14. Керуюча рама 16 розташована під рамою 13 і через ущільнення з'єднана з керуючим механізмом, закріпленим до корпусу 1 (Фіг.1) із зовнішньої сторони. Крок пластин 14 (Фіг.3), їхній профіль і ширина вибираються такими, щоб кут між площиною А-А (Фіг.3а) і горизонталлю був меншим кута природного укусу відновлюваного матеріалу. При цьому у випадку аварійного припинення подачі газу аерожолоба 6 (Фіг.1) виявляються непроникиними для осілих на них шарів матеріалу. При умовно закритому аерожолобі (Фіг.3б) між пластинами 14 залишається зазор порядку 2 мм.

У зв'язку з тим, що потік газу, проходячи крізь аерожолоб жалюзійного типу, одержує горизонتا-

льну складову швидкості, щоб уникнути занадто великої швидкості переміщення матеріалу уздовж аерожолобів 6 (Фіг.1), по-перше, вони розташовані з підйомом під кутом до обрію в напрямку підйому жалюзійних пластин 14 (Фіг.3), по-друге, жалюзійні пластини 14 виконані з витягнутим S-подібним профілем, загнутим у верхній частині нагору. Величина кута підйому аерожолобів складає 3-8°. При величині кута меншій, чим 3°, ефект уповільнення незначний, а при величині більшій 8° невідправдано збільшується висота пристрою.

Гаряче повітря підводять у модулі камери попереднього нагрівання 2а, б (Фіг.1) по колекторі 18 через отвори 19 у бічній стінці корпусу 1, охолоджене повітря відводять через отвори 20 у колектор 21. У реактор 3 і в модулі 4а-д відновний газ підводять від колектора 22 через отвори 23, відпрацьований газ виводять через отвори 24 у колектор 25.

Магнітну сепарацію попередньо відновленої руди роблять в установці 26, вторинну магнітну сепарацію проводять в установці 27.

У вихідному положенні відновний реактор порожній, газ не подається, клапани 9 і 9а (Фіг.1) перекривають знизу канали 8 і бункера 11 і 12, аерожолоби 6 закриті (Фіг.3б), клапан 9б замкнений.

Пристрій працює в такий спосіб.

У колектор 18 під тиском 0.5кПа подають гаряче повітря, через реактор 3 і модулі 4а-б починають помпувати з малою витратою гарячий відновний газ, прогрівають установку 26 магнітної сепарації. Після прогріву всього пристрою в бункер 11 (Фіг.1) безперервним потоком з малою витратою починають подавати дрібнодисперсну руду, витрату гарячого повітря збільшують до нормальної. Коли в бункері 11 накопичується маса матеріалу, вага якої перевищує силу підтиску клапана 9 контрвантажем 10 (Фіг.2), він повертається, руда рівномірним потоком надходить на верхній аерожолоб 6 (Фіг.1) і під дією струменів повітря, що надходять через щілини закритого аерожолоба 6, переміщується до верхнього каналу 8. При його заповненні шихтою відкривається клапан 9 під ним, матеріал надходить на другий аерожолоб, звідти - на аерожолоби другого модуля, реактора 3 і далі в установку 26, підйомником (не показаний) перевантажується в бункер 11 і далі переміщається до каналу 8б. При відкритті клапана 9 у модулі 2б витрату відновного газу збільшують до нормальної. При надходженні в автоматичну систему керування пристроєм сигналу від клапана 9 каналу 8б подачу руди в бункер 11 плавно збільшують до нормальної, відкривають аерожолоби, подають напругу на обмотки електромагнітів установки 26. Пристрій переходить у штатний режим роботи.

При роботі відновного реактора в штатному режимі система керування ступенем відкриття аерожолобів, подачею руди, витратою і регенерацією відновного газу, роботою магнітних сепараторів 26 і 27, по заданій програмі періодично визначає вертикальну швидкість відновного газу в модулях і підтримує її в заданому інтервалі регулювання витрати подаваного газу, періодично відбирає проби матеріалу на виході з каналу 8б і

визначає ступінь його відновлення, наприклад, по величині електропровідності, у випадку відхилення від заданої величини коректує параметри роботи елементів комплексу, що дозволяє вести процес з максимальною продуктивністю при заданому ступені відновлення матеріалу.

Кращою сировиною процесу виробництва заліза є суха дрібнодисперсна залізна руда, можливо і небагата по залізо, порожня порода якої складається переважно з кварциту, вапняка будь-якої крупності і вугілля: для газогенератора - переважно антрацит, енергетичний - будь-які дешеві марки.

Приклад здійснення способу.

Залізна руда зернистої фракції містить 66%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 2% магнітних феритів, 0.05% P в виді фосфористих з'єднань заліза, 0.03% S у виді сульфідів заліза, інше - силікати. Технологічна лінія переробляє 30т/годину залізної руди, видає 13.85т/годину порошкового заліза із ступенем металізації 95%.

Основу відновного реактора складають уніфіковані модулі, у кожному з яких установлені два аероколоби 6 з каналами для пересипання матеріалу. Аероколоби мають ширину 2 і довжину 16м. Камера попереднього нагрівання складається з трьох модулів, реактор другого ступеня - з дев'яти модулів, реактор першого ступеня - з одного модуля.

Руду подрібнюють у дезінтеграторах до середнього розміру часток 20мкм і подають безперервним потоком 8.333кг/з у прийомний бункер 11 камери попереднього нагрівання. У нижню частину кожного з трьох модулів удмухують по 1.75нм<sup>3</sup>/з (5.918м<sup>3</sup>/с) нагрітого до 650°C повітря, відводять його з температурою 150°C. При площі камери 32м<sup>2</sup> вертикальна швидкість повітряного потоку складає 0.185м/с. Повітря нагрівають у рекуператорі димом із зовнішньої печі, де спалюють низькосортне паливо в повітрі, що виходить з камери попереднього нагрівання через колектор 21.

Відповідно до розрахунку, мінімальна швидкість вертикального потоку газу у вільному перетині реактора, необхідна для аерації матеріалу щільністю 4200кг/м<sup>3</sup> при середньому розмірі часток 20мкм і при висоті шару 0.04м, дорівнює 0.006м/с, втрата напору в аероколобі й в аерованому шарі шихти висотою 0.045м - 1.2кПа, швидкість витання частки неправильної форми розміром 20мкм із щільністю 5000кг/м<sup>3</sup> у СО при температурі 560°C - 0.81м/с, а часток розміром 2мкм - 0.256м/с. Система автоматичного керування підтримує кількість газу в реакторі, при якому його швидкість під нижнім аероколобом у модулях не перевищує 0.15м/с.

У вертикальних каналах 8 підтримується стовп матеріалу висотою 0.5м, для його аерації необхідний перепад тиску значно більший, ніж для аерації шару матеріалу на аероколобі, тому газ практично не проходить через канали 8.

У реактор першого ступеня 3 надходить руда з температурою 500°C і виходить із температурою 530°C, від руди віднімається 0.1846кг/с кисню відновним газом, що вдмухується при температурі порядку 560°C з витратою 1.0нм<sup>3</sup>/с (2.842м<sup>3</sup>/с) і із вмістом 80% СО, 8% СО<sub>2</sub>, 10% Н<sub>2</sub> і 2% Н<sub>2</sub>О, від-

працьований газ виходить із реактора з температурою 568°C і містить 60% СО та 4% Н<sub>2</sub>. Первинною магнітною сепарацією одержують 5.315кг/с  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і 2.83кг/с хвостів, у тому числі 0.167кг/с феритів.

У верхній модуль реактора другого ступеня  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  надходить з температурою 510°C. В дев'яти модулях реактора другого ступеня від магнетиту відбирають 1.4486кг/с кисню, для цього в них удмухують з температурою 560°C 10.67нм<sup>3</sup>/с (32.57м<sup>3</sup>/с) відновного газу із вмістом 80% СО та 10% Н<sub>2</sub>, з реактора відводять газ із вмістом 65% СО і 6% Н<sub>2</sub> при температурі 572°C і 3.846кг/с (332т/добу) заліза з температурою 560°C. Залізо в закритих теплоізольованих контейнерах транспортують у сталеплавильний цех і, частково, у герметично закритих контейнерах відправляють на нестатки порошкової металургії.

Відпрацьований відновний газ продувають через одну з двох камер газогенератора з нагрітим до 1000-1100°C антрацитом, прохолоджують у першому рекуператорі до 700°C за рахунок передачі тепла повітрю для опалення вапняно-випалювальної печі, пропускають через камеру з вапном, піддають сухому газоочищенню, прохолоджують до 80°C у другому рекуператорі, піддають мокрому газоочищенню, стискають до 100кПа надлишкового тиску, нагрівають до 600°C у другому рекуператорі, в результаті чого одержують не утримуючий сірки свіжий відновний газ із вмістом 80% СО і 10% Н<sub>2</sub>, що має надлишковий тиск 80кПа. При вдмухуванні в модулі газ розширюється до надлишкового тиску 50кПа, температура знижується до 560°C.

Реакція відновлення вуглекислого газу вуглецем йде з істотною витратою тепла, тому вугілля, через яке пропускають газ, швидко прохолоджується. При зниженні його температури до 1000°C подачу регенеруемого газу переключають на другу камеру газогенератора, у якій вугілля розігріте до потрібної температури, а в камеру з підстигшим вугіллям подають кисень і поповнюють свіжим вугіллям.

Пил, уловлений у сухому газоочищенні, повертають у прийомний бункер реактора другого ступеня.

При вертикальній швидкості газового потоку через аероколоб жалюзійного типу, рівній 0.1м/с, утвориться горизонтальна складова потоку зі швидкістю порядку 0.02м/с. Цим потоком псевдозрідений шар матеріалу переміщається уздовж аероколоба зі швидкістю порядку 0.006м/с, при цьому тривалість масообміну матеріалу з відновним газом складає в реакторі першого ступеня понад 1.48 години і в реакторі другого ступеня - 13.33 години. Цієї тривалості вистачає для завершення реакції відновлення. Тривалість перебування газу в модулі - менше 1 хвилини, за цей час з нерівноважного газу сажистий вуглець практично не виділиться.

«Хвости» первинної магнітної сепарації транспортують у накопичувальний бункер для охолодження до 20-40°C, після чого них сепарують спочатку в слабкому (порядку 1100Е), потім у сильному (15000Е) магнітному полі, При цьому

витаються металевий нікель і всі важковідновлювані магнітні і слабomagнітні при низькій температурі з'єднання заліза з побічними металами й елементами - нікелем, марганцем, міддю, магнієм, а також з фосфором і сіркою. Вторинною магнітною сепарацією витягають 0.5т/годину цих з'єднань. Їх відновлюють у виготовленому з вогнетривких керамічних матеріалів реакторі при температурі 900-1000°C монооксидом вуглецю, що утвориться при продувці вугілля в газогенераторі киснем, після чого розділяють метали.

«Хвости» вторинної сепарації разом з вапном із сіркопоглинаючої камери утилізують, наприклад, при виробництві низькомарочних в'язучих у будівельних роботах.

Таким чином, запропонований спосіб низькотемпературного відновлення дрібнодисперсної залізної руди дозволяє не тільки витягати практично цілком усе залізо руди, у тому числі і важкозбагаченої гематитової, але й одержувати залізний порошок високої чистоти, забезпечує практично мінімально можливі енерговитрати на здійснення процесу, технологічне устаткування може бути виготовлене з не дуже дорогих середньолегованих

сталей із жароміцністю до 650°C, воно не містить інтенсивно зношуваних елементів, а значить довговічне.

Джерела інформації:

1. Н.А.Тулин, В.С.Кудрявцев, С.А.Пчелкин, и др.. Развитие бескоксовой металлургии /под редакцией Тулина Н.А., Майера К. М.: Металлургия, 1987, 328с.
2. Большая советская энциклопедия. Второе издание, т.15, с.56.
3. Большая советская энциклопедия. Второе издание, т.38, с.584.
4. Патент RU №2205229, МКИ C21B13/06, F27B3/04, БИМП. №16, 2003г.
5. Большая советская энциклопедия. Второе издание, т.25, с.617.
6. Большая советская энциклопедия. Второе издание, т.44, с.635, 638.
7. Абакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов.Новосибирск. 1980г., 297стр.
8. Ю.С.Юсфин, А.А.Гиммельфарб, Н.Ф.Пашков. Новые процессы получения металла. М.: «Металлургия», 1994г, 320с.

