



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **128944** (13) **C2**  
(51) МПК  
**C22B 5/12** (2006.01)  
**C21B 13/10** (2006.01)  
**C21B 13/12** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2021 06079</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>31.03.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>05.12.2024</b></p> <p>(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>1950403-4</b></p> <p>(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>01.04.2019</b></p> <p>(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку: <b>SE</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>23.02.2022, Бюл.№ 8</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>04.12.2024, Бюл.№ 49</b></p> <p>(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ: <b>PCT/SE2020/050337, 31.03.2020</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Мюррей Ханс (SE)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці): <b>ГРІНАЙРОН Х2 АБ,</b> Edsängsvägen 5B, 192 54 Sollentuna, Sweden (SE)</p> <p>(74) Представник: <b>Новікова Лідія Аркадіївна, реєстр. №36</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: US 3449117 A, 10.06.1969 JP S5083990 A, 07.07.1975 US 3964898 A, 22.06.1976 WO 2012/091422 A2, 05.07.2012 SE 382078 B, 12.01.1976 JP H04254796 A, 10.09.1992 US 2016/017445 A1, 21.01.2016 CN 207130292 U, 23.03.2018 WO 2015/016950 A1, 05.02.2015 UA 63283 U, 10.10.2011</p>
--	--

## (54) СПОСІБ ОТРИМАННЯ ПРЯМОВІДНОВЛЕНОГО МЕТАЛУ

### (57) Реферат:

Спосіб отримання прямовідновленого металевого матеріалу, що включає в себе етапи, на яких: а) завантажують металевий матеріал, що підлягає відновленню, в простір (120) печі; b) відкачують існуючу атмосферу з простору (120) печі для створення розрідження всередині простору (120) печі; c) підводять, на етапі основного нагрівання, тепло і газоподібний водень у простір (120) печі для нагрівання нагрітим газоподібним воднем завантаженого металевого матеріалу до температури, досить високої для відновлення присутніх у металевому матеріалі оксидів металів, що, у свою чергу, приводить до утворення водяної пари; і d) здійснюють конденсацію та збирання утвореної на етапі c) водяної пари в конденсаторі (160) під завантаженим металевим матеріалом. Винахід відрізняється тим, що зазначений газоподібний водень на етапі c) підводять без рециркуляції газоподібного водню, причому спосіб додатково включає в себе наступний етап, на якому вилучають відновлений металевий матеріал з простору (120) печі і зберігають і/або транспортують відновлений металевий матеріал в інертній атмосфері.

UA 128944 C2

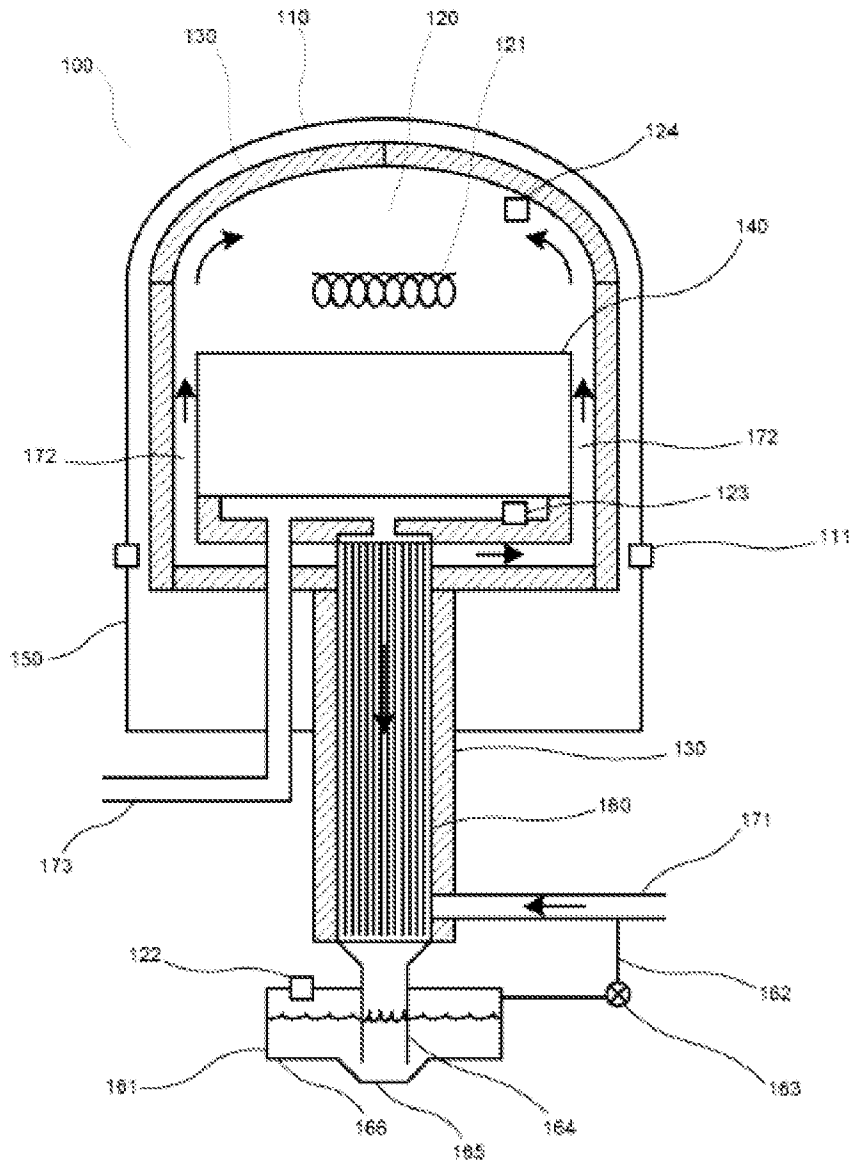


Fig. 1A

Область техніки, до якої відноситься винахід

Даний винахід відноситься до способу та пристрою отримання прямовідновленого металу, зокрема прямовідновленого заліза (також іменованого "губчасте залізо"). Зокрема, даний винахід відноситься до прямого відновлення металевої руди в регульованій водневій атмосфері з отриманням відновленого металу.

Рівень техніки

Отримання прямовідновленого металу з використанням водню як відновника саме по собі широко відоме. Наприклад, в патентних документах SE7406174-8 і SE7406175-5 розкрито способи, що передбачають вплив на шихту металевої руди потоком водневої атмосфери, що омиває її, в результаті чого відбувається її відновлення з утворенням прямовідновленого металу.

Даний винахід може, зокрема, знайти застосування у разі порційного завантаження та обробки матеріалу, що підлягає відновленню.

Рішення з рівня техніки мають ряд недоліків, пов'язаних, у тому числі, з ефективністю у частині теплових втрат та використанням газоподібного водню. Одна з проблем управління пов'язана з необхідністю вимірювання для визначення завершення процесу відновлення.

Даний винахід дозволяє подолати зазначені вище недоліки.

Розкриття суті винаходу

З урахуванням вищесказаного, винахід відноситься до способу отримання прямовідновленого металевого матеріалу, що включає в себе етапи, на яких: а) завантажують металевий матеріал, що підлягає відновленню, в простір печі; б) відкачують атмосферу з простору печі для утворення розрідження всередині простору печі; с) підводять, на етапі основного нагрівання, тепло і газоподібний водень у простір печі для нагрівання нагрітим газоподібним воднем завантаженого металевого матеріалу до температури, досить високої для відновлення присутніх у металевому матеріалі оксидів металів, що, у свою чергу, призводить до утворення водяної пари; і d) здійснюють конденсацію та збирання утвореної на етапі с) водяної пари в конденсаторі під завантаженим металевим матеріалом; що відрізняється тим, що зазначений газоподібний водень на етапі с) підводять без рециркуляції газоподібного водню, причому спосіб додатково включає наступний етап, на якому вилучають відновлений металевий матеріал з простору (120) печі і зберігають і/або транспортують відновлений металевий матеріал в інертній атмосфері.

Стислий опис креслень

Далі винахід буде докладно розкрито на прикладах його здійснення та креслень, що додаються, на яких зображені:

Фіг. 1а – спрощений вигляд у поперечному розрізі печі для використання у запропонованій системі у першому робочому стані;

Фіг. 1b – спрощений вигляд у поперечному розрізі печі на Фіг. 1а у другому робочому стані;

Фіг. 2 – схематичний загальний вигляд запропонованої системи;

Фіг. 3 – схема послідовності запропонованого способу; і

Фіг. 4 – графік можливого відношення тиску  $H_2$  до температури в просторі печі, що нагрівається, згідно з даним винаходом.

На Фіг. 1а і 1b однакові номери позицій позначають однакові елементи.

Здійснення винаходу

Фіг. 1а та 1b ілюструють піч 100 отримання прямовідновленого металевого матеріалу. На Фіг. 2 зображені дві такі печі 210, 220. Печі 210, 220 можуть бути ідентичні печі 100 або відмінні від неї в будь-яких деталях. При цьому слід розуміти, що все сказане в даному документі відносно печі 100 рівним чином застосовно до печі 210 і/або 220, і навпаки.

Також слід розуміти, що все сказане в даному документі відносно запропонованого способу рівним чином застосовно до запропонованої системи 200 та/або печі 100; 210, 220, і навпаки.

Піч 100 як така багато в чому схожа з печами, розкритими в SE7406174-8 і SE7406175-5, тому подробиці її конструкції можна дізнатися з зазначених документів. Важлива відмінність між зазначеними печами і запропонованою піччю 100 полягає в тому, що піч 100 не виконана з можливістю роботи з рециркуляцією газоподібного водню через піч 100 і назад до збірної посудини, розташованої за межами печі 100, зокрема виконана таким чином, в якому не передбачена рециркуляція газоподібного водню з печі 100 (або простору 120 печі, що нагрівається) і назад в піч 100 (або простір 120 печі, що нагрівається) під час обробки однієї і тієї порції завантаженого матеріалу, що підлягає відновленню.

З нижченаведеного опису стане зрозуміло, що піч 100 виконана з можливістю роботи в порційному режимі з відновленням однієї шихти матеріалу за один прийом і з можливістю роботи, в процесі такої обробки окремими порціями, як замкнутої системи з точки зору того, що

газоподібний водень подають в піч 100, але не видаляють із неї на етапі порційного відновлення.

Інакше кажучи, кількість газоподібного водню, присутнього усередині печі 100, завжди зростає під час процесу відновлення. Зрозуміло, після завершення відновлення газоподібний водень відкачують із внутрішнього простору печі 100, проте на етапі відновлення рециркуляція газоподібного водню не відбувається.

Таким чином, піч 100 входить до складу замкнутої системи, що містить простір 120 печі, що нагрівається, виконаний з можливістю створення в ньому надлишкового тиску, наприклад, щонайменше 5 бар, або щонайменше 6 бар, або щонайменше 8 бар, або навіть щонайменше 10 бар. Верхня частина печі 110 100 виконана у формі дзвона. Її можна відкривати для завантаження матеріалу, що підлягає обробці, і газонепроникно закривати за допомогою кріпильних засобів 111. Простір 120 печі ізольований вогнетривким матеріалом, наприклад, цеглою 130.

Простір печі 120 виконано з можливістю нагрівання за допомогою одного або декількох нагрівальних елементів 121. Нагрівальні елементи 121 переважно являють собою електричні нагрівальні елементи. При цьому також можливе використання радіаційних трубчастих камер згоряння або аналогічних елементів, що нагріваються паливом. При цьому нагрівальні елементи 121 не створюють будь-яких газоподібних продуктів згоряння, що безпосередньо хімічно взаємодіють з простором печі 120, які необхідно хімічно регулювати для цілей даного винаходу. Переважно, щоб єдиним газоподібним матеріалом у просторі печі під час розкритого нижче етапу основного нагрівання був газоподібний водень.

Нагрівальні елементи 121 можуть бути переважно виконані з жаростійкого металевого матеріалу, наприклад, молібденового сплаву.

У просторі печі 120, що нагрівається, також можуть бути розташовані додаткові нагрівальні елементи. Наприклад, нагрівальні елементи, аналогічні елементам 121, можуть бути встановлені на бічних стінках простору печі 120, наприклад, на висоті, що відповідає завантаженому матеріалу або щонайменше контейнеру 140. Ці нагрівальні елементи можуть сприяти нагріванню не тільки газу, але і завантаженого матеріалу за рахунок теплового випромінювання.

Піч 100 також містить нижню частину 150, що утворює спільно з верхньою частиною 110 герметичну посудину, коли піч закрита за допомогою кріпильних засобів 111.

Контейнер 140 для матеріалу, що підлягає обробці (відновленню), розташований в нижній частині 150 печі 100. Контейнер 140 може бути опертий на вогнетривку підлогу простору 120 печі з можливістю проходження газу під контейнером 140, наприклад, по відкритим або закритим каналам 172, сформованим у зазначеній підлозі, при цьому зазначені канали 172 проходять від входу 171 для газоподібного водню, наприклад, від центральної частини простору печі 120 у зазначеній підлозі печі, радіально назовні до радіальної периферії простору 120 печі, а потім вгору до верхньої частини простору печі 120. Зазначені потоки на розкритих нижче етапах попереднього та основного нагрівання позначені стрілками потоків на Фіг. 1а.

Контейнер 140 переважно має відкриту будову, що означає можливість вільного проходження газу через щонайменше днище/пол контейнера 140. Це може бути забезпечено, наприклад, за рахунок отворів, сформованих в днищі контейнера 140.

Матеріал, що підлягає обробці, містить оксид металу, переважно – оксид заліза, наприклад,  $Fe_2O_3$  і/або  $Fe_3O_4$ . Матеріал може бути гранульованим, наприклад, у формі котунів або грудок. Одним із матеріалів, придатних для завантаження для порційного відновлення, є залізорудні окатиші, окатані у воді до діаметра грудки приблизно 1-1,5 см. Якщо ця залізна руда додатково містить оксиди, пароутворення в яких відбувається при температурах нижче кінцевої температури завантаженого матеріалу згідно з пропонованим способом, такі оксиди можна конденсувати в конденсаторі 160 і легко збирати у формі порошку. Ці оксиди можуть включати оксиди металів, наприклад, Zn і Pb.

У простір 120 печі переважно не завантажують дуже великі кількості матеріалу, що підлягає відновленню. В кожну піч 100 переважно завантажують не більше 50 тонн, наприклад, не більше 25 тонн, наприклад, від 5 до 10 тонн, у кожній порції. Дану шихту можна тримати в єдиному контейнері 150 всередині простору печі 120. Залежно від необхідної продуктивності одночасно можуть бути задіяні декілька печей 100, а залишкове тепло від порції в одній печі 220 можна використовувати для попереднього нагрівання іншої печі 210 (див. Фіг. 2 і нижче).

Вищевказане утворює систему 200, виконану з можливістю встановлення та використання безпосередньо на рудниковому майданчику без необхідності дорогого перевезення руди перед відновленням. При цьому прямовідновлений металевий матеріал можна отримувати безпосередньо на майданчику, упаковувати у захисній атмосфері та транспортувати на інший

об'єкт для подальшої переробки.

Відповідно, у разі використання закатаних у воді залізорудних грудок, передбачена можливість установки печі 100 з підключенням її до системи виробництва залізорудних грудок, завдяки чому завантаження металевого матеріалу в контейнері 140 у піч 100 може відбуватися повністю автоматизованим способом, при якому контейнери 140 автоматично переміщують по замкненому контуру із системи виробництва залізорудних грудок у систему 100 і назад, наповнюють залізорудними грудками, що підлягають відновленню; вводять у простір 120 печі; здійснюють розкритий у даній заявці процес водневого/термічного відновлення; вилучають із простору 120 печі та спорожняють; повертають у систему виробництва залізорудних грудок; знову наповнюють і т.д. Можливе використання контейнерів 140 у кількості, більше кількості печей 100, завдяки чому при кожній зміні порції відновлену шихту в будь-якому контейнері негайно замінюють печі 100 іншим контейнером, що містить ще не відновлений матеріал. Така укрупнена система, наприклад, на рудниковому майданчику, може бути реалізована з можливістю повної автоматизації, а також гнучкості в частині продуктивності з використанням декількох печей 100 меншого розміру замість однієї дуже великої печі.

Під контейнером 140, піч містить 100 газо-газовий теплообмінник 160, який може переважно являти собою відомий трубчастий теплообмінник. Теплообмінник 160 переважно є теплообмінником протиточного типу. З теплообмінником 160, під теплообмінником 160, з'єднаний закритий жолоб 161 для збирання та вміщення водяного конденсату з теплообмінника 160. Конструкція жолоба 161 також дозволяє йому витримувати робочі тиску простору 120 печі без втрати газонепроникності.

Теплообмінник 160 з'єднаний з простором 120 печі, переважно з можливістю проходження холодних/охолоджених газів, що надходять в простір 120 печі, через теплообмінник 160 вздовж розташованих зовні/на периферії трубок теплообмінника і далі по вказаних каналах 172 до нагрівального елемента 121. Потім нагріті газу, що виходять із простору 120 печі, пройшовши через завантажений матеріал і нагрівання його (див. нижче), проходять через теплообмінник 160 по розташованим усередині/у центрі трубкам теплообмінника, тим самим нагріваючи зазначені холодні/охолоджені газу. Таким чином, газу, що уходять, нагрівають вхідні газу і за рахунок теплопередачі з-за різниці їх температур, і за рахунок теплоти конденсації водяної пари, що міститься в газах, що ефективно нагріває вхідні газу.

Утворений водяний конденсат з газів, що уходять, збирають у жолобі 161.

Піч 100 може містити набір датчиків температури та/або тиску в жолобі 161 (122); у нижній частині простору 120 печі, наприклад, під контейнером 140 (123) та/або у верхній частині простору 120 печі 124. Ці датчики може використовувати блок 201 керування для керування процесом відновлення, як буде розкрито нижче.

Номер позиції "171" означає вхідний канал для нагрівання/охолодження газоподібного водню. Номер позиції "173" означає вихідний канал для охолодження використаного газоподібного водню.

Між жолобом 161 і вхідним каналом 171 може бути розташований канал 162 врівноваження надлишкового тиску з клапаном 163. У разі виникнення надлишкового тиску в жолобі 161 через великі кількості води, що текуть в жолоб 161, надлишковий тиск може бути скинуто у вхідний канал 171. Клапан 163 може являти собою простий клапан скидання надлишкового тиску, виконаний з можливістю відкриття, коли тиск в жолобі 161 вище тиску в каналі 171. Альтернативно, клапаном може керувати керуючий пристрій 201 (див. нижче) в залежності від вимірюваного значення від датчика 122 тиску.

Водяний конденсат може бути направлений з конденсатора/теплообмінника 160 вниз в жолоб через зливник 164 або що-небудь подібне, що виходить на дно жолоба 161, наприклад, в локальній нижній точці 165 жолоба, переважно таким чином, щоб отвір зливника 164 був розташований повністю під основним дном 166 жолоба 161, як показано на Фіг. 1а. Це зменшить завихрення рідкої води у жолобі 161, тим самим забезпечивши більш керовані робочі умови.

Жолоб 161 переважно за розмірами виконаний з можливістю прийому та вміщення усієї води, що утворюється в ході відновлення завантаженого матеріалу. Відповідно, розмір жолоба 161 можна пристосовувати в залежності від типу та обсягу однієї порції відновленого матеріалу. Наприклад, у разі повного відновлення 1000 кг  $Fe_3O_4$  утворюється 310 літрів води, у разі повного відновлення 1000 кг  $Fe_2O_3$  утворюється 338 літрів води.

На Фіг. 2 проілюстрована система 200 з можливістю використання в ній печі того типу, що проілюстровано на Фіг. 1а та 1b. Зокрема, одна або обидві печі 210 і 220 можуть бути того типу, що проілюстровано на Фіг. 1а та 1b, або щонайменше за пунктом 1 формули.

Номер позиції "230" позначає теплообмінник газо-газового типу. "240" позначає

теплообмінник газоводяного типу. "250" позначає вентилятор. "260" позначає вакуумний насос. "270" позначає компресор. "280" позначає посудину для використаного газоподібного водню. "290" позначає посудину для свіжого/невикористаного газоподібного водню. Номери позиції V1-V14 позначають клапани.

5 "201" позначає керуючий пристрій, зв'язаний з датчиками 122, 123, 124 та клапанами V1-V14, і в цілому виконаний з можливістю керування розкритими у даній заявці процесами. Керуючий пристрій 201 також може бути зв'язаний з користувальницьким керуючим пристроєм, наприклад, графічним інтерфейсом користувача, наданим комп'ютером (не показаний) користувачеві системи 200 для диспетчерського і додаткового керування.

10 Фіг. 3 ілюструє запропонований спосіб, що передбачає використання системи 100 типу, що в цілому проілюстрований на Фіг. 3, і, зокрема, печі 100 того типу, що в цілому проілюстрований на Фіг. 1a та 1b. Зокрема, спосіб призначений для одержання пряминовідновленого металевого матеріалу за допомогою газоподібного водню як відновника.

15 Після зазначеного прямого відновлення металевий матеріал може утворювати губчастий метал. Зокрема, металевий матеріал може являти собою оксид заліза, а отриманий в результаті прямого відновлення продукт може являти собою губчасте залізо. Це губчасте залізо можна використовувати на наступних етапах способу для виробництва сталі і тому подібне.

На першому етапі починають виконання способу.

20 На наступному етапі металевий матеріал, що підлягає відновленню, завантажують у простір 120 печі. Завантаження може відбуватися шляхом розміщення у простір 120 печі навантаженого контейнера 140, орієнтованого, як показано на Фіг. 1a і 1b, після чого простір 120 печі може бути закрито і газонепроникно ізолювано за допомогою кріпильних засобів 111.

25 На наступному етапі атмосферу відкачують з простору 120 печі для досягнення всередині простору 120 печі розрідження в порівнянні з атмосферним тиском. Це можна здійснювати шляхом закриття клапанів 1-8, 11 і 13-14 і відкриття клапанів 9-10 і 12, а також висмокування вакуумним насосом і, тим самим, відкачування атмосфери, що міститься всередині простору 120, по каналу, що проходить через 240 і 250. Далі можна відкрити клапан 9 для випуску потоку відкачених таким чином газів в навколишню атмосферу, якщо простір печі 120 заповнено повітрям. Якщо простір печі 120 заповнено використаним газоподібним воднем, його відкачують

30 в посудину 280. У даному прикладі атмосферу печі відкачують по каналу 173, при цьому слід розуміти, що можливе використання будь-якого іншого вихідного каналу, розташованого в печі 100.

35 На етапі, на якому здійснюють відкачування, як і на інших розкритих нижче етапах, можна задіяти керуючий пристрій 201 для регулювання тиску в просторі 120 печі, наприклад, в залежності від показань від датчиків 122, 123 і/або 124 тиску.

Випорожнення можна продовжувати доти, поки в просторі 120 печі не буде досягнуто тиск не вище 0,5 бар, переважно не вище 0,3 бар.

40 На наступному етапі попереднього нагрівання у простір 120 печі підводять тепло і газоподібний водень. Газоподібний водень можна подавати із посудин 280 та/або 290. Оскільки, як сказано вище, піч 100 є закритою, буде по суті відсутній витік будь-якої кількості газоподібного водню в ході цього процесу. Інакше кажучи, втрати газоподібного водню (крім водню, що витрачається в реакції відновлення) будуть дуже низькими або відсутніми. При цьому водень, що витрачається, буде являти собою тільки водень, хімічно використовуваний у процесі відновлення. Крім того, для процесу відновлення необхідний тільки той газоподібний водень, який входить у необхідну кількість для підтримки тиску та хімічної рівноваги між газоподібним воднем та водяною парою в процесі відновлення.

45 Як зазначено вище, посудина 290 містить свіжий (невикористаний) газоподібний водень, а посудина 280 містить газоподібний водень, який вже був використаний на одному або декількох етапах відновлення і з того часу був зібраний в системі 200. Коли процес відновлення виконують вперше, використовують тільки свіжий газоподібний водень, що підводиться з посудини 290. У ході подальших процесів відновлення повторно використовують раніше використаний газоподібний водень з посудини 280, який при необхідності доповнюють свіжим газоподібним воднем з посудини 290.

55 На опціональній початковій стадії етапу попереднього нагрівання, на якій вводять газоподібний водень, що виконується без підведення тепла доти, поки тиск у просторі печі 120 не досягне приблизно 1 бар, клапани 2, 4-9, 11 і 13-14 закривають, а клапани 10 та 12 відкривають. Залежно від того, який газоподібний водень підлягає використанню – свіжий або повторно використовуваний – відкривають клапан V1 та/або V3.

60 Коли тиск всередині простору печі 120 досягне атмосферного тиску (приблизно 1 бар) або наблизиться до нього, включають нагрівальний елемент 121. Він переважно являє собою

нагрівальний елемент 121, що підводить вказане тепло в простір 120 печі шляхом нагрівання газоподібного водню, що подається, що в свою чергу нагріває матеріал в контейнері 140. Нагрівальний елемент 121 переважно розташований у місці, повз якого тече підведений в простір 120 печі газоподібний водень, внаслідок чого нагрівальний елемент 121 буде по суті занурений у знову підведений газоподібний водень (буде повністю або по суті повністю оточений ним) в ході процесу відновлення. Інакше кажучи, тепло можна переважно підводити безпосередньо в газоподібний водень, що одночасно підводиться в простір 120 печі. На Фіг. 1a і 1b представлений переважний варіант, в якому нагрівальний елемент 121 розташований у верхній частині простору 120 печі.

При цьому автор даного винаходу передбачає можливість підведення тепла в простір 120 печі іншими шляхами, наприклад, в газову суміш всередині простору 120 печі в місці, віддаленому від того, де газоподібний водень, що підводиться, надходить в простір 120 печі. В інших прикладах підведення тепла в газоподібний водень, що підводиться, може відбуватися в місці за межами простору 120 печі до впуску нагрітого таким чином газоподібного водню в простір 120 печі.

Протягом залишеної частини зазначеного етапу попереднього нагрівання, клапани 5 і 7-14 закриті, а клапанами 1-4 і 6 керує керуючий пристрій спільно з компресором 270 для забезпечення контрольованого підведення повторно використовуваного та/або свіжого газоподібного водню, як розкрито нижче.

Відповідно, керуючий пристрій 201 виконано з можливістю керування, в ході зазначеного етапу попереднього нагрівання, засобами 121, 280, 290 підведення тепла та водню для підведення тепла та газоподібного водню в простір 120 печі з можливістю нагрівання нагрітим газоподібним воднем завантаженого металевго матеріалу до температури вище температури кипіння, що міститься у металевому матеріалі води. В результаті відбувається випаровування зазначеної води, що міститься.

Протягом всього етапу попереднього нагрівання та етапу основного нагрівання (див. нижче) газоподібний водень подають повільно під управлінням керуючого пристрою 201. Результатом стане постійна наявність відносно повільного, але стійкого потоку газоподібного водню по вертикалі через завантажений матеріал. У більшості випадків керуючий пристрій виконано з можливістю постійного додавання газоподібного водню для підтримки кривої бажаного зростання (наприклад, монотонного зростання) тиску всередині простору печі 120 і, зокрема, врівноваження падіння тиску в нижніх частинах простору печі 120 (і в нижніх частинах теплообмінника 160) через постійну конденсацію водяної пари в теплообміннику 160 (див. нижче). Повне енергоспоживання залежить від ефективності теплообмінника 160 і, зокрема, від його здатності до передачі теплової енергії вхідному газоподібному водню і від гарячого газу, що тече через теплообмінник 160, і від теплоти конденсації водяної пари, що конденсується. Наприклад, у випадку  $Fe_2O_3$ , енергія, теоретично необхідна для нагрівання даного оксиду, теплової компенсації ендотермічної реакції та відновлення оксиду становить приблизно 250 кВт·г на 1000 кг  $Fe_2O_3$ . Для  $Fe_3O_4$  відповідне значення становить приблизно 260 кВт·г на 1000 кг  $Fe_3O_4$ .

Важливим аспектом даного винаходу є відсутність рециркуляції газоподібного водню в ході процесу відновлення. Загалом, про це йшлося вище, причому у прикладі на Фіг. 1a це означає, що газоподібний водень подають, наприклад, через компресор 270, по вхідному каналу 171 у верхню частину простору печі 121, де відбувається його нагрівання нагрівальним елементом 121, після чого він повільно проходить вниз, обтікаючи металевий матеріал, що підлягає відновленню, у контейнері 140, і далі вниз через теплообмінник 130 і в жолоб 161. При цьому відсутні будь-які отвори для виходу з простору печі 120 і, зокрема, з жолоба 161. Канал 173 закритий, наприклад, за рахунок того, що закриті клапани V10, V12, V13, V14. Відповідно, частина газоподібного водню, що подається, буде використана в процесі відновлення, а інша його частина підвищить тиск газу в просторі 120 печі. Цей процес триває до повного або бажаного відновлення металевго матеріалу, як буде розкрито нижче.

Відповідно, нагрітий газоподібний водень, що знаходиться в просторі 120 печі над завантаженим матеріалом у контейнері 140, буде, під дією повільного газоподібного водню, який подається, що утворює повільний низхідний потік газу, переміщений вниз на завантажений матеріал. Там він утворює газову суміш з водяною парою із завантаженого матеріалу (див. нижче).

Гаряча газова суміш, що утворилася в результаті, утворює потік газу в теплообмінник 160 і через нього. У теплообміннику 160 буде відбуватися теплообмін між гарячим газом, що надходить з простору печі 120, і холодним газоподібним воднем, який знову підводиться, що надходить з каналу 171, в результаті якого відбудеться попереднє нагрівання останнього

першим. Інакше кажучи, попереднє нагрівання газоподібного водню для підведення на етапах попереднього та основного нагрівання відбувається в теплообміннику 160.

5 Через охолодження потоку гарячого газу відбувається конденсація водяної пари, що міститься в газі, який охолоджується. В результаті даної конденсації відбувається утворення рідкої води, яку збирають у жолобі 161, а також теплоти конденсації. Теплообмінник 160 переважно також виконаний з можливістю передачі теплової енергії конденсації від водяного конденсату холодному газоподібному водню для підведення в простір 120 печі.

10 Конденсація водяної пари, що міститься, також буде знижувати тиск гарячого газу, поточного вниз з простору 120 печі, залишаючи простір для проходження додаткового гарячого газу вниз через теплообмінник 160.

15 Завдяки повільній подачі додаткового нагрітого газоподібного водню і відносно високої питомої теплопровідності газоподібного водню, в завантаженому матеріалі буде відносно швидко, наприклад, протягом 10 хвилин або швидше, досягнута точка кипіння рідкої води, що міститься в завантаженому матеріалі, яка на той час трохи перевищить 100 °С. В результаті буде відбуватися випаровування рідкої води, що міститься, з утворенням водяної пари, що змішується з гарячим газоподібним воднем.

20 Конденсація водяної пари в теплообміннику 160 знизить парціальний тиск водяної пари у нижнього кінця конструкції, через що утворювана в завантаженому матеріалі водяна пара буде в цілому текти вниз. Даний ефект також посилює той факт, що щільність водяної пари по суті нижча за щільність газоподібного водню, з яким вона змішується.

Так вода, що міститься в завантаженому матеріалі в контейнері 140, поступово переходить в пар, який буде текти вниз через теплообмінник 160 з охолодженням і конденсацією в ньому до рідкого стану, в якому він потрапляє в жолоб 161.

25 У теплообмінник 160 переважно подають холодний газоподібний водень кімнатної температури або температури трохи нижче кімнатної.

30 Слід розуміти, що даний етап попереднього нагрівання, на якому відбувається осушення завантаженого матеріалу від рідкої води, що міститься в ньому, є переважним етапом запропонованого способу. Зокрема, завдяки йому завантажуваний матеріал можна виробляти і подавати у вигляді гранульованого матеріалу, наприклад, у вигляді котунів матеріалу, без необхідності введення дорогого і ускладнюючого етапу осушення перед завантаженням матеріалу в простір 120 печі.

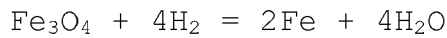
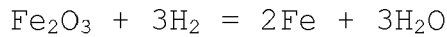
35 При цьому слід розуміти, що можна завантажувати сухий або осушений матеріал в простір 120 печі. У даному випадку розкритий у даній заявці етап попереднього нагрівання не виконують і переходять відразу до етапу основного нагрівання (див. нижче) способу.

40 В одному варіанті здійснення даного винаходу підведення газоподібного водню в простір 120 печі в ході зазначеного етапу попереднього нагрівання регулюють таким чином, щоб він був досить повільним для підтримки по суті рівноваги тисків від початку до кінця виконання етапу попереднього нагрівання, переважно таким чином, щоб переважний тиск на всьому протязі простору 120 печі та ненаповнених рідиною частин жолоба 161 завжди було по суті рівним. Зокрема, подачу газоподібного водню можна регулювати так, щоб зазначений рівноважний тиск газу не зростав або зростав лише незначно на етапі попереднього нагрівання. В даному випадку, подачу газоподібного водню регулюють так, щоб тиск у просторі печі 120 зростав з часом тільки після того, як відбудеться випаровування всієї або по суті всієї рідкої води із завантаженого матеріалу в контейнері 140. Момент часу, в який це сталося, можна визначати, наприклад, по висхідній зміні нахилу кривої "температура – час" згідно з вимірами датчика 123 та/або 124 температури, причому зміна нахилу вказує момент, в якій відбулося випаровування по суті всієї рідкої води, але відновлення ще не почалося. Альтернативно, подачу газоподібного водню можна регулювати так, щоб підвищити тиск, як тільки вимірювана датчиком 123 і/або 124 температура температура в просторі печі 120 перевищить попередньо задану межу, яка може становити від 100 °С до 150 °С, наприклад, від 120 °С до 130 °С.

50 На наступному етапі основного нагрівання продовжують підводити тепло і газоподібний водень у простір 120 печі в порядку, відповідному подачі на розкритому вище етапі попереднього нагрівання, для нагрівання нагрітим газоподібним воднем завантаженого металевго матеріалу до температури, достатньо високої для відновлення присутніх у металевому матеріалі оксидів металів, що, в свою чергу, призводить до утворення водяної пари.

55 У ході даного етапу основного нагрівання здійснюють подачу та нагрівання додаткового газоподібного водню з поступовим зростанням тиску всередині простору 120 печі, внаслідок чого відбувається нагрівання завантаженого металевго матеріалу до температури виникнення та підтримки хімічної реакції відновлення.

У прикладі Фіг. 1a і 1b спочатку відбудеться нагрівання найвищого завантаженого матеріалу. Якщо матеріал являє собою оксид заліза, газоподібний водень почне відновлювати завантажений матеріал до металевого заліза при температурі приблизно 350-400 °C з утворенням піролітичного заліза і водяної пари згідно з наступними формулами:



Дана реакція є ендотермічною та обумовлена подачею теплової енергії за допомогою гарячого газоподібного водню, що тече зверху вниз у просторі 120 печі.

Таким чином, утворення водяної пари в завантаженому матеріалі відбувається і на етапі попереднього нагрівання, і на етапі основного нагрівання. У конденсаторі, розташованому під завантаженим металевим матеріалом, відбувається безперервна конденсація і збирання водяної пари, що утворюється. У прикладі Фіг. 1a конденсатор виконаний у вигляді теплообмінника 160.

Згідно винаходу, етап основного нагрівання, на якому відбувається зазначена конденсація, виконують до тих пір, поки в просторі печі 120 не буде досягнуто надлишковий відносно атмосферного тиск. Наприклад, тиск може вимірювати датчик 123 та/або 124 тиску. Як сказано вище, згідно винаходу, з простору печі 120 не відкачують газоподібний водень доти, поки не буде досягнуто зазначений надлишковий тиск, при цьому з простору печі 120 переважно не відкачують газоподібний водень доти, поки етап основного нагрівання не буде повністю завершений.

Більш переважно, подачу газоподібного водню на етапі основного нагрівання і конденсацію водяної пари здійснюють доти, поки в просторі 120 печі не буде досягнуто попередньо заданий надлишковий тиск, що становить щонайменше 4 бар, переважно щонайменше 8 бар або навіть приблизно 10 бар у абсолютних величинах.

Альтернативно, подачу газоподібного водню на етапі основного нагрівання і конденсацію водяної пари можна здійснювати доти, поки не буде досягнуто стаціонарний стан з точки зору відсутності подальшої необхідності підведення додаткового газоподібного водню для підтримки досягнутого стаціонарного тиску газу всередині 120 простору печі. Даний тиск можна вимірювати відповідним чином, як розкрито вище. Переважно, стаціонарний тиск газу може становити щонайменше 4 бар, більш переважно щонайменше 8 бар або приблизно 10 бар. Це забезпечує простий шлях визначення того, чи завершено процес відновлення.

Альтернативно, подачу газоподібного водню і тепла на етапі основного нагрівання, а також конденсацію водяної пари, можна здійснювати доти, поки не буде досягнуто попередньо задана температура завантаженого металевого матеріалу, що підлягає відновленню, яка може становити щонайменше 600 °C, наприклад, від 640 до 680 °C, переважно приблизно 660 °C. Температуру завантаженого матеріалу можна вимірювати безпосередньо, наприклад, шляхом вимірювання теплового випромінювання від завантаженого матеріалу за допомогою відповідного датчика або опосередковано датчиком 123.

У деяких варіантах здійснення етап основного нагрівання, в тому числі - зазначену конденсацію водяної пари, що утворюється, здійснюють протягом безперервного період часу тривалістю щонайменше 0,25 години, наприклад, щонайменше 0,5 години, наприклад, щонайменше 1 годину. Протягом усього часу тиск і температура в просторі 120 печі можуть монотонно зростати.

У деяких варіантах здійснення етап основного нагрівання можна також виконувати циклічно, при цьому в кожному циклі керуючий пристрій 201 чекає, поки не буде досягнуто стаціонарний тиск усередині простору печі 120 перед тим, як здійснити подачу додаткової кількості газоподібного водню в простір печі. Підведення тепла також може бути циклічним (імпульсним) або перебуває у включеному стані протягом всього етапу основного нагрівання.

Слід зазначити, що і під час виконання етапу попереднього нагріву, і під час виконання етапів основного нагріву, зокрема щонайменше протягом суті всієї тривалості зазначених етапів, має місце низхідний чистий потік водяної пари через завантажений металевий матеріал у контейнері 140.

На етапах попереднього та основного нагрівання керуючий пристрій 201 керує компресором 270 для постійної підтримки або підвищення тиску шляхом подачі додаткового газоподібного водню. Даний газоподібний водень служить для заповнення водню, використаного в процесі відновлення, а також поступового підвищення тиску до бажаного кінцевого тиску.

Утворення водяної пари в завантаженому матеріалі локально підвищує тиск газу, фактично утворюючи різницю тисків між простором 120 печі і жолобом 161. Як наслідок, водяна пара, що утворюється, буде проходити вниз через завантажений матеріал і конденсуватися в теплообміннику 160, в свою чергу знижуючи тиск на дальній (відносно простору 120 печі)

стороні теплообмінника 160. Зазначені процеси створюють низхідне результуюче переміщення газу через шихту, причому газоподібний водень, що знову додається, компенсує втрату тиску в просторі 120 печі.

5 У теплообміннику 160 відбувається передача тепла, що міститься в витікаючому з простору 120 печі газі, і, зокрема, теплоти конденсації водяної пари, газоподібному водню, що входить.

Відповідно, даний процес підтримують до тих пір, поки є металевий матеріал, що підлягає відновленню і, як наслідок, відбувається утворення водяної пари, що породжує зазначене низхідне переміщення газу. Як тільки утворення водяної пари припиниться (через те, що по суті весь металевий матеріал буде відновлено), відбудеться вирівнювання тиску по всьому внутрішньому простору печі 100, при цьому вимірювана температура буде однорідною по всьому простору печі 120. Наприклад, виміряна різниця тисків між будь-якою точкою в наповненій газом частини жолоба 161 і будь-якою точкою над завантаженим матеріалом буде менше попередньо заданої величини, яка може становити не більше 0,1 бар. Додатково або альтернативно, виміряна різниця температур між будь-якою точкою над завантаженим матеріалом і будь-якою точкою під завантаженим матеріалом, за винятком сторони теплообмінника біля простору 120 печі, буде менше попередньо заданої величини, яка може становити не більше 20 °С. Отже, коли така однорідність тиску та/або температури буде досягнута та виміряна, виконання етапу основного нагрівання можна завершити шляхом припинення подачі газоподібного водню та вимкнення нагрівального елемента 121.

20 Таким чином, етап основного нагрівання можна здійснювати до тих пір, поки не буде досягнуто попередньо задана мінімальна температура та/або тиск, і/або до тих пір, поки не буде досягнуто попередньо задана максимальна різниця температур та/або максимальна різниця тисків в об'ємі печі 100, що нагрівається. Вибір критерію (критеріїв) для використання залежить від попередніх умов, наприклад, конструкції печі 100 і типу металевого матеріалу, що підлягає відновленню. Також можливе використання інших критеріїв, таких як попередньо задана тривалість основного нагрівання або завершення попередньо заданої програми подачі тепла/водню, які, у свою чергу, можуть бути визначені емпірично.

На наступному етапі охолодження водневу атмосферу в просторі печі 120 охолоджують до температури не вище 100 °С, переважно приблизно 50 °С, а потім відкачують з простору печі 30 120 і збирають.

У разі єдиної печі 100/220, не з'єднаної з однією або декількома печами, завантажений матеріал можна охолоджувати за допомогою вентилятора 250, розташованого нижче по потоку від холодильника 240 газоводяного типу, у свою чергу виконаного з можливістю охолодження газоподібного водню (переміщуваного по замку 250 в контурі через клапан V12, теплообмінник 35 240, вентилятор 250 і клапан V10, що виходить з простору 120 печі вихідного каналу 173 і знову надходить в простір печі 120 по вхідному каналу 171). Дана циркуляція для охолодження показана стрілками Фіг. 1b.

Таким чином, теплообмінник 240 здійснює передачу теплової енергії від циркулюючого газоподібного водню воді (або іншій рідині), теплову енергію з якої можна утилізувати відповідним чином, наприклад, в системі централізованого тепlopостачання. Замкнений контур створюють шляхом закриття всіх клапанів V1-V14, крім клапанів V10 та V12.

Оскільки в даному випадку циркулюючий газоподібний водень обтікає завантажений матеріал у контейнері 140, він поглинає теплову енергію із завантаженого матеріалу, забезпечуючи ефективно охолодження завантаженого матеріалу в ході циркуляції 45 газоподібного водню за замкненим контуром.

В іншому прикладі теплову енергію, яку можна отримати при охолодженні печі 100/220, використовують для попереднього нагрівання іншої печі 210. Це досягається за рахунок того, що керуючий пристрій 201, на відміну від розкритого замкнутого вище контуру охолодження, закриває клапан V12 і відкриває замість нього клапани V13, V14. Завдяки цьому відбувається 50 відбір гарячого газоподібного водню, що надходить з печі 220, теплообмінник 230 газо-газового типу, переважно являє собою протиточний теплообмінник, причому попереднє нагрівання газоподібного водню, що подається на етапі попереднього нагрівання або на етапі основного нагрівання для іншої печі 210, проходить в теплообміннику 230. Далі можна здійснювати циркуляцію в деякій мірі охолодженого газоподібного водню з печі 220 через теплообмінник 240 55 для додаткового охолодження перед повторним введенням у піч 220. Як і в попередньому випадку, газоподібний водень з печі 220 переміщують по замкнутому контуру за допомогою вентилятора 250.

Таким чином, охолодження газоподібного водню на етапі охолодження може відбуватися за рахунок теплообміну з газоподібним воднем, призначеним для подачі в простір 120 іншої печі 60 210 для виконання етапів попереднього та основного нагріву та конденсації, як розкрито вище

стосовно простору 120 іншої печі 210.

5 Як тільки газоподібний водень стане недостатньо гарячим для нагрівання газоподібного водню, що подається в піч 210, керуючий пристрій 201 знову закриває клапани V13, V14 і відкриває клапан V12 для відбору газоподібного водню з печі 220 безпосередньо в теплообмінник 240.

10 Незалежно від шляху утилізації його теплової енергії, газоподібний водень з печі 220 охолоджують доти, поки його температура (або, що більш важливо, температура завантаженого матеріалу) не впаде нижче 100 °С, щоб уникнути повторного окислення завантаженого матеріалу при дії на останній повітря. Температуру завантаженого матеріалу можна вимірювати безпосередньо відповідним чином, наприклад, як розкрито вище, або опосередковано шляхом вимірювання відповідним чином температури газоподібного водню, що виходить вихідним каналом 173.

15 Охолодження газоподібного водню може відбуватися з одночасним підтриманням надлишкового тиску газоподібного водню, або тиск газоподібного водню може впасти через те, що гарячий газоподібний водень зможе зайняти більший об'єм (каналів і теплообмінників замкнутого контуру), як тільки будуть відкриті клапани V10 і V12.

20 На наступному етапі газоподібний водень відкачують з простору 120 печі 220 і збирають у посудині 280. Відкачування можна здійснювати за допомогою вакуумного насоса 260, можливо – у комбінації з компресором 270, причому керуючий пристрій відкриває клапани V3, V5, V6, V8, V10 і V12, закриває залишені клапани, і приводить в дію вакуумний насос 260 і компресор 270 для переміщення охолодженого газоподібного водню в посудину 280 використаного газоподібного водню. Відкачування переважно здійснюють доти, поки всередині простору 120 печі не буде визначено тиск не вище 0,5 бар або навіть не вище 0,3 бар.

25 Тому що простір 120 печі є закритим, газоподібний водень, вилучений із системи, являє собою тільки той, що був використаний у хімічній реакції відновлення, а залишений газоподібний водень – це той, що був необхідний для підтримки балансу газоподібного водню/водяної пари у просторі 120 печі на етапі основного нагрівання. Відкачаний газоподібний водень повністю придатний для порційної переробки нової шихти, металевого матеріалу, що підлягає відновленню.

30 На наступному етапі простір 120 печі відкривають, наприклад, шляхом розблокування кріпильних засобів 111 і відкриття верхньої частини 110. Контейнер 140 видаляють і замінюють контейнером з новою порцією завантаженого металевого матеріалу, що підлягає відновленню.

35 На наступному етапі видалений відновлений матеріал може бути поміщений в інертну атмосферу, наприклад, азотну атмосферу, щоб уникнути повторного окислення при транспортуванні і зберіганні.

40 Наприклад, відновлений металевий матеріал можна помістити в м'який або жорсткий транспортний контейнер, заповнений інертним газом. Декілька таких м'яких або жорстких контейнерів можна помістити в транспортний контейнер з наступним заповненням його простору навколо м'яких або жорстких контейнерів інертним газом. Відновлений металевий матеріал можна транспортувати без ризику повторного окислення.

У наведеній нижче таблиці представлено приблизну рівновагу між газоподібним воднем H<sub>2</sub> і водяною парою H<sub>2</sub>O при різних температурах всередині простору 120 печі:

Температура (°C):	400	450	500	550	600
H <sub>2</sub> (% об.):	95	87	82	78	76
H <sub>2</sub> O (% об.):	5	13	18	22	24

45 Під атмосферним тиском, приблизно 417 м<sup>3</sup> газоподібного водню H<sub>2</sub> необхідно для відновлення 1000 кг Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, і приблизно 383 м<sup>3</sup> газоподібного водню H<sub>2</sub> необхідно для відновлення 1000 кг Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

50 Нижче в таблиці зазначено кількість газоподібного водню, необхідну для відновлення 1000 кг Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> відповідно під атмосферним тиском та у відкритій (відомій) системі, але при різних температурах:

Температура (°C):	400	450	500	550	600
Hm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /тонна Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	8340	3208	2317	1895	1738
Hm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /тонна Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> :	7660	2946	2128	1741	1596

Нижче в таблиці зазначено кількість газоподібного водню, необхідну для відновлення 1000

кг Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> відповідно під різними тисками і при різних температурах:

Температура (°C):	400	450	500	550	600
<b>Нм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/тонна Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:</b>					
1 бар	8340	3208	2317	1895	1738
2 бар	4170	1604	1158	948	869
3 бар	2780	1069	772	632	579
4 бар	2085	802	579	474	434
5 бар	1668	642	463	379	348
6 бар	1390	535	386	316	290
<b>Нм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/тонна Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:</b>					
1 бар	7660	2946	2128	1741	1596
2 бар	3830	1473	1064	870	798
3 бар	2553	982	709	580	532
4 бар	1915	737	532	435	399
5 бар	1532	589	426	348	319
6 бар	1277	491	355	290	266

5 Як розкрито вище, етап основного нагрівання згідно з даним винаходом переважно виконують до досягнення високого тиску та високої температури. Було встановлено, що протягом більшої частини етапу основного нагрівання переважно використовувати комбінацію температури нагрітого газоподібного водню щонайменше 500 °C і тиску в просторі печі 120 щонайменше 5 бар.

10 Вище були розкриті варіанти здійснення. При цьому фахівцю буде зрозуміло, що у розкриті варіанти здійснення можуть бути внесені зміни без відступу від основної ідеї винаходу.

Наприклад, піч 100 може мати інші геометричні параметри, залежно від заданих попередніх умов.

15 Теплообмінник 160 розкрито у вигляді трубчастого теплообмінника. Було встановлено, що цей тип є особливо доцільним, проте слід розуміти, що можливе використання газогазових теплообмінників/конденсаторів інших типів. Теплообмінник 240 може мати будь-яку відповідну конфігурацію.

Надлишкове тепло від газоподібного водню, що охолоджується, також можна використовувати в інших процесах, де потрібна теплова енергія.

20 Як металевий матеріал, що підлягає відновленню, в розкритті зазначені оксиди заліза. При цьому запропоновані спосіб і система також можуть знайти застосування для відновлення таких металевих матеріалів, як зазначені вище оксиди металів, наприклад, Zn і Pb, пароутворення в яких відбувається при температурах нижче приблизно 600 °C.

25 Запропоновані принципи прямого відновлення також можна використовувати для металевих матеріалів, температури відновлення яких вищі, ніж для залізної руди, з відповідними доробками конструкції печі 100, наприклад, частини конструкційних матеріалів, що використовуються.

Таким чином, винахід не обмежено розкритими варіантами здійснення і в нього можуть бути внесені зміни без відступу від обсягу формули винаходу, що додається.

### 30 ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб отримання прямих відновленого металевого матеріалу, що включає в себе етапи, на яких:

35 а) завантажують металевий матеріал, що підлягає відновленню, в простір (120) печі;

б) відкачують існуючу атмосферу з простору (120) печі для утворення розрідження всередині простору (120) печі;

40 в) підводять, на етапі основного нагрівання, тепло і газоподібний водень у простір (120) печі для нагрівання нагрітим газоподібним воднем завантаженого металевого матеріалу до температури, достатньо високої для відновлення присутніх у металевому матеріалі оксидів металів, що, у свою чергу, приводить до утворення водяної пари; і

д) здійснюють конденсацію і збирання водяної пари, що утворилася на етапі в), в конденсаторі (160) під завантаженим металевим матеріалом;

45 який **відрізняється** тим, що зазначений газоподібний водень на етапі в) підводять без рециркуляції газоподібного водню, причому спосіб додатково включає наступний етап, на якому вилучають відновлений металевий матеріал з простору (120) печі і зберігають і/або

транспортують відновлений металевий матеріал в інертній атмосфері.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що етапи с) і d) виконують щонайменше доти, доки всередині простору (120) печі не буде досягнуто надлишковий тиск водневої атмосфери, причому з простору (120) печі не відкачують газоподібний водень доти, доки не буде досягнуто
- 5 зазначений надлишковий тиск.
3. Спосіб за п. 1 або 2, який **відрізняється** тим, що кількість матеріалу, що завантажується на етапі а), становить не більше 50 тонн, переважно не більше 25 тонн, переважно від 5 до 10 тонн такого матеріалу.
4. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що етапи а)-d) способу
- 10 виконують у системі (200), передбаченій безпосередньо на рудниковому майданчику, причому зазначені етапи виконують для отримання прямовідновленого металевого матеріалу на зазначеному рудниковому майданчику, після чого його упаковують у захисній атмосфері і далі транспортують на інший об'єкт для подальшої переробки.
5. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що додатково включає
- 15 етап, на якому, після етапу d), охолоджують завантажений матеріал шляхом циркуляції зазначеного газоподібного водню через завантажений матеріал, причому відбувається нагрівання газоподібного водню завантаженим матеріалом і його охолодження шляхом теплообміну за допомогою теплообмінника.
6. Спосіб за п. 5, який **відрізняється** тим, що завантажений матеріал охолоджують доти, доки
- 20 температура завантаженого матеріалу не досягне температури нижче 100 °С.
7. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що зазначена інертна атмосфера являє собою азотну атмосферу.
8. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що спосіб додатково
- 25 включає етап, на якому відновлений металевий матеріал поміщають в перший транспортний контейнер, заповнений інертним газом, причому кілька таких перших транспортних контейнерів поміщають в другий транспортний контейнер, простір в якому навколо зазначених перших транспортних контейнерів, в свою чергу, заповнюють інертним газом.
9. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що етап с) додатково
- 30 містить, на етапі попереднього нагрівання, підведення тепла і газоподібного водню в простір (120) печі для нагрівання нагрітим газоподібним воднем завантаженого металевого матеріалу до температури вище температури кипіння води, що міститься в металевому матеріалі, в результаті чого відбувається випаровування зазначеної води, що міститься.
10. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що газоподібний водень
- 35 для підведення на етапі с) попередньо нагрівають у теплообміннику (160), причому теплообмінник (160) виконаний з можливістю передачі теплової енергії від водяної пари газоподібному водню, призначеному для підведення на етапі с).
11. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів який **відрізняється** тим, що етап основного нагрівання на етапі с) і конденсацію на етапі d) здійснюють доти, доки не буде досягнуто
- 40 попередньо заданий тиск.
12. Спосіб за будь-яким з пп. 1-10, який **відрізняється** тим, що етап основного нагрівання на етапі с) та конденсацію на етапі d) здійснюють доти, доки не буде досягнуто стаціонарний стан з точки зору відсутності подальшої необхідності підведення додаткового газоподібного водню для підтримки досягнутого стаціонарного тиску газу всередині простору (120) печі.
13. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що етап основного
- 45 нагрівання на етапі с) і конденсацію на етапі d) здійснюють доти, доки не буде досягнуто попередньо задана температура завантаженого металевого матеріалу, що підлягає відновленню.
14. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що під час виконання етапу с) має місце низхідний чистий потік водяної пари через завантажений металевий
- 50 матеріал.
15. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що спосіб додатково включає в себе етапи, на яких:
- е) після завершення етапів с) та d) охолоджують водневу атмосферу до температури не вище 100 °С; і
- 55 ф) після завершення етапу е) відкачують водневу атмосферу з простору (120) печі і збирають газоподібний водень відкачаної водневої атмосфери.
16. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що етапи с) та d) виконують протягом щонайменше 0,25 години.

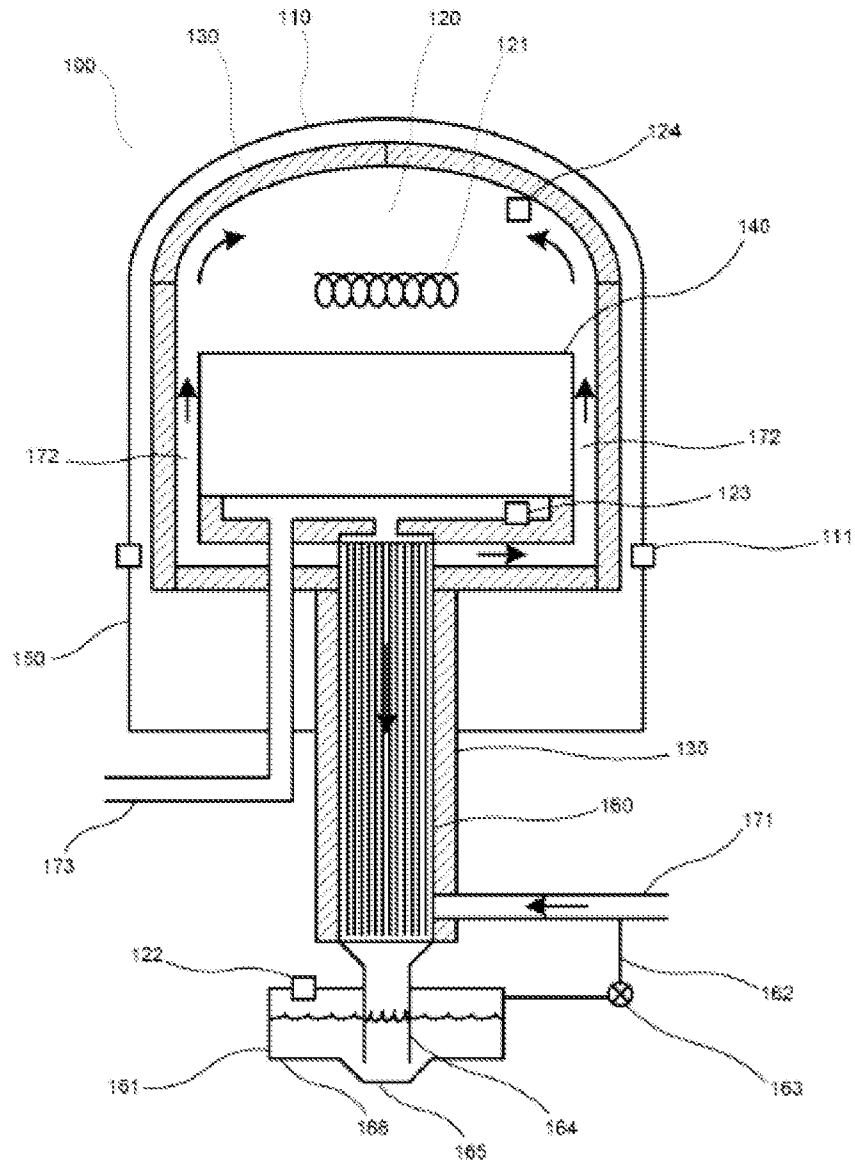


Fig. 1A

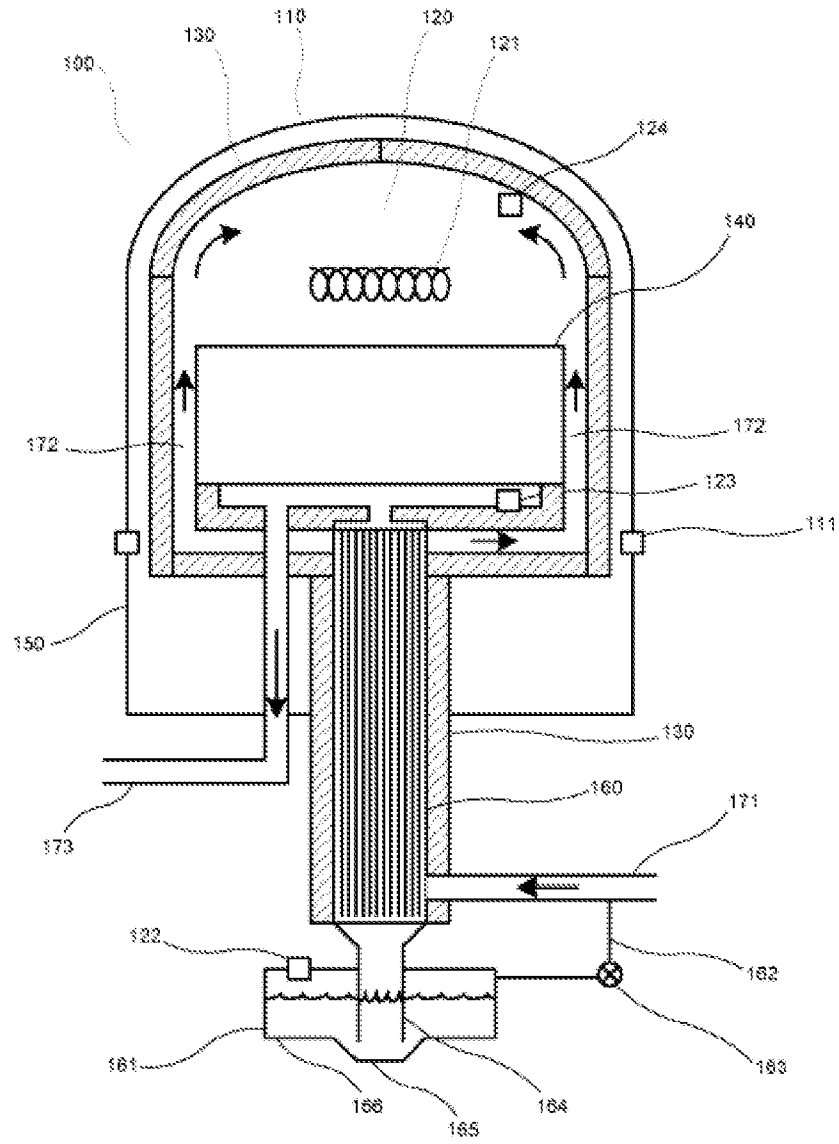


Fig. 1B

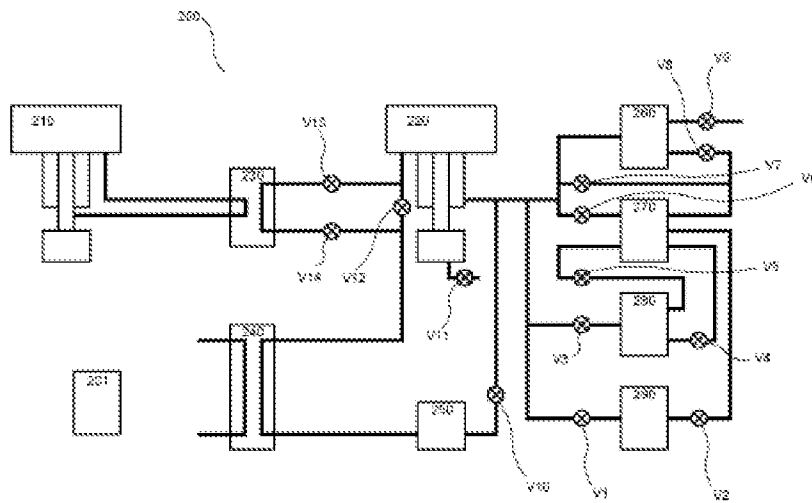
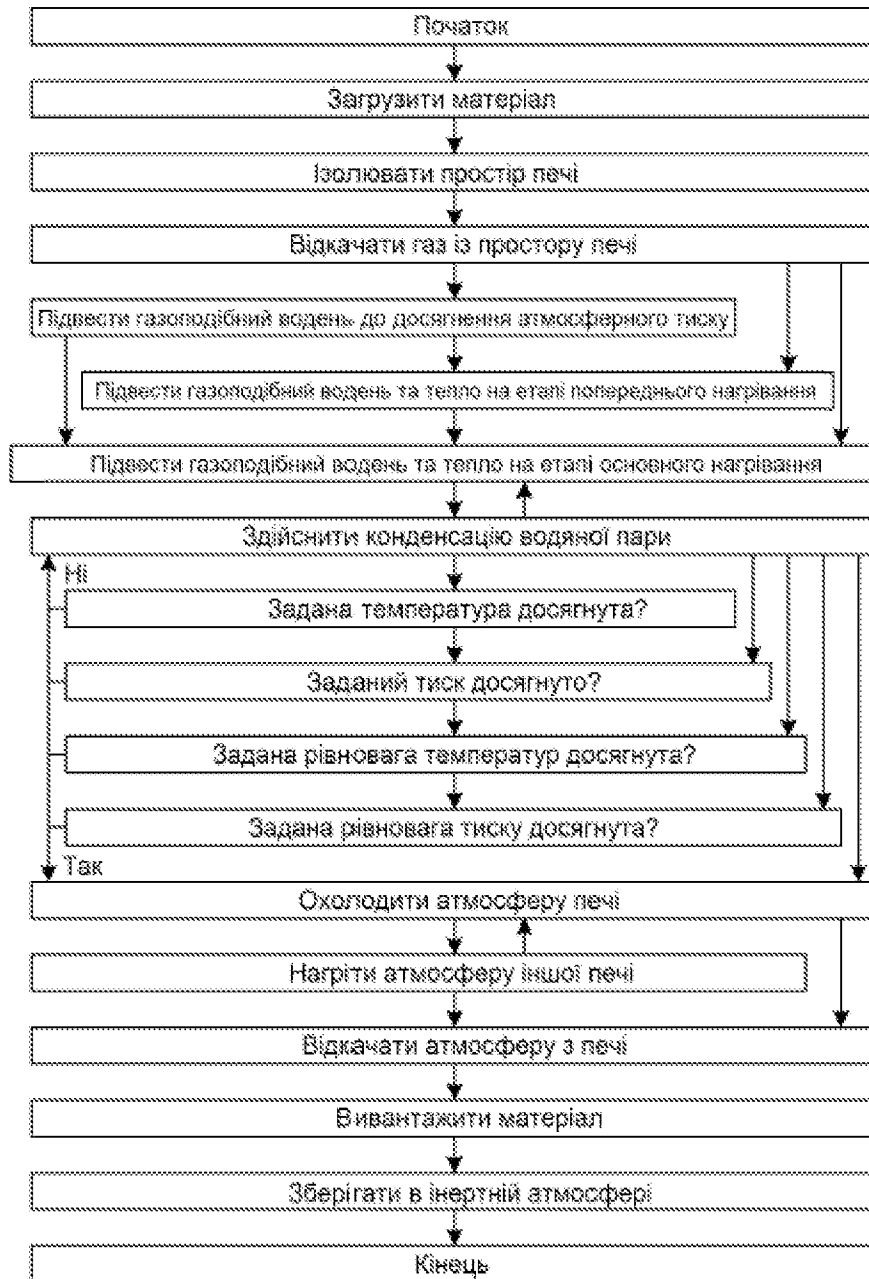
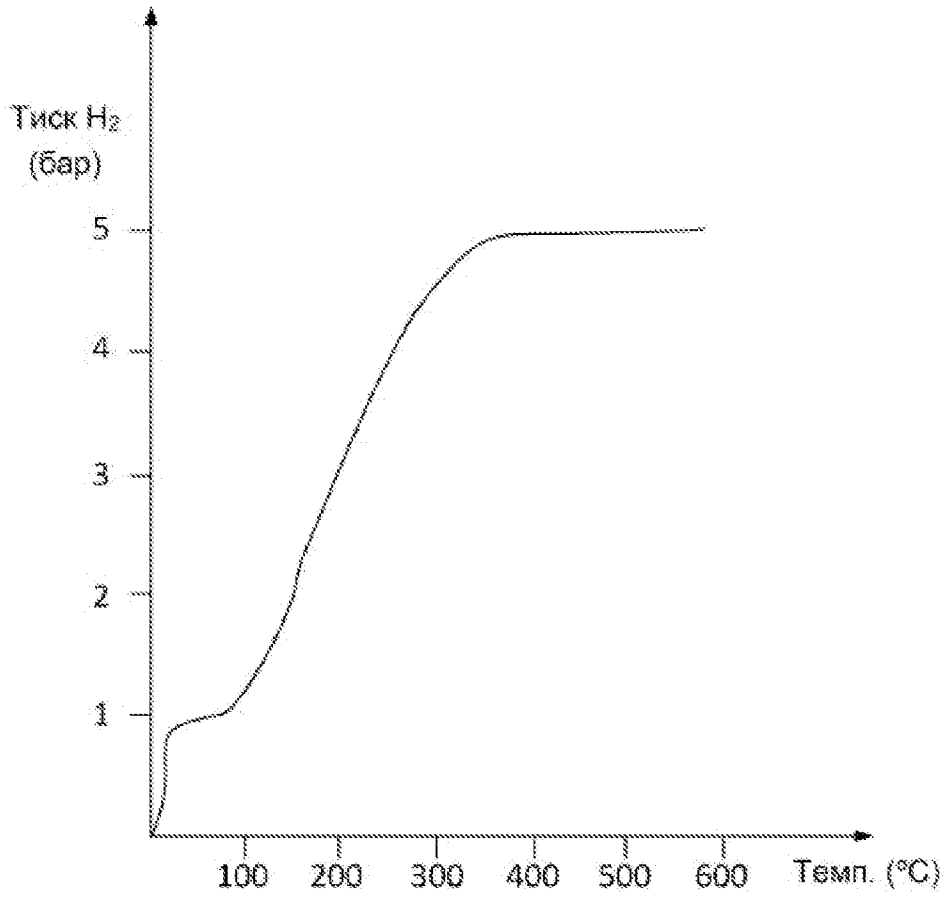


Fig. 2



Фіг. 3



Фиг. 4