



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **129334** (13) **C2**  
(51) МПК

**C22B 5/12** (2006.01)  
**C21B 13/10** (2006.01)  
**C23C 8/20** (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>a 2022 01319</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>22.09.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>20.03.2025</b></p> <p>(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>1951070-0</b></p> <p>(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>23.09.2019</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>18.05.2022, Бюл.№ 20</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>19.03.2025, Бюл.№ 12</b></p> <p>(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ: <b>PCT/SE2020/050885, 22.09.2020</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Мюрей Ганс Е.Г. (SE)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці): <b>ГРІНАЙРОН Н2 АБ,</b> Edsängsvägen 5B, 192 54 Sollentuna, Sweden (SE)</p> <p>(74) Представник: <b>Петошевіч Діна Анатоліївна, реєстр. №284</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: US 3964898 A, 22.06.1976 US 5542963 A, 06.08.1996 SE 382078 B, 12.01.1976 JP H04254796 A, 10.09.1992 US 2001/003930 A1, 21.06.2001 US 2002/007699 A1, 24.01.2002 WO 2012/091422 A2, 05.07.2012 US 2016/017445 A1, 21.01.2016 CN 207130292 U, 23.03.2018 UA 111620 C2, 25.05.2016</p>
---	--

## (54) СПОСІБ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПРЯМОВІДНОВЛЕНОГО, НАВУГЛЕЦЬОВАНОГО МЕТАЛУ

### (57) Реферат:

Спосіб отримання прямовідновленого металевго матеріалу, який включає стадії:

- завантаження металевго матеріалу, що підлягає відновленню, в простір печі (120);
  - видалення існуючої атмосфери з простору печі для досягнення тиску газу менше 1 бар;
  - подача теплоти та газоподібного водню в простір печі, так що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, достатньо високої, так що оксиди металів, присутні в металевому матеріалі, відновлюються, в свою чергу, що приводить до утворення водяної пари, причому подача газоподібного водню виконується таким чином, що тиск більше 1 бар накопичується всередині простору печі; і
  - перед видаленням накопиченого надлишкового тиску, конденсації та збору водяної пари, утвореної на стадії с) в конденсаторі (160) нижче завантаженого металевго матеріалу.
- Винахід відрізняється тим, що він додатково включає стадію е) перед вакуумуванням наросту надлишкового тиску, забезпечуючи вуглецевмісний газ у простір печі, так що нагрітий і відновлений металевий матеріал вуглецюється вказаним вуглецевмісним газом.
- Цей винахід також стосується системи.

UA 129334 C2

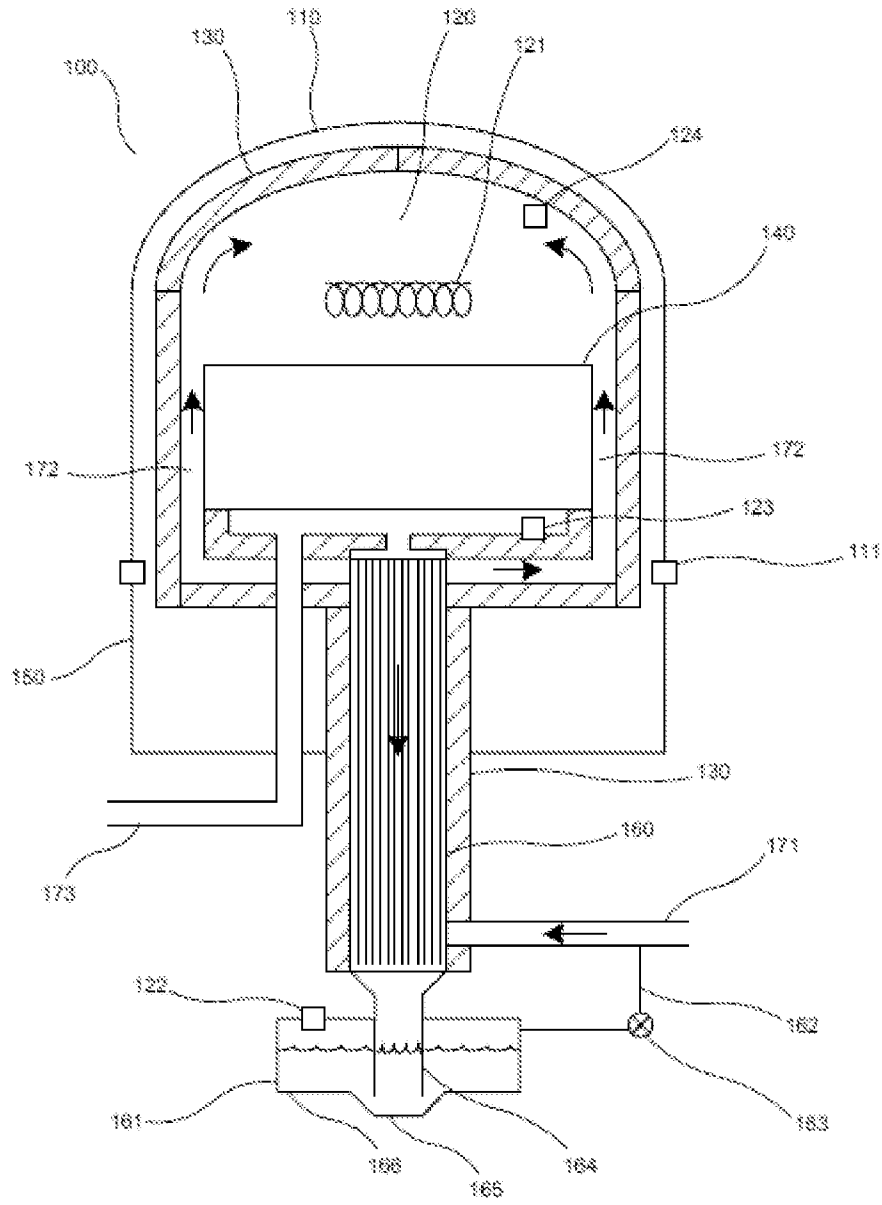


Fig. 1a

Цей винахід стосується способу і пристрою для отримання пряминовідновленого і науглецьованого металу, і, зокрема, пряминовідновленого заліза (також відомого як губчасте залізо), яке також є науглецьованим. Зокрема, даний винахід стосується прямого відновлення металеві руди в контрольованій атмосфері водню для отримання такого пряминовідновленого металу, а також постачання вуглецевмісного газу як частини того ж самого способу вуглецювання відновленого металевого матеріалу.

Виробництво пряминовідновленого металу з використанням водню як відновника як таке є загальновідомим. Наприклад, в SE7406174-8 і SE7406175-5 описані способи, в яких завантаження металеві руди піддають водневій атмосфері, що протікає повз завантаження, яке в результаті відновлюється з утворенням пряминовідновленого металу.

Крім того, у шведській заявці SE 1950403-4, яка не була опублікована на дату пріоритету цієї заявки, розкрито процес прямого відновлення металевого матеріалу в закритій атмосфері водню.

Цей винахід особливо застосовний у випадку порційного завантаження та обробки матеріалу, що підлягає відновленню та вуглецюванню.

Існує кілька проблем з рівнем техніки, включаючи ефективність щодо теплових втрат, а також використання газоподібного водню. Існує також проблема керування, оскільки необхідно оцінити, коли процес відновлення був завершений.

Крім того, відомі способи вуглецювання металевого матеріалу включають використання монооксиду вуглецю як джерела вуглецю для вуглецювання. Це призводить до утворення та виділення діоксиду вуглецю, а також, як правило, до утворення монооксиду вуглецю.

Отже, було б бажаним досягти термічно- та енергоефективного методу прямого відновлення та вуглецювання металевого матеріалу, який не призводить до виділення в атмосферу монооксиду або діоксиду вуглецю.

Цей винахід вирішує описані вище проблеми.

Отже, цей винахід стосується способу отримання пряминовідновленого металевого матеріалу, що включає стадії: а) завантаження в простір печі металевого матеріалу що підлягає відновленню; б) видалення існуючої атмосфери з простору печі таким чином, щоб досягти тиску газу менше 1 бар всередині простору печі; с) подачі тепла та газоподібного водню в простір печі, так що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, достатньо високої для відновлення оксидів металів, присутніх в металевому матеріалі, викликаючи, в свою чергу, утворення водяної пари; де подачу газоподібного водню здійснюють таким чином, що всередині простору печі накопичується тиск більше 1 бар; і d) конденсації та збирання водяної пари, утвореної на стадії с) в конденсаторі нижче завантаженого металевого матеріалу, перед видаленням газів з простору печі назад до атмосферного тиску; де спосіб характеризується тим, що цей спосіб додатково включає стадію е) подачі вуглецевмісного газу до простору печі, перед видаленням газів з простору печі назад до атмосферного тиску, так що нагрітий і відновлений металевий матеріал вуглецюється вказаним вуглецевмісним газом.

Винахід також стосується системи для отримання пряминовідновленого металевого матеріалу, яка включає закритий простір печі, виконаний з можливістю прийому завантаженого металевого матеріалу, що підлягає відновленню; засіб для видалення атмосфери, виконаний з можливістю видалення існуючої атмосфери з простору печі таким чином, щоб досягти тиску газу менше 1 бар всередині простору печі; засіб для подачі теплоти і водню, виконаний з можливістю подачі теплоти і газоподібного водню до простору печі; пристрій керування, виконаний з можливістю керування засобами подачі теплоти і водню таким чином, щоб нагрітий газоподібний водень нагрівав завантажений металевий матеріал до температури, достатньо високої для відновлення оксидів металів, присутніх в металевому матеріалі, в свою чергу, призводячи до утворення водяної пари, де подачу газоподібного водню здійснюють таким чином, що всередині простору печі накопичується тиск більше 1 бар; і засіб охолодження та збирання, розташований під завантаженим металевим матеріалом, виконаний з можливістю конденсації та збирання водяної пари перед видаленням газів з простору печі назад до атмосферного тиску, де система характеризується тим, що вказана система додатково містить засіб подачі вуглецевмісного газу, виконаний з можливістю подачі вуглецевмісного газу до простору печі, а також тим, що при цьому пристрій керування виконаний з можливістю керування засобом подачі вуглецевмісного газу для подачі вуглецевмісного газу перед видаленням газів з простору печі назад до атмосферного тиску, так що нагрітий і відновлений металевий матеріал вуглецюється вказаним вуглецевмісним газом.

Нижче винахід буде описаний детально, з посиланням на ілюстративні втілення цього винаходу та на включені креслення, в яких:

Фігура 1a є поперечним перерізом спрощеної печі для використання в системі згідно з даним винаходом під час першого робочого стану;

Фігура 1b є поперечним перерізом спрощеної печі з Фігури 1a, під час другого робочого стану;

5 Фігура 2 є схематичним оглядом системи відповідно до даного винаходу;

Фігура 3 є блок-схемою способу відповідно до даного винаходу;

Фігура 4a є схематичною діаграмою, яка показує можливий зв'язок між парціальним тиском  $H_2$ , парціальним тиском вуглецювального газу та температурою в нагрітому просторі печі відповідно до першого втілення даного винаходу;

10 Фігура 4b є схематичною діаграмою, що показує можливий зв'язок між парціальним тиском  $H_2$ , парціальним тиском вуглецювального газу та температурою в нагрітому просторі печі відповідно до другого втілення даного винаходу;

Фігура 4a є схематичною діаграмою, яка показує можливий зв'язок між парціальним тиском  $H_2$ , парціальним тиском вуглецювального газу та температурою в нагрітому просторі печі, відповідно до третього втілення даного винаходу; і

15 Фігура 5 є діаграмою, яка показує відновлювальну здатність  $H_2$  відносно металевого матеріалу, що підлягає відновленню, як функцію температури.

Фігури 1a та 1b мають однакові посилальні позиції для однакових частин.

20 Отже, Фігури 1a та 1b ілюструють піч 100 для отримання прямовідновленого та науглецюваного металевого матеріалу. На Фігурі 2 проілюстровані дві такі печі 210, 220. Печі 210, 220 можуть бути тотожними печі 100 або відрізнятися деталями. Однак, слід розуміти, що все, що сказано в цьому документі щодо печі 100, однаково може бути застосовано до печей 210 та/або 220, і навпаки.

25 Крім того, слід розуміти, що все, що сказано в даному документі стосовно даного способу, однаково може бути застосовано до теперішньої системи 200 та/або печі 100; 210, 220, і навпаки.

Піч 100 як така має багато подібностей з печами, описаними в SE7406174-8 та SE7406175-5, і на ці документи дається посилання стосовно можливих деталей конструкції. Однак, важливою відмінністю між цими печами та даною піччю 100 є те, що дана піч 100 не виконана з  
30 можливою працювати так, коли газоподібний водень рециркулюють через піч 100 та назад у збірну ємність, виконану ззовні печі 100, і, зокрема, не так, коли газоподібний водень рециркулюють з печі 100 (або з нагрітого простору печі 120), а потім назад у піч 100 (або нагрітий простір печі 120) під час тієї ж самої порційної обробки завантаженого матеріалу, що підлягає відновленню.

35 Натомість, і як буде видно з опису нижче, піч 100 виконана з можливістю порційного відновлення та вуглецювання одного завантаження матеріалу за один раз, і з можливістю роботи як закритої системи під час такої індивідуальної обробки порції, в тому сенсі, що газоподібний водень подають в піч 100, але не видаляють з неї під час процесу порційного відновлення та вуглецювання; і що вуглецевмісний газ подають в піч 100, але не видаляють з  
40 неї під час процесу порційного відновлення та вуглецювання.

Це означає, що кількість газоподібного водню, що знаходиться всередині печі 100, завжди збільшується під час процесу відновлення. Після завершення відновлення газоподібний водень звичайно ж видаляють з печі 100, але рециркуляції газоподібного водню на стадії відновлення  
45 нема. У деяких втіленнях, як стане зрозуміло нижче, відповідне також стосується вуглецевмісного газу.

Отже, піч 100 є частиною закритої системи, яка включає нагрітий простір печі 120, що виконаний з можливістю накопичення тиску, наприклад, до тиску більше 1 бар, наприклад, до тиску щонайменше 1,5 бар, або щонайменше 2 бар, або щонайменше 3 бар, або щонайменше 4  
50 бар, або щонайменше 5 бар, або навіть щонайменше 6 бар. У будь-якому випадку, простір печі 120 побудований так, щоб витримувати робочі тиски, описані в цьому документі. Верхня частина 110 печі 100 має дзвоноподібну форму. Вона може відкриватися для завантаження матеріалу, що підлягає обробці, і може бути закритою газонепроникним чином за допомогою засобу кріплення 111. Простір печі 120 поміщений в оболонку з вогнетривкого матеріалу, такого як цегляний матеріал 130.

55 Якщо не сказано інше, термін "тиск" в даному документі стосується загального тиску газу, зокрема всередині простору печі 120, на відміну від "парціального тиску", що стосується парціального газового тиску певного газу.

Крім того, оскільки атмосферний тиск становить приблизно 1 бар, вираз "тиск більше 1 бар" та "тиск вище атмосферного тиску" розрахований на те, щоб мати те саме значення.

Відповідно, вираз "тиск менше 1 бар" та "тиск нижче атмосферного тиску" розрахований на те, щоб мати те саме значення.

Простір печі 120 виконаний з можливістю бути нагрітим з використанням одного або декількох нагрівальних елементів 121. Переважно, нагрівальні елементи 121 є електричними нагрівальними елементами. Однак можуть використовуватися також радіаторні трубки для спалювання або подібні паливні нагрівальні елементи. Нагрівальні елементи 121, тим не менше, не виробляють жодних газів згоряння, які безпосередньо хімічно взаємодіють з простором печі 120, що має підтримуватися хімічно керованим для теперішніх цілей. Переважно, єдиною газоподібною речовиною, яку подають в простір печі під час описаного нижче основного процесу нагрівання, є газоподібний водень та будь-який вуглецевмісний газ, що використовується як джерело вуглецю для вуглецювання металевого матеріалу.

Нагрівальні елементи 121 можуть переважно бути виготовлені з термостійкого металевого матеріалу, такого як молібденовий сплав.

В нагрітому просторі печі 120 також можуть бути виконані додаткові нагрівальні елементи. Наприклад, нагрівальні елементи, подібні до елементів 121, можуть бути забезпечені на бічних стінках простору печі 120; наприклад, на висоті, що відповідає завантаженому матеріалу або, принаймні, ємності 140. Такі нагрівальні елементи за допомогою теплового випромінювання можуть сприяти нагріванню не тільки газу, але і завантаженого матеріалу.

Піч 100 також містить нижню частину 150, утворюючи герметичну ємність разом з верхньою частиною 110, коли піч закрита за допомогою засобу кріплення 111.

Ємність 140 для матеріалу, що підлягає обробці (відновленню та вуглецюванню), присутня в нижній частині 150 печі 100. Ємність 140 може спиратися на вогнетривку підлогу простору печі 120 таким чином, щоб дозволяти газу проходити під ємністю 140, наприклад, вздовж відкритих або закритих каналів 172, утворених у вказаній підлозі, вказані канали 172 проходять від входу 171 для газоподібного водню та вуглецевмісного газу, наприклад, від центральної частини простору печі 120 на вказаній підлозі печі, радіально назовні до радіальної периферії простору печі 120, а потім до верхньої частини простору печі 120. Див. стрілки потоку, вказані на Фігурі 1а для цих потоків під час нижче описаної початкової стадії та основної стадії відновлення та вуглецювання.

Ємність 140 переважно має відкриту структуру, що означає, що газ може вільно проходити через принаймні дно/підлогу ємності 140. Це може бути досягнуто, наприклад, шляхом створення наскрізних отворів у дні ємності 140.

Матеріал, що підлягає обробці, містить оксид металу, переважно оксид заліза, такий як  $Fe_2O_3$  та/або  $Fe_3O_4$ . Матеріал може бути зернистим, наприклад у вигляді котунів або кульок. Одним з придатних матеріалів для завантаження для порційного відновлення є кульки з катаної залізної руди, які були катані у воді до діаметра кульки приблизно 1-1,5 см. Якщо така залізна руда додатково містить оксиди, які випаровуються при температурах нижче кінцевої температури завантаженого матеріалу в даному способі, такі оксиди можуть бути конденсовані в конденсаторі 160 і легко зібрані в порошкоподібному вигляді. Такі оксиди можуть бути оксидами металів, такі як оксиди Zn і Pb.

Переважно, простір печі 120 не завантажують дуже великою кількістю матеріалу, що підлягає відновленню. В кожен піч 100 переважно завантажують не більше 50 тонн, наприклад, не більше 25 тонн, наприклад, від 5 до 10 тонн, в кожній партії. Це завантаження може утримуватися в одній єдиній ємності 150 всередині простору печі 120. Залежно від вимог до пропускної здатності, кілька печей 100 можуть використовуватися паралельно, а залишкова теплота від порції в одній печі 220 потім може бути використана для попереднього нагрівання іншої печі 210 (див. Фігуру 2 і нижче).

Це надає систему 200, яка підходить для встановлення та використання безпосередньо на місці видобутку, не вимагаючи дорогого транспортування руди перед відновленням. Натомість, прямовідновлений та навуглецьований металевий матеріал може бути вироблений на місці, упакований під захисною атмосферою та перевезений на інший майданчик для подальшої переробки.

Отже, у випадку водокатаних кульок залізної руди передбачається, що піч 100 може бути встановлена у зв'язку з системою виробництва кульок залізної руди, так що завантаження металевого матеріалу в піч 100 в ємності 140 може відбуватися повністю автоматизовано, де ємності 140 автоматично циркулюють від системи виробництва кульок залізної руди до системи 100 і назад, заповнюються кульками залізної руди для відновлення і вуглецювання; поміщаються в простір печі 120; піддаються відновлювальній і вуглецьовальній обробці воднем/теплотою/вуглецевмісним газом, описаній в цьому документі; видаляються з простору печі 120 і спорожнюються; повертаються назад до системи виробництва кульок залізної руди;

поповнюються; і так далі. Можна використовувати більше ємностей 140, ніж печей 100, так що в кожній зміні порцій відновлене і науглецьоване завантаження в конкретній ємності негайно замінюється в печі 100 на іншу ємність, що містить ще невідновлений і ненауглецьований матеріал. Така більша система, наприклад, на гірничому майданчику, може бути реалізована для повної автоматизації, а також може бути дуже гнучкою з точки зору пропускну здатності, використовуючи кілька менших печей 100, а не одну дуже велику піч.

Під ємністю 140 піч 100 включає теплообмінник газогазового типу 160, який може переважно бути трубчастим теплообмінником, що сам по собі є відомим. Теплообмінник 160 переважно є теплообмінником протиточного типу. До теплообмінника 160, нижче теплообмінника 160, приєднаний закритий жолоб 161 для збору та прийому конденсованої води з теплообмінника 160. Жолоб 161 також побудований так, щоб витримувати робочі тиски простору печі 120 газонепроникним чином.

Теплообмінник 160 з'єднаний з простором печі 120, переважно так, щоб холодні/охолоджувани газу, що надходять до простору печі 120, проходили теплообмінник 160 через зовнішньо/периферійно забезпечені трубки теплообмінника і далі через вказані канали 172 до нагрівального елемента 121. Потім нагріті газу, що виходять з простору печі 120, після проходження повз та нагрівання завантаженого матеріалу (див. нижче), проходять теплообмінник 160 через внутрішньо/центрально забезпечені трубки теплообмінника, таким чином нагріваючи зазначені холодні/охоложені газу. Отже, вихідні газу нагрівають вхідні газу як за рахунок теплового перенесення через різницю температур між ними, так і за рахунок конденсаційного тепла водяної пари, яка конденсується, що міститься у вихідних газу, ефективно нагріваючи вхідні газу.

Утворену з вихідних газів конденсовану воду збирають в жолоб 161.

Піч 100 може містити набір датчиків температури та/або тиску в жолобі 161 (122); внизу простору печі 120, наприклад, під ємністю 140 (123) та/або у верхній частині простору печі 120 (124). Ці датчики можуть використовуватися блоком керування 201 для керування процесом відновлення та вуглецювання, як буде описано нижче.

171 позначає вхідний канал для нагрівального/охолоджувального газу. 173 позначає вихідний канал для використаного охолоджувального газу.

Між жолобом 161 і вхідним каналом 171 може бути канал 162 для врівноваження надлишкового тиску, з клапаном 163. У випадку, якщо задана різниця тиску, така як різниця тиску щонайменше 1 бар, накопичується в жолобі 161, через велику кількість води, що тече в жолоб 161, така різниця тиску потім може бути частково або повністю врівноважена шляхом випуску газу до вхідного каналу 171. Клапан 163 може бути простим клапаном надлишкового тиску, який передбачений відкриватися, коли тиск у жолобі 161 вищий, ніж вказана задана різниця тиску по відношенню до тиску в каналі 171. Крім того, клапан може управлятися пристроєм керування 201 (нижче) на основі заміру від датчика тиску 122.

Конденсована вода може бути виведена з конденсатора/теплообмінника 160 вниз у жолоб через горловину 164 або що-небудь подібне, виливаючись на дні жолоба 161, наприклад, у місцевій нижній точці 165 жолоба, переважно так, щоб отвір вказаної горловини 164 розташовувався повністю нижче основного дна 166 жолоба 161, як показано на Фігурі 1а. Це зменшить турбулентність рідкої води в жолобі 161, забезпечуючи більш керовані умови роботи.

Жолоб 161 переважно має такі розміри, щоб мати можливість приймати та втримувати всю воду, утворену під час відновлення завантаженого матеріалу. Отже, розмір жолоба 161 може бути підігнаний для типу та об'єму однієї партії відновленого матеріалу. Наприклад, коли повністю відновлюють 1000 кг  $Fe_3O_4$  в результаті утворюється 310 літрів води, а коли повністю відновлюють 1000 кг  $Fe_2O_3$  в результаті утворюється 338 літрів води.

На Фігурі 2 показана система 200, в якій може бути використана піч типу, показаного на Фігурах 1а та 1b. Зокрема, одна або обидві печі 210 і 220 можуть належати до типу, показаного на Фігурах 1а і 1b, або, принаймні, відповідати теперішньому пункту 1.

230 позначає газогазовий теплообмінник. 240 позначає газоводяний теплообмінник. 250 позначає вентилятор. 260 позначає вакуумний насос. 270 позначає компресор. 280 позначає ємність для використаного газоподібного водню. 290 позначає ємність для свіжого/невикористаного газоподібного водню. 310 позначає ємність для свіжого/невикористаного вуглецевмісного газу. 320 позначає ємність для використаного вуглецевмісного газу, такого як суміш газу, що зберігається в ємності 310, та газоподібного водню. V1-V19 позначають клапани.

201 позначає пристрій керування, який з'єднаний з датчиками 122, 123, 124 та клапанами V1-V19, і який, як правило, виконаний з можливістю керування процесами, описаними в цьому документі. Пристрій керування 201 також може бути підключений до користувацького пристрою

керування, такого як графічний інтерфейс користувача, представлений комп'ютером (не показаний) користувачеві системи 200 для спостереження та подальшого керування.

5 Фігура 3 показує спосіб згідно з цим винаходом, в якому використовується система 100 типу, узагальнено показаного на Фігурі 3, і, зокрема, піч 100 типу, узагальнено показаного на Фігурах 1a і 1b. Зокрема, цей спосіб застосовується для отримання прямовідновленого та науглецьованого металевого матеріалу з використанням газоподібного водню як відновника та вуглецевмісного газу як джерела вуглецю для вуглецювання.

10 Після такого безпосереднього відновлення та вуглецювання металевий матеріал може утворювати науглецьований губчастий метал. Зокрема, металевий матеріал може бути матеріалом оксиду заліза, а отриманий продукт після прямого відновлення може потім бути науглецьованим губчастим залізом. Отриманий відновлений, науглецьований металевий матеріал потім може бути використаний на наступних стадіях способу для виробництва сталі тощо.

На першій стадії цей метод починається.

15 На подальшій стадії металевий матеріал, що підлягає відновленню, завантажують в простір печі 120. Це завантаження може відбуватися за допомогою завантаженої ємності 140, розміщеної в просторі печі 120 в орієнтації, показаній на Фігурах 1a і 1b, і тоді простір печі 120 може бути закритим і ущільненим герметичним чином за допомогою засобу кріплення 111.

20 На наступній стадії існуючу атмосферу видаляють з простору печі 120, так що всередині простору печі 120 досягається тиск газу менше 1 бар. Зазначається, що цей нижчий тиск газу є нижчим за атмосферний тиск. Це може відбуватися шляхом закриття клапанів 1-8, 11 та 13-19 та відкриття клапанів 9-10 та 12, а також висмоктування вакуумним насосом та, отже, видалення атмосфери, що містилася всередині простору печі 120, через канал, що проходить через 240 та 250. Потім клапан 9 може бути відкритий, щоб дозволити таким видаленим газам витікати в навколишню атмосферу, у випадку, якщо простір печі 120 заповнений повітрям. Якщо простір печі 120 заповнений використаним воднем та/або вуглецевмісним газом, його замість цього видаляють до ємності 280 або 320, залежно від випадку.

У цьому прикладі атмосферу печі видаляють через канал 173, навіть якщо зрозуміло, що може бути використаний будь-який інший підходящий вихідний канал, виконаний у печі 100.

30 На цій стадії видалення, а також на інших стадіях, як описано нижче, пристрій керування 201 може бути використаний для регулювання тиску в просторі печі 120, наприклад, на основі показань датчиків тиску 122, 123 та/або 124.

Спорожнення може тривати до досягнення в просторі печі 120 тиску не більше 0,5 бар, переважно не більше 0,3 бар.

35 На наступній стадії початкового нагріву в простір печі 120 постачають теплоту і водень. Газоподібний водень може подаватися з ємностей 280 та/або 290. Оскільки піч 100 є закритою, як згадувалося вище, забезпечений газоподібний водень по суті не буде витікати під час процесу. Іншими словами, втрати газоподібного водню (окрім водню, спожитого в реакції відновлення) будуть дуже низькими або навіть не існуючими. Натомість використаним буде лише водень, спожитий хімічним шляхом у реакції відновлення під час процесу відновлення. Крім того, єдиним газоподібним воднем, який потрібен під час процесу відновлення, є необхідна кількість для підтримання необхідного тиску та хімічної рівноваги між газоподібним воднем та водяною парою під час процесу відновлення.

45 Як згадувалося вище, ємність 290 містить свіжий (невикористаний) газоподібний водень, тоді як ємність 280 містить газоподібний водень, який вже був використаний на одній або декількох стадіях відновлення і після того був зібраний в системі 200. При першому виконанні процесу відновлення використовують тільки свіжий газоподібний водень, поданий з ємності 290. Під час подальших процесів відновлення використовують повторно використаний газоподібний водень з ємності 280 (або 320, див. нижче), який доповнюють свіжим газоподібним воднем з ємності 290 відповідно до потреби.

50 Під час необов'язкової початкової фази стадії початкового нагрівання, де початковою фазою є введення газоподібного водню, що здійснюють без будь-якого постачання тепла, до тиску в просторі печі 120 приблизно в 2 бар, клапани 2, 4-9, 11 та 13-19 є закритими, а клапани 10 та 12 є відкритими. Залежно від того, чи буде використаний свіжий або повторно використаний газоподібний водень, відкритим є клапан V1 та/або V3.

60 Коли тиск всередині простору печі 120 досягає або наближається до атмосферного тиску (приблизно 1 бар), вмикають нагрівальний елемент 121. Переважно, це нагрівальний елемент 121, який постачає вказану теплоту в простір печі 120, шляхом нагрівання поданого газоподібного водню, який, в свою чергу, нагріває матеріал в ємності 140. Переважно, нагрівальний елемент 121 розташований в місці, повз яке протікає водень/вуглецевмісний газ,

який постачають в простір печі 120, так що нагрівальний елемент 121 під час процесу відновлення та вуглецювання буде по суті занурений у новоподаний газоподібний водень/вуглецевмісний газ (повністю або по суті повністю оточений ним). Іншими словами, теплота може переважно постачатися безпосередньо до газоподібного водню та/або

5 безпосередньо до вуглецевмісного газу, залежно від того, який з них при цьому постачається (на вказаних початкових або пізніх стадіях) у простір печі 120. На Фіг. 1a та 1b показаний переважний випадок, коли нагрівальний елемент 121 розташований у верхній частині простору печі 120.

Однак, даний винахідник передбачає, що теплота може постачатися іншими способами в простір печі 120, наприклад, безпосередньо до газової суміші всередині простору печі 120 в місці, віддаленому від місця, де поданий водень/вуглецевмісний газ потрапляє в простір печі 120. В інших прикладах, теплота може постачатися до поданого водню/вуглецевмісного газу в місці ззовні простору печі 120, до того, як таким чином нагрітий водень/вуглецевмісний газ буде допущений до входу у простір печі 120.

15 Протягом решти вказаної стадії початкового нагрівання клапани 5 та 7-19 є закритими, в той час як клапани 1-4 та 6 регулюються пристроєм керування разом з компресором 270, щоб досягнути регульованого постачання повторно використаного та/або свіжого газоподібного водню, як описано нижче.

Отже, під час цієї стадії початкового нагрівання, пристрій керування 201 виконаний з

20 можливістю керування засобами постачання теплоти і водню 121, 280, 290 для подачі теплоти і газоподібного водню в простір печі 120 таким чином, що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, що перевищує температуру кипіння води, що міститься в металевому матеріалі. В результаті вказана вода, що міститься в ньому, випаровується.

Протягом початкової стадії нагрівання та основної стадії відновлення та вуглецювання (див. нижче), газоподібний водень подають повільно під керуванням пристрою керування 201. Як наслідок, буде існувати безперервно присутній, відносно повільний, але незмінний потік газоподібного водню, вертикально вниз, через завантажений матеріал. Взагалі, пристрій керування виконаний з можливістю безперервного додавати газоподібний водень таким чином,

30 щоб підтримувати бажану криву (наприклад, таку, що монотонно зростає) парціального тиску водню (а також криву загального тиску) всередині простору печі 120, і, зокрема, протидіяти зниженому тиску в нижніх частинах простору печі 120 (і в нижніх частинах теплообмінника 160), що виникає внаслідок постійної конденсації водяної пари в теплообміннику 160 (див. нижче). Загальне споживання енергії залежить від ефективності теплообмінника 160, і, зокрема, його здатності передавати теплову енергію вхідному газоподібному водню як від гарячого газу, що протікає через теплообмінник 160, так і від теплоти конденсації водяної пари, що конденсується.

35 На прикладі випадку з  $Fe_2O_3$ , теоретична енергія, необхідна для нагрівання оксиду, термокомпенсації ендотермічної реакції та відновлення оксиду, становить приблизно 250 кВт·год. на 1000 кг  $Fe_2O_3$ . Для  $Fe_3O_4$  відповідна кількість становить приблизно 260 кВт·год. на 1000 кг  $Fe_3O_4$ .

Важливим аспектом даного винаходу є відсутність рециркуляції газоподібного водню під час процесу відновлення. Це було обговорено на загальному рівні вище, але в прикладі, показаному на Фігурі 1a, це означає, що газоподібний водень подають, наприклад, через компресор 270, через вхідний канал 171 у верхню частину простору печі 121, де він нагрівається нагрівальним елементом 121, а потім повільно проходить вниз, повз металевий матеріал, що підлягає відновленню, в ємності 140, далі вниз через теплообмінник 130 і в жолоб 161. Однак, відсутні доступні вихідні отвори з простору печі 120, і, зокрема, з жолоба 161. Канал 173 є закритим, наприклад, коли закритими є клапани V10, V12, V13 та V14. Отже, поданий газоподібний водень буде частково споживатися в процесі відновлення, і частково призведе до

50 підвищення тиску газу в просторі печі 120. Потім цей процес триває, поки не відбудеться повне або бажане відновлення металевого матеріалу, як буде детально описано нижче.

Отже, нагрітий газоподібний водень, присутній у просторі печі 120 над завантаженим матеріалом у ємності 140, буде, шляхом повільного подання газоподібного водню, утворюючи газовий потік, що повільно рухається вниз, спускатися вниз до завантаженого матеріалу. Там він утворюватиме газову суміш з водяною парою з завантаженого матеріалу та з будь-яким вуглецевмісним газом, доданим раніше (див. нижче).

Отримана гаряча газова суміш утворюватиме потік газу вниз і через теплообмінник 160. У теплообміннику 160 потім відбудеться теплообмін від гарячого газу, що надходить з простору печі 120, до холодного щойно поданого водню/вуглецевмісного газу, що надходить з каналу

60 171, в результаті чого останній буде підігрітий попереднім. Іншими словами, газоподібний

водень, що буде постачатися на початковій стадії, а також водень та/або вуглецевмісний газ, поданий на основній стадії відновлення та вуглецювання (та/або на стадії постачання вуглецю, див. нижче), підігрівають в теплообміннику 160.

5 Завдяки охолодженню потоку гарячого газу, водяна пара, що міститься в охолодженному газі, буде конденсуватися. Ця конденсація призводить до утворення рідкої води, яка збирається в жолобі 161, але також призводить до конденсації тепла. Теплообмінник 160 переважно додатково виконаний з можливістю передачі такої теплової енергії конденсації від конденсованої води до холодного водню/вуглецю вмісного газу, що буде постачатися в простір печі 120.

10 Конденсація вміщеної водяної пари також зменшить тиск гарячого газу, що тече вниз з простору печі 120, забезпечуючи простір для проходження більшої кількості гарячого газу вниз через теплообмінник 160.

15 Завдяки повільній подачі додаткового нагрітого газоподібного водню та відносно високій теплопровідності газоподібного водню, завантажений матеріал відносно швидко, наприклад, протягом 10 хвилин або менше, досягне температури кипіння рідкої води, що міститься в завантаженому матеріалі, яка до того часу повинна бути трохи вище 100 °С. В результаті, ця вміщена рідка вода буде випаровуватися, утворюючи водяну пару, що змішується з гарячим газоподібним воднем.

20 Конденсація водяної пари в теплообміннику 160 зменшить парціальний тиск газу для водяної пари на нижньому кінці цієї структури, примушуючи водяну пару, утворену в завантаженому матеріалі, в середньому текти вниз. Додаючи до цього ефекту, водяна пара також має значно меншу густину, ніж газоподібний водень, з яким вона змішується.

25 Таким чином, вода, яка міститься в завантаженому матеріалі в ємності 140, буде поступово випаровуватися, стікати вниз через теплообмінник 160, охолоджуватися і конденсуватися в ньому, і підніматися в рідкому стані в жолобі 161.

Холодний газоподібний водень, а також будь-який вуглецевмісний газ, який подають до теплообмінника 160, переважно є кімнатної температури або має температуру, трохи меншу за кімнатну температуру.

30 Зрозуміло, що ця стадія початкового нагрівання, на якій завантажений матеріал таким чином висушують від будь-якої рідкої води, що міститься в ньому, є переважною стадією у даному способі. Зокрема, це дозволяє легко отримувати та постачати завантажений матеріал у вигляді зернистого матеріалу, наприклад, у вигляді катаних кульок матеріалу, без необхідності введення дорогої та ускладнюючої стадії сушіння перед завантаженням матеріалу в простір печі 120.

35 Однак, зрозуміло, що у простір печі 120 можна було б завантажити вже сухий або висушений матеріал. У цьому випадку початкова стадія нагрівання, як описано в цьому документі, не буде здійснюватися, а спосіб перейде безпосередньо до головної стадії відновлення та вуглецювання (нижче).

40 Більш того, деякі механізми цієї початкової стадії нагрівання були описані вище з посиланням як на доданий газоподібний водень, так і на вуглецевмісний газ. Ці механізми також присутні на наступній головній стадії відновлення та вуглецювання (див. нижче). Однак на початковій стадії нагрівання переважно, щоб вуглецевмісний газ не додавався. Зокрема, переважно, щоб єдиним доданим газом на початковій стадії нагрівання був газоподібний водень.

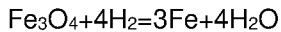
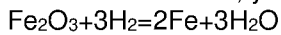
45 В одному втіленні цього винаходу подачу газоподібного водню в простір печі 120 під час зазначеної початкової стадії нагрівання регулюють так, щоб вона була настільки повільною, що протягом здійснення початкової стадії нагрівання по суті підтримується рівновага тиску, переважно таким чином, щоб по всьому простору печі 120 і не заповненим рідиною частинам жолоба 161 постійно переважав по суті однаковий тиск. Зокрема, подача газоподібного водню може регулюватися так, щоб вказаний рівноважний тиск газу не збільшувався або лише незначно збільшувався під час початкової стадії нагрівання. У цьому випадку подача газоподібного водню потім регулюють так, щоб з часом збільшити тиск в просторі печі 120, тільки після того, коли з завантаженого матеріалу в ємності 140 випарувалася вся або по суті вся рідка вода. Момент часу, коли це відбулося, може, наприклад, бути визначений як зміна нахилу кривої температури до часу догори, як виміряно датчиком температури 123 та/або 124, де зміна нахилу позначає точку, в якій, по суті, вся рідка вода випарувалася, але відновлення ще не розпочалося. Як варіант, подача газоподібного водню може регулюватися таким чином, щоб збільшити тиск після того, як виміряна температура в просторі печі 120, що вимірюється датчиком температури 123 та/або 124, перевищить задану межу, яка може становити від 100 °С до 150 °С, наприклад від 120 °С до 130 °С.

60

На подальшій головній стадії відновлення та вуглецювання теплоту та газоподібний водень додатково подають у простір печі 120 таким чином, що це відповідає подачі на початковій стадії нагрівання, описаній вище, так що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, достатньо високої для того, щоб оксиди металів, присутні в металевому матеріалі, відновлювалися, що, в свою чергу, призводить до утворення водяної пари.

На цій головній стадії відновлення та вуглецювання, додатковий газоподібний водень таким чином подають та нагрівають, при поступовому підвищенні тиску всередині простору печі 120, так що завантажений металевий матеріал, в свою чергу, нагрівається до температури, при якій ініціюється та підтримується хімічна реакція відновлення.

У прикладі, показаному на Фігурах 1a та 1b, найвищий завантажений матеріал буде таким чином нагрітий першим. У випадку матеріалу оксиду заліза газоподібний водень почне відновлювати завантажений матеріал з утворенням металевого заліза при температурі приблизно 350-400 °C, утворюючи пірофорне залізо та водяну пару за наступними формулами:



Ця реакція є ендотермічною, і викликається тепловою енергією, яка подається через гарячий газоподібний водень, що тече зверху в просторі печі 120.

Отже, як на початковій стадії нагрівання, так і на головній стадії відновлення та вуглецювання, у завантаженому матеріалі виробляється водяна пара. Ця утворена водяна пара безперервно конденсується і збирається в конденсатор, розташований нижче завантаженого металевого матеріалу. У прикладі, показаному на Фігурі 1a, конденсатор має форму теплообмінника 160.

Відповідно до винаходу, головну стадію відновлення та вуглецювання, включаючи вказану конденсацію, здійснюють таким чином, що по відношенню до атмосферного тиску в просторі печі 120 наростає тиск більше 1 бар. Зокрема, газоподібний водень постачають таким чином, щоб вказаний тиск більше 1 бар був досягнутий і підтримувався. Зазначається, що такий тиск більше 1 бар є тиском, який вищий за атмосферний.

Крім того, згідно з винаходом, спосіб додатково включає стадію постачання вуглецю, а саме стадію, на якій вуглецевмісний газ постачають в простір печі 120, так що металевий матеріал, який був нагрітий вказаною поданою теплою і відновлений в реакції з вказаним газоподібним воднем, вуглецюється вказаним вуглецевмісним газом. Це постачання вуглецевмісного газу здійснюють як частину вказаної головної стадії відновлення та вуглецювання, і здійснюють перед видаленням газів з простору печі 120 назад до атмосферного тиску в просторі печі 120. Таке видалення може бути здійснене як стадія цього способу, як буде пояснено нижче, здійснене, наприклад, як частина підстадії охолодження матеріалу.

Вуглецевмісним газом може бути будь-який вуглецевмісний газ, який може хімічно реагувати з відновленим металевим матеріалом, так щоб навуглецювати останній. Приклади придатних вуглецевмісних газів включають різні газоподібні (при температурах і тисках, що панують в топочному просторі 120 під час виконання цього способу) вуглеводні, такі як метан, етан, пропан, пропен та подібні. Переважно, щоб вуглецевмісний газ містив не більше, ніж слідові кількості монооксиду вуглецю, оскільки це ефективно запобігатиме утворенню залишкових продуктів як з монооксиду вуглецю, так і з вуглекислого газу після завершення поточного процесу вуглецювання. Зокрема, на зазначеній стадії постачання вуглецю монооксид вуглецю переважно не подають в простір печі 120.

Як буде описано та наведено приклад нижче, стадія постачання вуглецю може бути здійснена принаймні частково одночасно з постачанням газоподібного водню та тепла, описаних вище. Зокрема, стадія постачання вуглецю може бути виконана як частина зазначеної головної стадії відновлення та вуглецювання.

Як описано вище, під час відновлення утворюється вільне залізо (Fe), яке потім готове для прийняття вуглецю (C) з утворенням  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

Фігура 5 показує здатність  $\text{H}_2$  відновлювати  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  як функцію підвищення температури. Як натякають на Фігурі 5, відновлення за допомогою газоподібного водню є особливо активним в температурному інтервалі приблизно 400° - 700°.

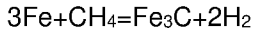
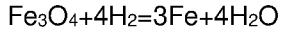
Відповідно, вуглецювання того ж  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  з використанням газоподібного джерела вуглецю найбільш активне в інтервалі, що тягнеться приблизно між 650° - 900°.

Наприклад,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  демонструє подібні властивості щодо відновлення/вуглецювання та температури.

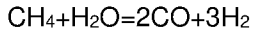
Це означає, що процес, який спочатку здійснює більшу частину відновлення металевого матеріалу при відносно нижчих температурах, а потім, після додаткового нагрівання, здійснює більшу частину вуглецювання металевого матеріалу, буде ефективним.

5 Також вірним є те, що процесу вуглецювання допомагає наявність водяної пари, яка, як виявляється, присутня завдяки процесу відновлення того ж самого металевого матеріалу.

У конкретному випадку метану як вуглецевмісного газу та гематиту/магнетиту як металевого матеріалу, наступні хімічні реакції вуглецювання збільшують свою інтенсивність в просторі печі:



10 Реакція між  $\text{CH}_4$  і  $\text{Fe}$  включає підреакцію, в якій метан реагує з водяною парою, утвореною відновлюючим газоподібним воднем:



15 Потім вуглецювання як таке відбувається переважно за допомогою відомої реакції водню з водою, в якій монооксид вуглецю та водень реагують з утвореною поверхнею заліза та утворюють водяну пару, тоді як звільнений атом вуглецю може бути захоплений у місці розташування раніше звільненого атома кисню.

Оскільки поверхня відновленого заліза є пористою через відновлення, загальна площа поверхні заліза, як правило, буде дуже великою, що призводить до ефективного процесу вуглецювання, зокрема, коли металевий матеріал постачають у вигляді зернистого матеріалу.

20 Як видно з наведених вище формул, певна кількість газоподібного водню утворюється в процесі вуглецювання, тому потрібно менше газоподібного водню, ніж це було б в іншому випадку.

Переважно, щоб остаточно навуглецьований металевий матеріал після завершення стадії постачання вуглецю мав вміст вуглецю від 1 % до 4 % за масою.

25 Подача газоподібного водню на головній стадії відновлення та вуглецювання може переважно підтримуватися до досягнення всередині простору печі 120 заданого парціального тиску водню або заданого загального тиску, що перевищує 1 бар. Відповідним чином, постачання вуглецевмісного газу на стадії постачання вуглецю може здійснюватися до досягнення всередині простору печі 120 заданого парціального тиску або заданого загального тиску, що перевищує 1 бар.

30 Тиск всередині простору печі 120 може, наприклад, вимірюватися датчиком тиску 123 та/або 124. Як зазначалося вище, відповідно до винаходу, газоподібний водень не видаляють з простору печі 120, поки не буде досягнутий вказаний тиск вище 1 бар, і, переважно, газоподібний водень не видаляють з простору печі 120, поки не буде повністю завершена головна стадія відновлення та вуглецювання. Відповідно, вуглецевмісний газ переважно не видаляють з простору печі 120, поки не буде досягнутий вказаний тиск вище 1 бар, і вуглецевмісний газ переважно не видаляють з простору печі 120, поки головна стадія відновлення та вуглецювання не буде повністю завершена.

40 У деяких втіленнях подачу газоподібного водню здійснюють принаймні до досягнення всередині простору печі 120 парціального тиску водню вище 1 бар, в той час як газоподібний водень не видаляють з простору печі 120 до досягнення вказаного парціального тиску газоподібного водню вище 1 бар.

45 Зокрема, подача газоподібного водню на головній стадії відновлення та вуглецювання, а також конденсація водяної пари можуть здійснюватися до досягнення в просторі печі 120 заданого тиску, що становить вище 1 бар, де заданий тиск становить щонайменше 2,3 бар, більш переважно щонайменше 2,5 бар або навіть приблизно 3 бар або вище. Відповідне справедливо для можливої регулюючої тиск подачі вуглецевмісного газу на стадії постачання вуглецю.

50 Зазначається, що цей спосіб може бути передбачений таким чином, що, до досягнення цього заданого тиску, видалення водню або вуглецевмісного газу не здійснюють.

Як варіант, подача газоподібного водню на головній стадії відновлення та вуглецювання, а також конденсація водяної пари можуть здійснюватися до досягнення стаціонарного стану; це означає, що більше не потрібно постачати більше газоподібного водню, щоб підтримувати досягнутий стаціонарний стан тиску газу всередині простору печі 120. Цей тиск можна виміряти відповідним чином, як описано вище. Переважно, тиск газу у стаціонарному стані може становити щонайменше 2,3 бар, більш переважно щонайменше 2,5 бар або навіть приблизно 3 бар або більше. Таким чином реалізується простий спосіб дізнатися, коли процес відновлення був завершений.

60 Крім того, як варіант, подача газоподібного водню та тепла на головній стадії відновлення та вуглецювання, а також конденсація водяної пари можуть здійснюватися до тих пір, поки

завантажений металевий матеріал, що підлягає відновленню, не досягне заданої температури, яка може становити щонайменше 600 °С, наприклад, між 640-680 °С, переважно приблизно 660 °С. Температура завантаженого матеріалу може вимірюватися безпосередньо, наприклад, шляхом вимірювання теплового випромінювання від завантаженого матеріалу, використовуючи відповідний датчик, або опосередковано, за допомогою датчика температури 123.

У деяких втіленнях головну стадію відновлення та вуглецювання, включаючи вказану конденсацію утвореної водяної пари, здійснюють протягом безперервного періоду часу, що становить щонайменше 0,25 години, наприклад, щонайменше 0,5 години, наприклад, щонайменше 1 годину. Протягом усього цього часу як тиск, так і температура простору печі 120 можуть рівномірно зростати.

У деяких втіленнях винаходу головна стадія відновлення та вуглецювання може здійснюватися повторюваним чином, в кожному повторенні пристрій керування 201 дає можливість досягнення стаціонарного стану тиску всередині простору печі 120 перед подачею додаткової кількості газоподібного водню в простір печі. Постачання теплоти також може бути повторюваним (імпульсним), або бути у ввімкненому стані протягом усієї головної стадії відновлення та вуглецювання.

Зазначається, що під час здійснення як початкової стадії нагрівання, так і головних стадій відновлення та вуглецювання, і, зокрема, принаймні, протягом по суті усієї довжини цих стадій, існує результуючий потік водяної пари вниз через завантажений металевий матеріал у ємності 140.

Під час початкової стадії та головної стадії відновлення та вуглецювання, можливо за винятком періоду часу, пов'язаного з початком стадії постачання вуглецю, в якому загальний тиск у просторі печі 120 може бути знижений, компресором 270 можна керувати за допомогою пристрою керування 201, щоб постійно підтримувати або збільшувати тиск, подаючи додатковий газоподібний водень та/або вуглецевмісний газ. Поданий газоподібний водень використовується для поповнення водню, спожитого в процесі відновлення, а також для поступового підвищення тиску до переважного кінцевого тиску. Вуглецевмісний газ може подаватися за допомогою будь-якої однієї з низки різних стратегій (як пояснюється нижче), і може, наприклад, контролюватися таким чином, щоб досягти заданого цільового загального тиску в просторі печі 120 під час такого постачання.

Утворення водяної пари в завантаженому матеріалі збільшує тиск газу місцево, фактично створюючи зміну тиску між простором печі 120 та жолобом 161. В результаті утворена водяна пара буде опускатися через завантажений матеріал і конденсуватися в теплообміннику 160, в свою чергу, знижуючи тиск на віддаленій (по відношенню до простору печі 120) стороні теплообмінника 160. Таким чином, ці процеси створюють результуючий рух газу вниз через завантаження, де щойно доданий газоподібний водень компенсує втрату тиску в просторі печі 120.

Вміст теплоти у газі, що витікає з простору печі 120, і, зокрема, теплота конденсації водяної пари, переноситься на вхідний водень/вуглецевмісний газ в теплообміннику 160.

Отже, процес відновлення підтримується до тих пір, поки існує металевий матеріал для відновлення і, отже, отримується водяна пара, що призводить до зазначеного руху газу вниз. Після того, як утворення водяної пари припиняється (через те, що по суті весь металевий матеріал був відновлений), тиск вирівнюється по всьому простору всередині печі 100, і виміряна температура буде подібною по всьому простору печі 120, у випадку, якщо не подається додатковий вуглецевмісний газ. Наприклад, виміряна різниця тиску між точкою в заповненій газом частині жолоба 161 і точкою над завантаженим матеріалом буде меншою за задане значення, яке може становити максимум 0,1 бар. Додатково або як варіант, виміряна різниця температур між точкою вище завантаженого матеріалу та точкою нижче завантаженого матеріалу, але на стороні простору печі 120 теплообмінника, буде меншою за задане значення, яке може бути максимум 20 °С. Отже, коли така однорідність тиску та/або температури досягається та вимірюється, подача газоподібного водню може бути припинена вимкненням подачі газоподібного водню.

Зазвичай, нагрівальний елемент 121 не вимикають до завершення вуглецювання, яке, як правило, відбувається пізніше.

Отже, подача комбінації газоподібного водню та тепла на головній стадії відновлення та вуглецювання може здійснюватися до досягнення заданої мінімальної температури та/або (перевищення) тиску та/або до досягнення заданої максимальної різниці температур та/або максимальної різниці тисків у нагрітому об'ємі в печі 100. Який критерій(і) використовується/використовуються, залежить від необхідних умов, таких як конструкція печі 100 та тип металевого матеріалу для відновлення. Наприклад, подача теплоти може

здійснюватися до досягнення заданої мінімальної температури, тоді як подача газоподібного водню може здійснюватися до досягнення температурної однорідності. В іншому прикладі, постачання комбінації тепла та газоподібного водню може здійснюватися до досягнення тиску стаціонарного стану без необхідності подачі газоподібного водню.

5 Також можна використовувати інші критерії, такі як заданий основний час нагрівання або завершення заданої програми нагрівання/подачі водню, які, в свою чергу, можуть бути визначені емпіричним шляхом.

Зазначений вуглецевмісний газ може подаватися за однією з декількох різних стратегій.

Перший приклад

10 У першій такій стратегії за відновленням за допомогою газоподібного водню безпосередньо слідує вуглецювання металевго матеріалу. По-перше, газоподібний водень та теплоту подають, як описано вище, щоб повільно підвищити температуру та тиск в просторі печі 120 при відновленні металевго матеріалу. Кінцевий тиск може бути таким, як описано вище, наприклад, щонайменше 1,1 бар, і переважно щонайменше від 2,3 до 2,5 бар.

15 У цьому та інших прикладах, коли відновлення повного завантаження металевго матеріалу закінчено, простір печі 120 досягає температури приблизно 700 °C, і температура газоподібного водню, що йде в простір печі, має таку ж температуру, як і газ, що входить в теплообмінник 160.

20 Як правило, у цій першій стратегії теплота може постачатися на зазначеній головній стадії відновлення та вуглецювання до тих пір, поки металевий матеріал не досягне температури щонайменше 500 °C, наприклад, щонайменше 600 °C, до постачання вуглецевмісного газу, яке починається на зазначеній стадії постачання вуглецю.

25 В цьому стані, коли відновлення завершено, вуглецевмісний газ ще не подавався. Перед цим або у зв'язку з цим частина газоподібного водню може бути видалена таким чином, щоб знизити парціальний тиск газоподібного водню. А саме, клапан V4 може бути закритий для припинення подачі водню. Потім компресор 270 може бути використаний для видалення частини газоподібного водню, шляхом закриття клапана V6 та відкриття клапанів V7 та V5 у ємність 280 для зберігання використаного водню. Коли тиск було знижено, до нижчого тиску від 1,1 до 1,8 бар, наприклад, від 1,3 до 1,6 бар, наприклад, приблизно 1,5 бар, клапани V7 і V5 закриваються і починається стадія подачі вуглецю.

30 Як показано на Фігурі 4а, після цього часткового видалення водню загальний тиск у просторі печі 120 становить приблизно 1,5 у цьому прикладі.

Загалом, стадія постачання вуглецю може бути, принаймні частково, переважно повністю, здійснене при тиску в просторі печі 120, який є нижчим, ніж тиск в просторі печі 120, що переважав на момент завершення процесу відновлення.

35 У ємності для зберігання 310 зберігається свіжий вуглеводневий газ, наприклад, метан, а в ємності 320 зберігається раніше використаний вуглеводний газ (такий як суміш метану та водню). Під час першого використання для вуглецювання відкривають клапан V15, якщо не відкритий клапан V17, у випадку, якщо тиск в ємності 320 більший, ніж переважає в просторі печі 120. В іншому випадку клапани V18 і V6 відкриті, так, що компресор 270 може нагнати об'єм вуглеводню, необхідний для підтримки тиску в просторі печі 120, для здійснення вуглецювання.

45 У цей момент нововідновлений металевий матеріал може приймати поданий вуглець. Вуглецювання відбувається при підвищеній температурі простору печі 120, шляхом нагрівання за допомогою нагрівального елемента 121. Залежно від структури металевго матеріалу, вуглецювання завершується, коли температура досягає приблизно 700 °C - 1100 °C. Як зазначалося вище, під час вуглецювання в результаті утворюється певна кількість водню.

Після цього можуть бути розпочаті описані нижче стадії охолодження та спорожнення.

50 Фігура 4а показує на схематичній діаграмі процес відповідно до цієї першої стратегії, в якій вуглецевмісний газ додають після завершення відновлення. Ця діаграма показує парціальний тиск газоподібного водню (суцільна лінія) як функцію температури в просторі печі (120), а також парціальний тиск вуглецевмісного газу (пунктирна лінія) як функцію температури в просторі печі (120) під час цього процесу.

55 Зазначається, що Фігура 4а, подібно до Фігур 4b і 4с, є спрощеними в тому сенсі, що вони ігнорують будь-який залишковий газ, присутній в просторі печі 120 після початкового спорожнення.

Другий приклад

У другій стратегії вуглецевмісний газ подають до завершення відновлення.

60 Під час нагрівання та початку відновлення, газоподібний водень подають таким чином, щоб досягти підвищення загального тиску в просторі печі 120 щонайменше до 1,1 бар, і переважно щонайменше до 2,3 бар. У цьому випадку вуглецевмісний газ подають незабаром після початку

відновлення, іншими словами, після того, як температура в просторі печі 120 досягла щонайменше 350 °С, наприклад, між 350 - 450 °С, наприклад, при приблизно 400 °С. Загалом, у цій другій стратегії стадія постачання вуглецю починається лише після того, як металевий матеріал досяг температури між 350-450 °С.

5 Потім відбувається подача вуглецевмісного газу, шляхом закриття клапана V1 або V3 та відкриття V15 (у випадку, якщо це перше відновлення), в іншому випадку відкривають клапан V17. В результаті простір печі 120 починає заповнюватися вуглецевмісним газом. Це означає, що відновлення та вуглецювання відбуваються паралельно під час головної стадії відновлення та вуглецювання, а тиск підтримується поданим вуглецевмісним газом. У випадку, якщо тиску в  
10 ємності 320 недостатньо для подачі вуглецевмісного газу, замість цього відкривають клапани V18 і V6, а клапани V12, V13 і V14 закривають, так що компресор 270 може повільно починати подавати більше вуглецевмісного газу і тим самим підтримувати тиск в просторі печі 120 при переважному кінцевому тиску щонайменше 2,3 - 3,5 бар.

Протягом всього процесу відновлення, як тепло, так і більше вуглецевмісного газу, поки відновлення не наближається до завершення, яке відбувається при температурі приблизно  
15 700 °С, при якій газ, що виходить з завантаження, має таку саму температуру, як і газ, що надходить в завантаження. В цей момент температуру підвищують до кінцевої температури понад 700 °С і переважно максимум 1100 °С, поки тиск підтримується безперервною подачею змішаного газу з ємності 320, що містить суміш газоподібного водню та вуглецевмісного газу.

20 Після цього можуть бути розпочаті описані нижче стадії охолодження та спорожнення.

Фігура 4b є діаграмою, яка відповідає тій, що показана на Фігурі 4a, але ілюструє цю другу стратегію.

Третій приклад.

У третій стратегії подача вуглецевмісного газу починається, коли відновлення досягає свого  
25 максимуму. Для гематиту і магнетиту це відбувається при температурі приблизно 550 - 570 °С.

У цій стратегії тиск збільшують до щонайменше 1,1 бар, переважно до щонайменше 2,3 - 2,5 бар шляхом подачі газоподібного водню з ємності 290, як описано вище, через клапан V1 або шляхом відкриття клапанів V2/V6 та використання компресора 270, залежно від наявного тиску газоподібного водню в ємності 290. При цьому теплоту подають в простір печі 120, як описано  
30 вище.

Коли температура газів, що виходять з завантаження, наближається до 500 °С, подачу газоподібного водню вимикають. В цей момент основна частина завантаження вже буде повністю відновлена, і тепер складається з пірофорного заліза, яке готове приймати вуглець, що подається за допомогою вуглецевмісного газу. Це досягається шляхом керування  
35 клапанами V1-V4 для газоподібного водню та відкриттям клапана V15 для свіжого вуглецевмісного газу з ємності 310.

Якщо тиск у ємності 310 недостатній, клапани V15 і V1 закривають, коли клапан V6 є відкритим, і компресор 270 використовується для підтримки переважного тиску. Вуглецювання відбувається після або частково паралельно з відновленням, і тиск підтримується подачею  
40 вуглецевмісного газу. Як згадувалося вище, в результаті вуглецювання утворюється певна кількість газоподібного водню, і з небажаним підсумковим підвищенням тиску можна справитися за допомогою видалення частини атмосфери простору печі 120 в ємність 320 шляхом відкриття клапанів V7 і V19, і надання можливості компресору 270 витиснути суміш водню/вуглецевмісного газу з простору печі 120 в ємність 320.

45 Коли температура на вихідній стороні завантаження є такою ж, як і на вхідній стороні, переважно між 650 - 750 °С, наприклад між 690 - 700 °С, температуру підвищують при постійному тиску, точніше тиску щонайменше 1,1, переважно щонайменше до 2,3 - 2,5 бар, до більш високої температури, яка становить щонайменше 800 °С, наприклад 800 - 1100 °С. Постійний тиск підтримується подачею вуглецевмісного газу, переважно свіжого  
50 вуглецевмісного газу, з ємності 310 через клапан V15, або через клапани V16 і V6 за допомогою компресора 270, якщо це необхідно.

Після цього можуть бути розпочаті описані нижче стадії охолодження та спорожнення.

Загалом, у цій третій стратегії стадія постачання вуглецю починається тільки після того, як металевий матеріал досяг температури між 450-550 °С, і подання газоподібного водню після  
55 цього може бути припинене. З іншого боку, стадія постачання вуглецю може потім також включати продовження подачі тепла в простір печі 120.

Крім того, в цілому, в цій третій стратегії теплоту постачають на головній стадії відновлення та вуглецювання, і, зокрема, на стадії постачання вуглецю, доки металевий матеріал не досягне температури між 700-1100 °С, наприклад, між 800 - 1100 °С.

Як вже зазначалося, стадія постачання вуглецю у цій третій стратегії може включати постачання тепла в простір печі 120 при постійному тиску, де тиск контролюється контрольованим поданням вуглецевмісного газу, і де поданий вуглецевмісний газ може бути змішаним або не змішаним з газоподібним воднем.

5 Фігура 4b є діаграмою, яка відповідає тій, що показана на Фігурі 4a, але ілюструє цю третю стратегію. Особливо відзначається, що парціальний тиск газоподібного водню знижується вище 600 °C, що відбувається через водень, утворений в результаті реакції вуглецювання.

Після того, як відбулося повне відновлення та вуглецювання, спосіб згідно з цим винаходом включає стадію охолодження та спорожнення, яка буде описана нижче.

10 Отже, далі, на наступній стадії охолодження, атмосферу газоподібного водню/вуглецевмісного газу в просторі печі 120 охолоджують до температури не більше 100 °C, переважно приблизно 50 °C, а потім видаляють з простору печі 120 і збирають.

У випадку однієї печі 100/220, яка не з'єднана з однією або кількома печами, завантажений матеріал може бути охолоджений за допомогою вентилятора 250, який розташований нижче по потоку від охолоджувача газоводяного типу 240, який, в свою чергу, виконаний з можливістю охолодження водню/вуглецевмісного газу (що циркулює в закритому контурі за допомогою вентилятора 250 в контурі крізь клапан V12, теплообмінник 240, вентилятор 250 і клапан V10, виходячи з простору печі 120 через вихідний канал 173 і знову потрапляючи в простір печі 120 через вхідний канал 171). Ця охолоджувальна циркуляція показана стрілками на Фігурі 1b.

20 Таким чином, теплообмінник 240 передає теплову енергію від циркулюючого водню/вуглецевмісного газу до води (або іншої рідини), звідки теплова енергія може бути використана підходящим чином, наприклад, у місцевій системі централізованого тепlopостачання. Закритий контур досягається шляхом закриття всіх клапанів V1-V19, крім клапанів V10 і V12.

25 Оскільки водень/вуглецевмісний газ в цьому випадку циркулює повз завантажений матеріал в ємності 140, він поглинає теплову енергію від завантаженого матеріалу, забезпечуючи ефективне охолодження завантаженого матеріалу, в той час як водень/вуглецевмісний газ циркулює в замкнутому контурі.

30 В іншому прикладі, теплову енергію, доступну від охолодження печі 100/220, використовують для підігрівання іншої печі 210. Це досягається тоді за допомогою пристрою керування 201, що, порівняно з описаним вище замкнутим контуром охолодження, закриває клапан V12 і замість цього відкриває клапани V13, V14. Таким чином, гарячий водень/вуглецевмісний газ, що надходить з печі 220, подають до теплообмінника газогазового типу 230, який переважно є протиточним теплообмінником, в якому газоподібний водень, що подають на початковій або головній стадії відновлення та вуглецювання, яку здійснюють відносно іншої печі 210, підігрівається в теплообміннику 230. Після цього дещо охолоджений водень/вуглецевмісний газ з печі 220 може циркулювати через теплообмінник 240 для подальшого охолодження перед тим, як бути повторно введеним в піч 220. Знову ж таки, водень/вуглецевмісний газ з печі 220 циркулює в замкнутому контурі за допомогою вентилятора 250.

Отже, охолодження водню/вуглекислого газу на стадії охолодження може відбуватися шляхом теплообміну з газоподібним воднем, що призначений для подачі в інший простір 120 печі 210 для здійснення початкової та головної стадій нагріву та конденсації, як описано вище, стосовно вказаного іншого простору 120 печі 210.

45 Як тільки водень/вуглецевмісний газ недостатньо гарячий для нагрівання газоподібного водню, який подають до печі 210, пристрій керування 201 знову закриває клапани V13, V14 і знову відкриває клапан V12, так що водень/вуглецевмісний газ з печі 220 направляється безпосередньо до теплообмінника 240.

50 Незалежно від того, як вчиняють з його тепловою енергією, водень/вуглецевмісний газ з печі 220 охолоджують до тих пір, поки він (або, що важливіше, завантажений матеріал) не досягне температури нижче 100 °C, щоб уникнути повторного окислення завантаженого матеріалу, коли він пізніше буде підданий впливу повітря. Температура завантаженого матеріалу може бути виміряна безпосередньо, відповідним способом, таким як описаний вище, або опосередковано, шляхом вимірювання відповідним способом температури водню/вуглецевмісного газу, що виходить через вихідний канал 173.

55 Охолодження водню/вуглецевмісного газу може відбуватися при підтримці тиску водню/вуглецевмісного газу, або тиск водню/вуглецевмісного газу може бути знижений внаслідок того, що гарячому водню/вуглецевмісному газу дозволять зайняти більший об'єм (закритого контуру каналів та теплообмінників) після відкриття клапанів V10 та V12.

На подальшій стадії водень/вуглецевмісний газ видаляють з простору печі 120 та збирають у підходящу ємність для використаного газу. Зазвичай, простір печі 120 в цей момент міститиме суміш водню та вуглецевмісного газу, і цю суміш потім видаляють в ємність 320 для використаного вуглецевмісного газу, використовуючи вакуумний насос 260, можливо, в комбінації з компресором 270. Керуючий пристрій відкриває клапани V13, V14, V8 та V19, закриває клапани V1-V7 та V15 - V18. Потім працюють вакуумний насос 260 і компресор 270 для закачування використаної газової суміші в ємність 320. Видалення з простору печі 120 переважно здійснюють до тих пір, поки всередині простору печі 120 не буде виявлено тиск максимум 0,5 бар або навіть максимум 0,3 бар.

Оскільки простір печі 120 є закритим, з системи було видалено лише водень/вуглецевмісний газ, спожитий у хімічній реакції відновлення, а залишок газоподібного водню є тим, який був необхідний для підтримки балансу газоподібного водню/водяної пари в просторі печі 120 під час головної стадії відновлення та вуглецювання. Цей видалений газоподібний водень є цілком корисним для подальшої порційної роботи з новим завантаженням металевго матеріалу, що підлягає відновленню.

Після цього клапани V7, V8, V19 закривають і відкривають клапан V9 для запускання повітря в систему для зміни завантаженого матеріалу, а клапан V11 відкривають для спорожнення конденсату і води.

На наступній стадії відкривають простір печі 120, наприклад, шляхом вивільнення засобів кріплення 111 та відкриття верхньої частини 110. Ємність 140 видаляють і замінюють на ємність з новою партією завантаженого металевго матеріалу, що підлягає відновленню.

На наступній стадії, видалений, відновлений матеріал потім може бути поміщений в інертну атмосферу, таку як атмосфера азоту, щоб уникнути повторного окислення під час транспортування та зберігання.

Наприклад, відновлений металевий матеріал може бути розташований у гнучкій або жорсткій транспортній ємності, яка заповнена інертним газом. Кілька таких гнучких або жорстких ємностей можуть бути розташовані в транспортній ємності, яка потім може бути заповнена інертним газом у просторі, що оточує ці гнучкі або жорсткі ємності. Після цього відновлений металевий матеріал можна безпечно транспортувати без ризику повторного окислення.

Наступна таблиця показує приблизну рівновагу між газоподібним воднем H<sub>2</sub> і водяною парою H<sub>2</sub>O для різних температур всередині простору печі 120:

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

Для відновлення 1000 кг Fe<sup>2</sup>O<sub>3</sub> необхідно приблизно 417 м<sup>3</sup> газоподібного водню H<sub>2</sub> за нормальних умов, а для відновлення 1000 кг Fe<sup>3</sup>O<sub>4</sub> - приблизно 383 м<sup>3</sup> газоподібного водню H<sub>2</sub>.

Наступна таблиця показує кількість газоподібного водню, необхідного для відновлення 1000 кг Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, відповідно, при атмосферному тиску та у відкритій системі (відповідно до рівня техніки), але при різних температурах:

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

Наступна таблиця показує кількість газоподібного водню, необхідного для відновлення 1000 кг Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, відповідно, при різних тисках та при різних температурах:

Температура (°C):	400	450	500	550	600
m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> (за нормальних умов) / тонна Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :					
1 бар	8340	3208	2317	1895	1738
2 бар	4170	1604	1158	948	869
3 бар	2780	1069	772	632	579
m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> (за нормальних умов) / тонна Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> :					
1 бар	7660	2946	2128	1741	1596
2 бар	3830	1473	1064	870	798
3 бар	2553	982	709	580	532

Як описано вище, головну стадію відновлення та вуглецювання відповідно до цього винаходу переважно здійснюють до тиску більше 1 бар та високої температури. Під час більшості частини головної стадії відновлення та вуглецювання, на якій триває часткове відновлення, було виявлено вигідним використовувати комбінацію нагрітого газоподібного водню температури щонайменше 500 °C та тиску в просторі печі 120 щонайменше 2,3 бар.

Вище описані переважні втілення винаходу. Однак, для фахівця ясно, що до описаних втілень винаходу можуть бути внесені багато модифікацій, не відступаючи від основної ідеї винаходу.

Наприклад, геометрія печі 100 може відрізнятись, залежно від детальних необхідних передумов.

Теплообмінник 160 описаний як трубчастий теплообмінник. Навіть якщо це було виявлено особливо вигідним, зрозуміло, що можливі інші типи газогазових теплообмінників/конденсаторів. Теплообмінник 240 може бути будь-якої придатної конфігурації.

Надлишкова теплота від охолодженого водню/вуглецевмісного газу також може використовуватися в інших процесах, що потребують теплової енергії.

Металевий матеріал для відновлення та вуглецювання був описаний як оксиди заліза. Однак, даний спосіб та система також можуть бути використані для відновлення та вуглецювання металевих матеріалів, такого як вищезгадані оксиди металів, що містять Zn та Pb, що випаровуються при температурах нижчих приблизно 600-700 °C.

Ці поєднані принципи прямого відновлення та вуглецювання також можуть бути використані з металевими матеріалами, що мають вищі температури відновлення, ніж залізна руда, з відповідними коригуваннями конструкції печі 100, наприклад, щодо використовуваних будівельних матеріалів.

Отже, цей винахід не обмежується описаними втіленнями, але може бути змінений в межах обсягу доданої формули винаходу.

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб порційного отримання прямовідновленого металевих матеріалів, який включає стадії, на яких:

a) завантажують металевий матеріал, що підлягає відновленню, в простір печі (120);  
b) видаляють існуючу атмосферу з простору печі (120) таким чином, щоб досягти тиску газу менше 1 бар всередині простору печі (120);

c) подають теплоту та газоподібний водень в простір печі (120), так що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, достатньо високої, так що оксиди металів, присутні в металевому матеріалі, відновлюються, що, в свою чергу, приводить до утворення водяної пари, причому подачу газоподібного водню здійснюють таким чином, що всередині простору печі (120) накопичується тиск більше 1 бар, і без рециркуляції газоподібного водню під час відновлення металевих матеріалів, де газоподібний водень подають в піч, але не видаляють з неї під час відновлення; де газоподібний водень подають до верхньої частини простору печі (120); і

d) перед видаленням газів з простору печі (120) назад до атмосферного тиску, конденсують та збирають водяну пару, утворену на стадії c) в конденсаторі (160) нижче завантаженого металевих матеріалів; і

e) подають вуглецевмісний газ до верхньої частини простору печі (120), перед видаленням газів з простору печі (120) назад до атмосферного тиску, так що нагрітий і відновлений металевий матеріал вуглецюється вказаним вуглецевмісним газом.

2. Спосіб за п. 1, за яким вуглецевмісний газ не подають, доки металевий матеріал не буде принаймні частково відновлений.

3. Спосіб за п. 1 або 2, за яким газоподібний водень подають через вхідний канал (171) і вуглецевмісний газ подають через вхідний канал (171).

4. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, за яким стадія завантаження металевих матеріалів в простір печі (120) включає завантаження в простір печі (120) ємності (140) з металевим матеріалом, де ємність (140) спирається на вогнетривку підлогу простору печі (120) таким чином, щоб дозволити газу проходити під ємністю (140) вздовж відкритих або закритих каналів (172), утворених у вказаній підлозі, причому канали (172) проходять від входу (171) для газоподібного водню та вуглецевмісного газу від центральної частини простору печі (120) на вказаній підлозі печі, радіально назовні до радіальної периферії простору печі (120), а потім до верхньої частини простору печі 120,

де газоподібний водень подають у верхню частину простору печі (120) через канали (172), і

де вуглецевмісний газ подають через вказані канали (172).

5. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який характеризується тим, що стадії c) і d) здійснюють принаймні до досягнення всередині простору печі (120) парціального тиску водню більше 1 бар, і тим, що газоподібний водень не видаляють з простору печі (120) до досягнення вказаного парціального тиску більше 1 бар.
6. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який характеризується тим, що стадія c) додатково включає, на початковій стадії нагрівання, подачу теплоти та газоподібного водню в простір печі (120), так що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, що перевищує температуру кипіння води, що міститься в металевому матеріалі, що приводить до випаровування вказаної вміщеної води.
7. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який характеризується тим, що видалення на стадії b) здійснюють так, що всередині простору печі (120) досягається тиск максимум 0,5 бар.
8. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який характеризується тим, що щонайменше частину теплоти, поданої на стадії c), постачають безпосередньо до газоподібного водню, який також постачають на стадії c).
9. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який характеризується тим, що щонайменше частину теплоти, поданої на стадії c), постачають безпосередньо вуглецевмісному газу, який постачають на стадії e).
10. Спосіб за п. 8 або 9, який характеризується тим, що вказану теплоту постачають вказаному поданому газу за допомогою нагрівальних елементів (121), розташованих у верхній частині простору печі (120).
11. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що газоподібний водень, який постачатимуть на стадії c), попередньо нагрівають в теплообміннику (160), при цьому теплообмінник (160) виконаний з можливістю передачі теплової енергії від випаруваної води до газоподібного водню, що підлягає постачанню на стадії c).
12. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що вуглецевмісний газ, що буде постачатися на стадії c), попередньо нагрівають в теплообміннику (160), при цьому теплообмінник (160) виконаний з можливістю передачі теплової енергії від випаруваної води до вуглецевмісного газу, який будуть постачати на стадії e).
13. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що постачання газоподібного водню на стадії c) та/або постачання вуглецевмісного газу на стадії e) здійснюють до досягнення заданого тиску.
14. Спосіб за п. 13, який **відрізняється** тим, що заданим тиском є тиск щонайменше 2,3 бар, наприклад щонайменше 2,5 бар, наприклад щонайменше 3 бар.
15. Спосіб за будь-яким з пп. 1-12, який **відрізняється** тим, що постачання газоподібного водню та тепла на стадії c) та конденсацію на стадії d) здійснюють до досягнення стаціонарного стану, маючи на увазі, коли більше не потрібно постачати більше газоподібного водню для підтримання досягнутого тиску газу стаціонарного стану всередині простору печі (120).
16. Спосіб за п. 15, який **відрізняється** тим, що тиском газу в стаціонарному стані є тиск щонайменше 2,3 бар, наприклад щонайменше 2,5 бар, наприклад щонайменше 3 бар.
17. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що постачання теплоти на стадії c) та конденсацію на стадії d) здійснюють, доки завантажений металевий матеріал, що підлягає відновленню, не досягне заданої температури.
18. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що під час здійснення стадії c) існує результуючий потік водяної пари вниз через завантажений металевий матеріал.
19. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що стадії c), d) та e) здійснюють протягом щонайменше 0,25 години.
20. Спосіб за п. 19, який **відрізняється** тим, що стадію c) здійснюють повторюваним чином, в кожному повторенні з можливістю досягнення стаціонарного стану тиску всередині простору печі (120) перед подачею додаткової кількості теплоти та газоподібного водню.
21. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що вуглецевмісний газ є газоподібним вуглеводнем, і тим, що на стадії e) в простір печі (120) не подають монооксид вуглецю.
22. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що стадію e) принаймні частково здійснюють одночасно зі стадіями c) і d).
23. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що вказану теплоту на стадії c) постачають, доки металевий матеріал не досягне температури щонайменше 500 °C, наприклад щонайменше 600 °C, перш ніж починають постачання вуглецевмісного газу на стадії e).
24. Спосіб за будь-яким з пп. 1-22, який **відрізняється** тим, що стадію e) починають тільки після

того, як металевий матеріал досяг температури між 350-450 °С.

25. Спосіб за будь-яким з пп. 1-22, який **відрізняється** тим, що: стадію е) починають тільки після того, як металевий матеріал досяг температури між 450-550 °С; стадію с) потім закінчують; стадія е) також включає постачання тепла в простір печі (120).

5 26. Спосіб за будь-яким з попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що вказану теплоту постачають на стадії с), доки металевий матеріал не досягне температури між 700-1100 °С, наприклад між 800-1100 °С.

10 27. Спосіб за п. 26, який **відрізняється** тим, що стадія d) включає постачання теплоти в простір печі (120) при постійному тиску, де тиск регулюється регульованою подачею вуглецевмісного газу, де вуглецевмісний газ може бути змішаний з газоподібним воднем.

28. Система (100, 200) для порційного отримання прямовідновленого металевого матеріалу, що включає:

закритий простір печі (120), виконаний з можливістю прийому завантаженого металевого матеріалу, що підлягає відновленню;

15 засіб для видалення атмосфери (260), виконаний з можливістю видалення існуючої атмосфери з простору печі (120) таким чином, щоб досягти тиску газу менше 1 бар всередині простору печі (120);

засіб для постачання теплоти і водню (171, 280, 290), призначений для постачання теплоти і газоподібного водню до простору печі (120);

20 яка **відрізняється** тим, що додатково включає:

пристрій керування (201), виконаний з можливістю керування засобами постачання теплоти і водню (171, 280, 290) таким чином, що нагрітий газоподібний водень нагріває завантажений металевий матеріал до температури, достатньо високої, так що оксиди металів, присутні в металевому матеріалі, відновлюються, що, в свою чергу, приводить до утворення водяної пари, де постачання газоподібного водню здійснюють таким чином, що всередині простору печі (120) накопичується тиск більше 1 бар без рециркуляції газоподібного водню під час відновлення металевого матеріалу, де газоподібний водень подають в піч, але не видаляють з неї під час відновлення; де газоподібний водень подають до верхньої частини простору печі (120); і

30 засоби охолодження та збирання (160, 161), розташовані нижче завантаженого металевого матеріалу, передбачені для конденсації та збирання водяної пари перед видаленням газів з простору печі (120) назад до атмосферного тиску, і

засоби постачання вуглецевмісного газу (171, 310, 320), виконані з можливістю постачання вуглецевмісного газу до верхньої частини простору печі (120); і тим, що пристрій керування (201) виконаний з можливістю керування засобами постачання вуглецевмісного газу (171, 310, 320), щоб постачати вуглецевмісний газ перед видаленням газів з простору печі (120) назад до атмосферного тиску, так що нагрітий і відновлений металевий матеріал вуглецюється вказаним вуглецевмісним газом.

40 29. Система (100, 200) за п. 28, яка **відрізняється** тим, що додатково містить датчик тиску (123, 124), виконаний з можливістю вимірювання тиску всередині простору печі (120), і тим, що пристрій керування (201) виконаний з можливістю керування засобами постачання теплоти та водню (171, 280, 290), щоб постачати газоподібний водень до досягнення стаціонарного стану тиску.

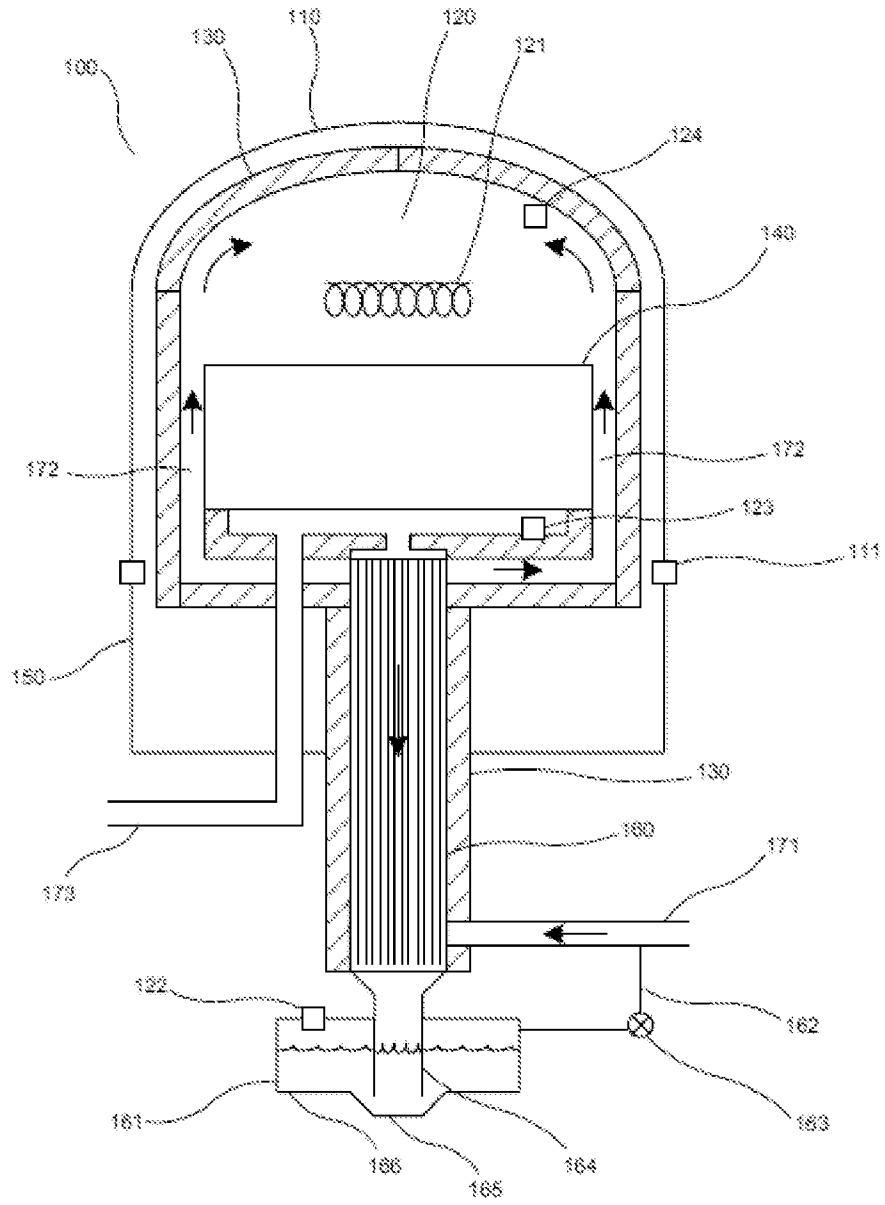


Fig. 1a

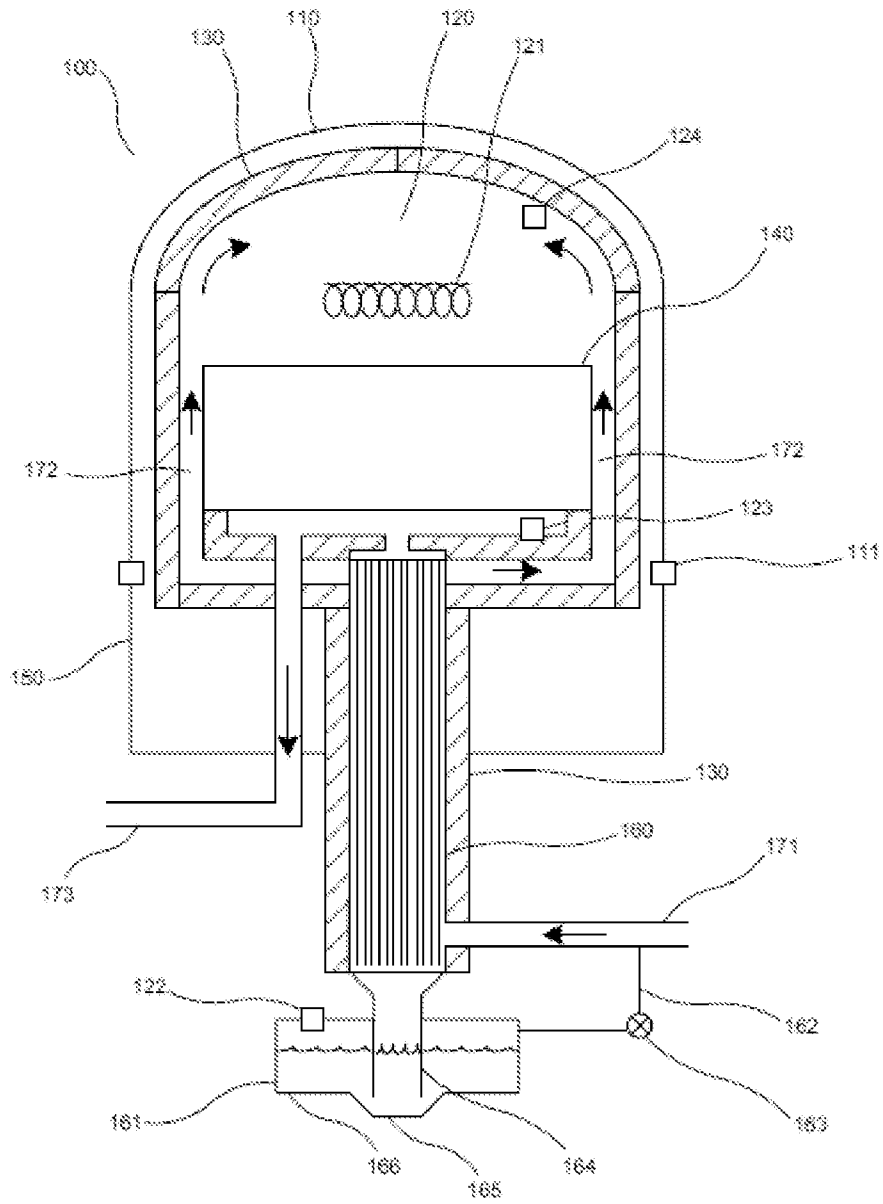


Fig. 1b

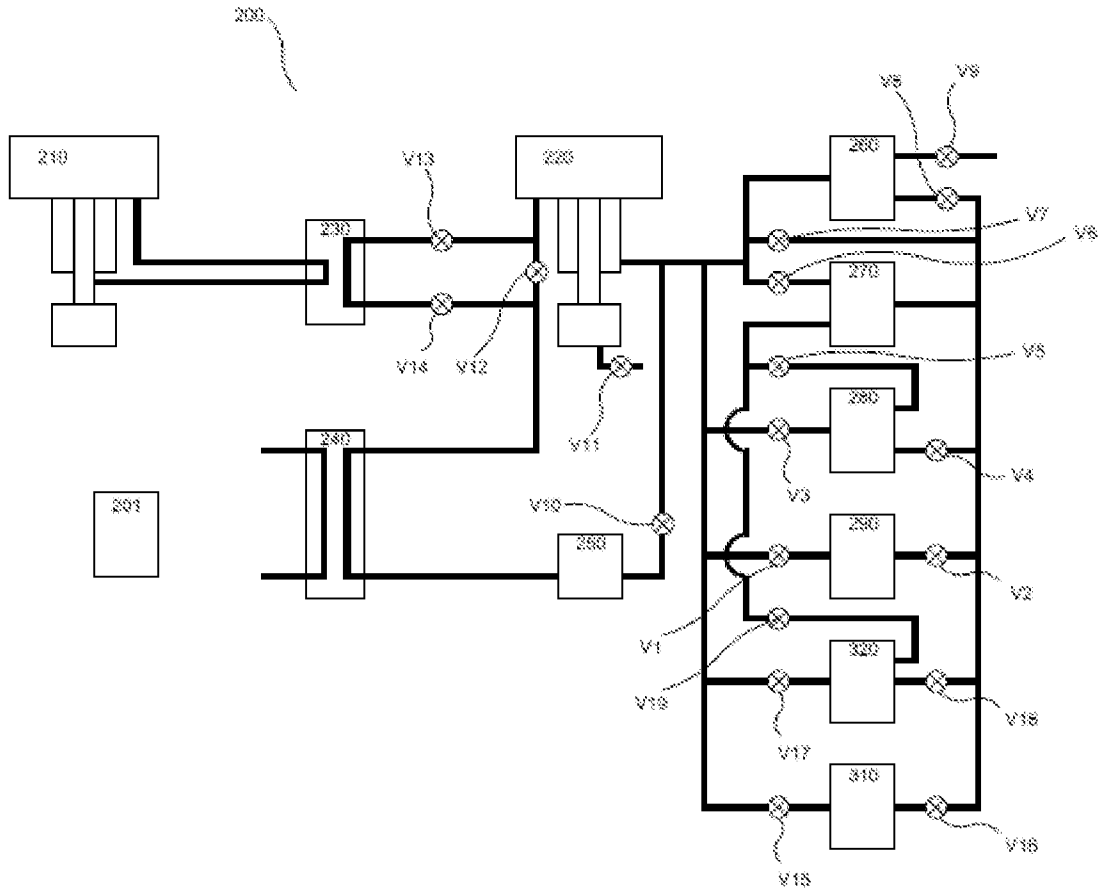
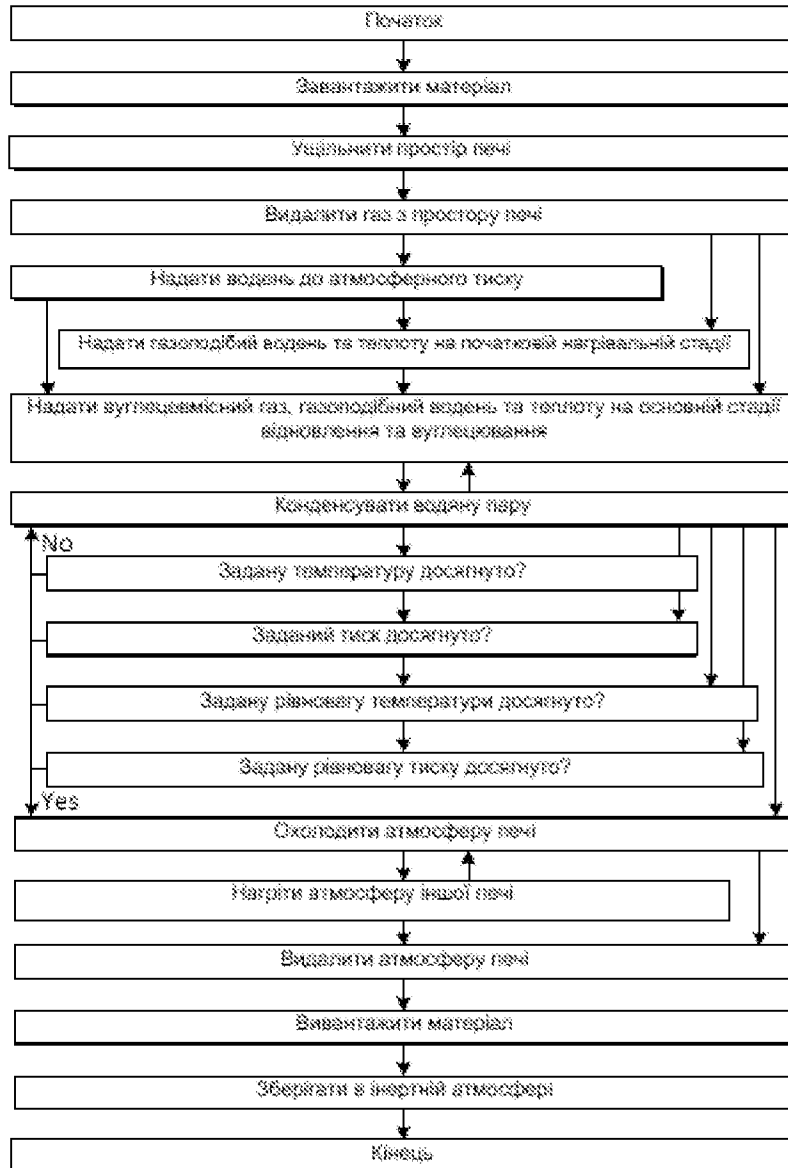
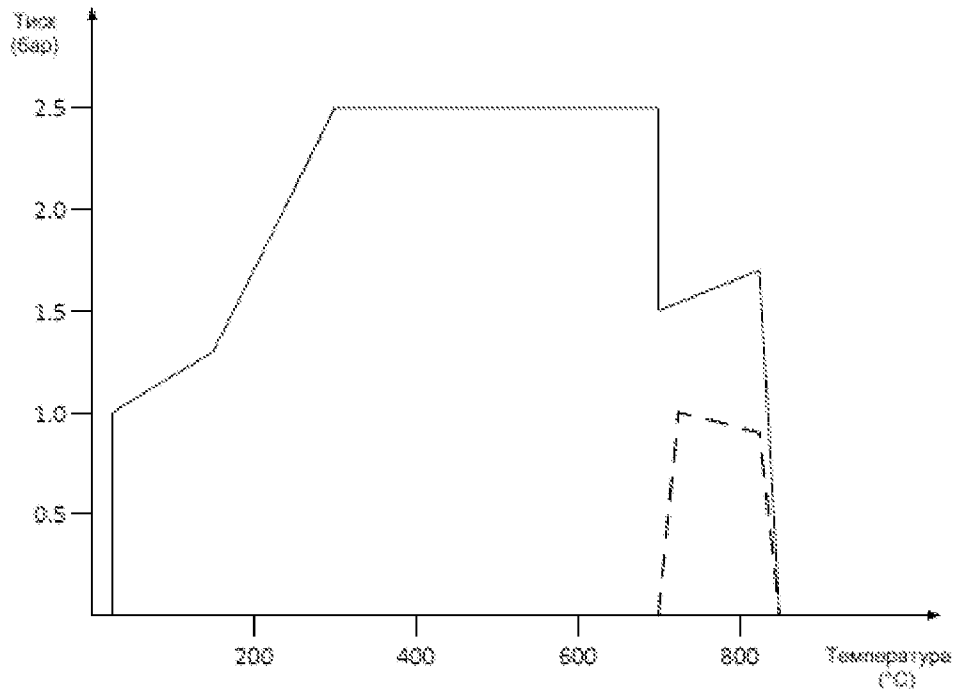


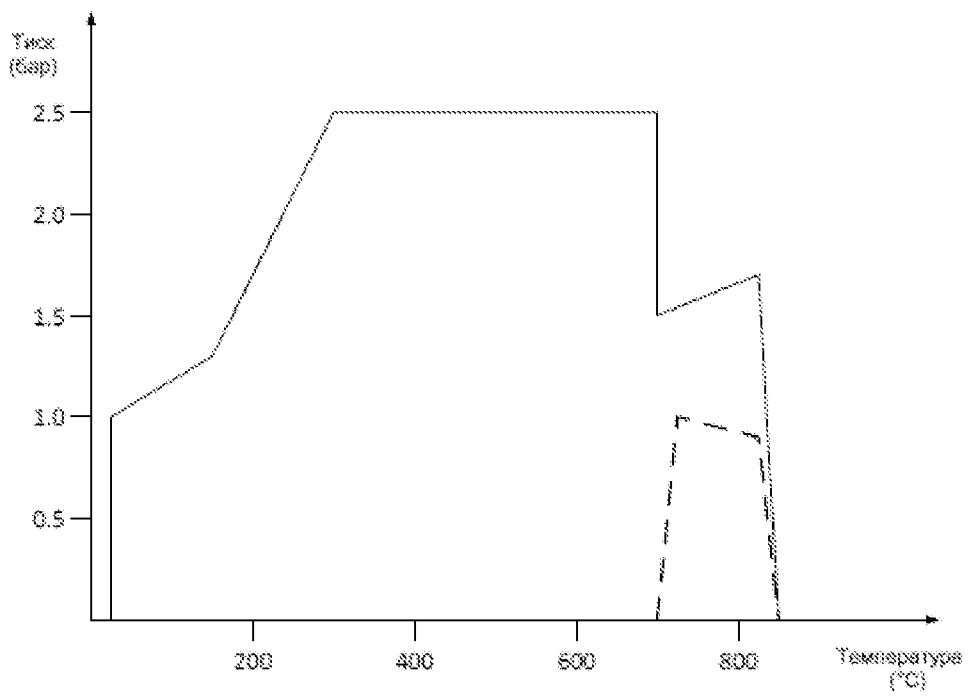
Fig. 2



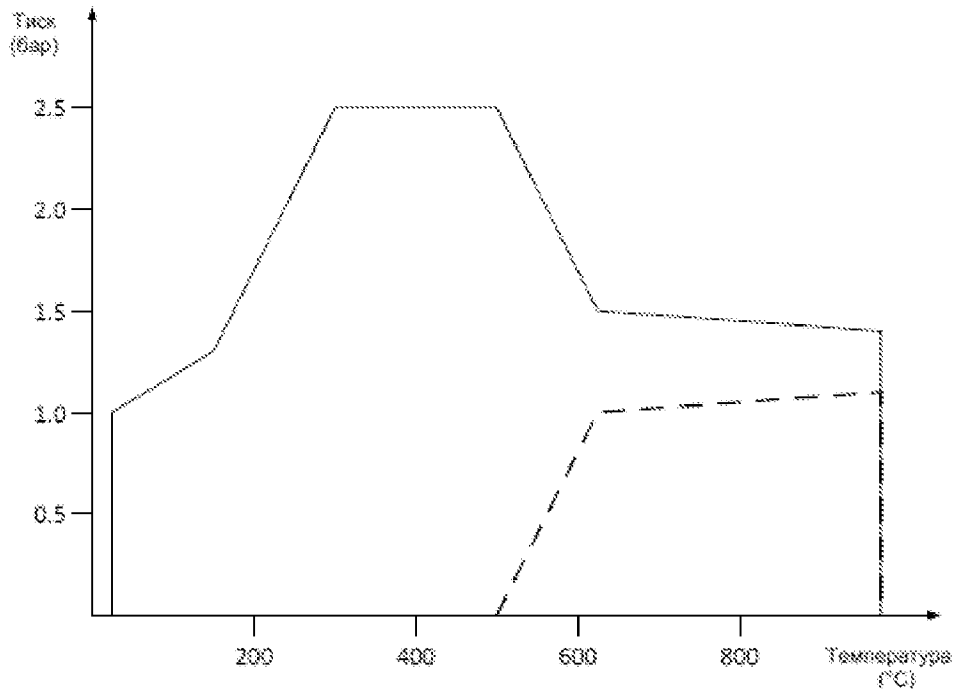
Фіг. 3



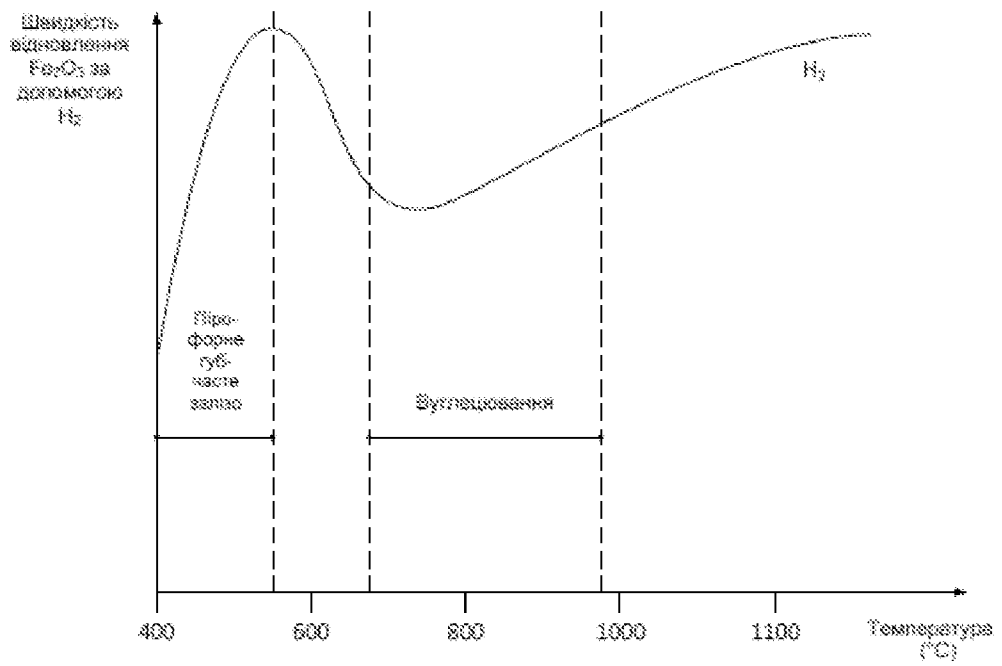
Фиг. 4а



Фиг. 4б



Фиг. 4с



Фиг. 5