

СПОРІДНЕНІ ЗАЯВКИ

Дана заявка претендує на пріоритет на підставі попередньої заявки на патент США № 63/112539, озаглавленої "METHOD OF IRON ELECTRODE MANUFACTURE AND ARTICLES AND SYSTEMS THEREFROM", поданої 11 листопада 2020 р., і попередньої заявки на патент США № 63/193424, озаглавленої "METHOD OF IRON ELECTRODE MANUFACTURE AND ARTICLES AND SYSTEMS THEREFROM", поданої 26 травня 2021 р., повний зміст яких включений, тим самим, у даний документ за допомогою посилання для всіх цілей.

РІВЕНЬ ТЕХНІКИ

Технології накопичення та зберігання енергії відіграють все більше важливу роль в електромережах; на самому базовому рівні такі ресурси накопичення енергії забезпечують згладжування для кращої відповідності виробітку енергії та вимозі до мережі. Послуги, надавані пристроями накопичення енергії, є вигідними для електромереж у різних часових масштабах, від декількох мілісекунд до декількох років. У цей час є технології накопичення енергії, які можуть підтримувати накопичення енергії у масштабі часу від декількох мілісекунд до декількох годин, але існує потреба у системах довгочасного та понад-довгочасного накопичення енергії (у сукупності > 8 годин).

Залізо прямого відновлення (DRI) являє собою недорогу форму заліза, отриману шляхом відновлення залізної руди переважно до ступеня окиснення металу. Таке залізо доступне в основному у формі котунів або шматків з характерними розмірами від 6 до 16 мм, хоча розмір варіює залежно від котунів і шматків, що надходять у процес відновлення.

Залізні негативні електроди для застосування для накопичення енергії (тобто аноди для акумуляторних батарей) вимагають високих рівнів мікропористості (зазвичай більше приблизно 40 % за об'ємом), високих питомих площ поверхні (зазвичай більше приблизно 0,05 метра у квадраті на грам) та досить високих ступенів чистоти (зазвичай більше 80 % за масою заліза). Залізо прямого відновлення відповідає всім зазначеним вимогам до властивостей матеріалу при привабливому ціновому рівні.

Існують й інші способи виробництва високопористих залізновмісних матеріалів (наприклад, губчастого заліза), часто за досить привабливими цінами, для створення акумуляторних електродів. Таке губчасте залізо можна одержати у формі частинок. Зміст даного винаходу може бути в цілому корисним для консолідації будь-якого залізновмісного електродного матеріалу у формі частинок, який одержить переваги завдяки створенню електричних зв'язків між частинками, для застосування в акумуляторних батареях. Надалі термін "пористе залізо у формі частинок" використовують для опису будь-якого такого матеріалу з високими рівнями мікропористості, який можна з користю розмістити в електричному з'єднанні для одержання матеріалу для акумуляторної батареї.

Щоб функціонувати, акумуляторні електроди повинні бути як іонно-, так й електроннопровідними. Хоча форма частинок пористого заліза у формі частинок має переваги з погляду обігу із сипучими матеріалами й їх виробництва, розмір і форма частинок можуть створювати проблеми при прагненні створити електропровідну масу матеріалу при одночасному збереженні у значній мірі пористості та мікроструктури всередині пористого заліза у формі частинок. Тобто, перенос електронів через електроди на основі пористого заліза у формі частинок може бути утруднений настільки, що працездатність електрода обмежується переносом електронів через електрод через, наприклад, опору точкового контакту. У багатьох випадках перенос електронів через зазначені електроди можна поліпшити за рахунок відповідної комбінації провідних добавок, пресування до забезпечення більше низького опору контактів або інших способів. Однак зазначені способи підвищення електричної провідності всередині електрода та за його межами часто є досить дорогими, так що привабливі варіанти застосування залізних електродів більше не є технічно й економічно перспективними. Таким чином, існує потреба в економічно ефективних способах забезпечення електричних з'єднань між частинками пористого заліза у формі частинок для виготовлення залізних акумуляторних електродів.

Успішний спосіб з'єднання частинок усередині електрода не тільки дозволить одержати електропровідний електрод з низькою вартістю, але також призведе до одержання електрода з низькими витратами на впакування, низькими витратами на струмоприймач і забезпечить досить стійкий електрод, щоб акумуляторна батарея мала достатній термін служби для різних варіантів застосування. Способи, системи та вироби, описані у даному документі, мають унікальний потенціал для одночасної відповідності всім із перерахованих вимог.

Наведена вище загальна інформація забезпечує введення в різні аспекти даної області техніки, які можуть бути пов'язані з варіантами реалізації даного винаходу. Таким чином, описане вище обговорення забезпечує загальні принципи для кращого розуміння різних аспектів, розкритих у даному документі, та не повинно розглядатися як визнання відомого рівня техніки.

СУТНІСТЬ ВІНАХОДУ

Не обмежуючись якою-небудь конкретною теорією або моделлю реакційної здатності залізного електрода, можливі схеми окиснення залізних електродів у лужному електроліті можуть здійснюватися у відповідності з наступними двома стадіями реакції, а саме реакцією 1 і реакцією 2, наведеними нижче. Можливі додаткові або інші продукти реакції (один із яких описаний нижче в реакції 3), але характеристика зміни об'єму в результаті реакції може бути загальною для будь-якого продукту окиснення стосовно до металевого заліза.

Реакція 1: $\text{Fe} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$, $E^0 = -0,88$ В відносно SHE (стандартного водневого електрода)

Реакція 2: $3\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$, $E^0 = -0,76$ В відносно SHE

Реакція 3: $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{FeOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$, $E^0 = -0,61$ В відносно SHE

Різні варіанти реалізації включають залізновмісні електродні матеріали, залізні електроди та способи виготовлення зазначених залізновмісних електродних матеріалів і залізних електродів за допомогою термомеханічної обробки пористих залізновмісних матеріалів у формі частинок при підвищеній температурі. У загальному випадку, такі способи включають завантаження, подання або іншим способом розміщення пористого залізновмісного матеріалу у формі частинок у пристрій. До пористого залізновмісного матеріалу у формі частинок у пристрої можна прикладати тиск і/або тепло протягом певного періоду часу з формуванням електрода, що містить провідні з'єднання між частинками залізновмісного матеріалу у формі частинок. У деяких варіантах

реалізації зазначений пристрій дозволяє прикладати до зазначеного матеріалу одночасний тиск і підвищену температуру для створення міцних провідних з'єднань між частинками за допомогою металургійного зв'язування. Результатом такої термомеханічної обробки може бути матеріал, що складається з пористого заліза у формі частинок з металургійними з'єднаннями у точках контакту між частинками. Матеріал, отриманий за допомогою описаних способів, можна використовувати в якості компонента в акумуляторному електроді. Електроди, отримані таким способом, можуть мати низьку вартість, бути механічно стійкими, добре масштабованими для більших обсягів виробництва та мати високу продуктивність. Матеріали й електроди, отримані способами, описаними у даному документі, можуть особливо добре підходити для застосування у залізних акумуляторних батареях для накопичення енергії в масштабі мережі, забезпечуючи, тим самим, широкомасштабне впровадження поновлюваної енергії від переривчастих джерел енергії, таких як вітер і сонячна енергія. Електроди, отримані із застосуванням зазначених способів, можуть бути особливо привабливими при комерційному застосуванні для довгочасного накопичення енергії завдяки невеликій кількості деталей, необхідній в електродному складанні. При відповідних умовах обробки електроди, отримані із застосуванням зазначених способів, можуть не потребувати зовнішнього струмознімання або впакування, але скоріше можуть використовуватися в електрохімічній системі в якості готового до застосування складання з відповідною економією витрат на деталі та складання у порівнянні з традиційними конструкціями електродів. У деяких варіантах реалізації описані способи можна масштабувати до дуже високих обсягів виробництва за допомогою невеликих модифікацій існуючого виробничого встаткування, уже встановленого на сьогоднішній день, при цьому потенційні обсяги виробництва оцінюються в мільйони тонн у рік на одному підприємстві. Такий рівень продуктивності неможливо досягти іншими способами виготовлення акумуляторних електродів. Комбінація вартості, продуктивності та масштабованості запропонованих способів виготовлення забезпечує право на застосування зазначених акумуляторних електродів для накопичення енергії в масштабі від десятків до сотень гігават-годин при використанні існуючого виробничого встаткування, що надає швидкий шлях до дійсно масштабованого мережного накопичення енергії.

Різні варіанти реалізації можуть включати залізний електрод, що містить металургійно зв'язані частинки губчастого заліза, при цьому мікропористість всередині частинок губчастого заліза становить >50 об. %, і розмір частинок губчастого заліза становить >100 мкм.

КОРОТКИЙ ОПИС КРЕСЛЕНЬ

Прикладені креслення, які включені у даний документ і становлять частину даного опису даного винаходу, ілюструють типові варіанти реалізації формули винаходу та разом із загальним описом, наведеним вище, і докладним описом, наведеним нижче, служать для пояснення ознак формули винаходу.

На фіг. 1A-1C показано порівняння рівнів деформацій.

На фіг. 2 показаний варіант реалізації гарячого валкового пресування, в якому роблять механічно й електрично з'єднаний матеріал.

На фіг. 3A і 3B показаний приклад порівняння одномодального впакування з двомодальним упакуванням.

На фіг. 4 показані співвідношення товщини електрода, розміру котунів DRI та розміру шару.

На фіг. 5 наведена діаграма Елінгема для різних інших елементів.

Фіг. 6 являє собою діаграму стану "залізо-вуглець".

На фіг. 7, 8A і 8B показані приклади операцій інструментальної обробки і пресування для формування каналних електродів згідно з різними варіантами реалізації.

На фіг. 9 показаний приклад ролика із зубцями, який може підходити для застосування при формуванні каналного електрода згідно з різними варіантами реалізації.

На фіг. 10A і 10B показані зображення ілюстративного каналного електрода згідно з різними варіантами реалізації.

На фіг. 11A і 11B показані приклади текстурованих роликів і операцій з формування каналного електрода згідно з різними варіантами реалізації із застосуванням таких текстурованих роликів.

На фіг. 12A-12C показані зображення профілю одного з прикладів ріжучого або розділового елемента, застосовуваного для поділу листів сформованих електродів.

На фіг. 13 показаний приклад електродного з'єднання згідно з різними варіантами реалізації.

Фіг. 14 являє собою приклад способу нанесення структурного покриття згідно з різними варіантами реалізації.

На фіг. 15-23 показані різні ілюстративні системи, в яких можна використовувати один або більше аспектів різних варіантів реалізації як частини великомасштабних систем накопичення енергії.

ДОКЛАДНИЙ ОПИС ВИНАХОДУ

Різні варіанти реалізації будуть докладно описані з посиланням на прикладені графічні матеріали. Скрізь, де це можливо, у графічних матеріалах для позначення однакових або подібних деталей використані ті самі посилальні позиції. Посилання на конкретні приклади і варіанти реалізації призначені для ілюстративних цілей та не мають на увазі обмеження обсягу формули винаходу. Наведений нижче опис варіантів реалізації даного винаходу не призначений для обмеження винаходу даними варіантами реалізації, а скоріше для забезпечення фахівцю в даній області техніки можливості створювати і застосовувати даний винахід. Якщо не зазначено інше, прикладені графічні матеріали виконані не в масштабі.

У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, кімнатна температура становить 25 °C, а стандартні температура та тиск становлять 25 °C і 1 атмосферу. Якщо явно не зазначено інше, усі випробування, результати випробувань, фізичні властивості та значення, які залежать від температури, тиску або і того, й іншого, наведені при температурі та тиску стандартного навколишнього середовища.

У загальному випадку, якщо не зазначено інше, у контексті даного документа термін "приблизно" та символ "~" призначені для включення відхилення або діапазону $\pm 10\%$, експериментальної або інструментальної похибки, пов'язаної з одержанням заявленого значення, та переважно більшого із зазначених значень.

У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, мають на увазі, що перерахування діапазонів значень,

наведене у даному описі, просто служить в якості скороченого способу посилання окремо на кожне окреме значення, що попадає у зазначений діапазон. В описі даного винаходу, якщо не зазначено інше, кожне окреме значення в межах діапазону включене в опис винаходу, як якщо воно було окремо зазначене в описі даного винаходу.

У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, терміни %, мас. % і % мас. застосовуються взаємозамінно та відносяться до маси першого компонента у вигляді відсотка щодо маси всього, наприклад, складу, суміші, частинки, котуна, агломерату, матеріалу, структури або продукту. У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, "об'ємний %" і "% об." й аналогічні терміни відносяться до об'єму першого компонента у вигляді відсотка від об'єму всього, наприклад, складу, суміші, частинки, котуна, агломерату, матеріалу, структури або продукту.

У контексті даного документа термін "мікропористість" відноситься до матеріалу, що містить пори (тобто пористість) у масштабі характеристичної довжини, що становлять десятки мікрон або менше.

У контексті даного документа вираження "об. % мікропористості всередині частинок" відноситься до об'ємної частки тривимірного перколяційного порожнистого простору всередині частинки (тобто всередині геометричної оболонки частинки), який являє собою мікропористість. Після термомеханічної обробки такий термін використовують для позначення об'ємної частки тривимірного перколяційного порожнистого простору всередині області, зайнятого матеріалом вихідної частинки після деформації. Простіше говорячи, частинка деформується, але у більшості випадків, коли деформація не є особливо сильною, можна розумно ідентифікувати одну вихідну частинку. Об. % мікропористості всередині частинок після термомеханічної обробки являє собою відсоток порожнистого простору всередині ідентифікованої області вихідної частинки.

Наступні приклади наведені як ілюстрація різних варіантів реалізації даних систем і способів згідно з даним винаходом. Зазначені приклади призначені для ілюстративних цілей, можуть бути передбачуваними і не повинні розглядатися як обмежуючі, та не обмежують іншим способом обсяг даного винаходу.

Слід зазначити відсутність необхідності надавати або розглядати теорію, що лежить в основі нових і новаторських процесів, матеріалів, характеристик або інших корисних ознак і властивостей, які є предметом варіантів реалізації даного винаходу або пов'язані з ними. Проте, для подальшого розвитку даної області техніки в даному описі винаходу представлені різні теорії. Теорії, висунуті в даному описі винаходу, й якщо явно не зазначено інше, жодним чином не обмежують, не скорочують або не звужують обсяг домагань, надаваних заявленим винаходом. Такі теорії можуть не вимагатися або не застосовуватися на практиці для реалізації даного винаходу. Крім того, слід розуміти, що даний винахід може призвести до появи нових і раніше невідомих теорій, що пояснюють функціональні особливості варіантів реалізації способів, виробів, матеріалів, пристроїв і систем згідно з даним винаходом; при цьому такі пізніше розроблені теорії не повинні обмежувати обсяг домагань, надаваних даними винаходами.

Різні варіанти реалізації систем, устаткування, технологій, способів, видів діяльності й операцій, викладені в даному описі винаходу, можна використовувати для різних інших видів діяльності та в інших областях на додаток до викладених у даному документі. Крім того, такі варіанти реалізації, наприклад, можна застосовувати: з іншим устаткуванням або видами діяльності, які можуть бути розроблені у майбутньому; та з існуючим устаткуванням або видами діяльності, які можуть бути частково модифіковані на основі принципів даного опису даного винаходу. Крім того, різні варіанти реалізації та приклади, викладені в даному описі винаходу, можна використовувати один з одним, повністю або частково, та в інших і різних комбінаціях. Таким чином, конфігурації, представлені у різних варіантах реалізації в даному описі винаходу, можна використовувати один з одним. Наприклад, компоненти варіанта реалізації, що містить A, A' і B, і компоненти варіанта реалізації, що містить A'', C і D, можна використовувати один з одним у різних комбінаціях, наприклад, A, C, D і A, A'', C і D і т.д., відповідно до принципу опису даного винаходу. Таким чином, обсяг домагань, надаваних даним винаходом, не повинен обмежуватися конкретним варіантом реалізації, конфігурацією або компонуванням, описаними у конкретному варіанті реалізації, прикладі або у варіанті реалізації на конкретній фігурі.

У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, термін "питома вага", який також називають "гаданою щільністю", повинен мати своє саме широке можливе значення й у загальному випадку означає масу на одиницю об'єму структури, наприклад, об'ємної форми матеріалу. Дана властивість включає внутрішню пористість частинки як частина її об'єму. Крім інших способів, питому вагу можна вимірювати за допомогою рідини з низькою в'язкістю, яка змочує поверхню частинок.

У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, термін "фактична щільність", яку також можна назвати "дійсною щільністю", повинен мати своє саме широке можливе значення й у загальному випадку означає масу на одиницю об'єму матеріалу, коли у даному матеріалі відсутні порожнечі. Такий показник і властивість по суті виключають з матеріалу будь-яку внутрішню пористість, наприклад, зазначений термін не має на увазі ніяких порожнеч у матеріалі.

Таким чином, для ілюстрації взаємозв'язку між зазначеними трьома характеристиками щільності можна використовувати набір пористих пінопластових кульок (наприклад, кульок Nerf®). Маса кульок, що заповнюють контейнер, являє собою насипну щільність для кульок:

$$\text{Насипна щільність} = \frac{\text{маса кульок}}{\text{об'єм заповненого контейнера}}$$

Маса однієї кульки на сферичний об'єм кульки являє собою її гадану щільність:

$$\text{Гадана щільність} = \frac{\text{маса однієї кульки}}{\text{об'єм даної кульки}}$$

Маса матеріалу, що становить кістяк кульки, тобто кульки з усім вилученим об'ємом порожнеч, на об'єм, що залишився, даного матеріалу являє собою кістякову щільність:

$$\text{Кістякова щільність} = \frac{\text{маса матеріалу}}{\text{об'єм матеріалу без порожнеч}}$$

У контексті даного документа, якщо не зазначено інше, термін "агломерат" і "агрегат" повинен мати своє саме широке можливе значення й у загальному випадку означає скупчення частинок у порошок.

Варіанти реалізації даного винаходу включають пристрої, системи та способи для довгочасного та понад-довгочасного низьковитратного накопичення енергії. У даному описі терміни "довгочасний", "понад-довгочасний" й аналогічні такі терміни, якщо явно не зазначено інше, повинні мати своє саме широке можливе значення та включають періоди накопичення енергії, що становлять 8 годин або більше, наприклад, періоди накопичення енергії протягом 8 годин, періоди накопичення енергії від 8 до 20 годин, періоди накопичення енергії протягом 20 годин, періоди накопичення енергії від 20 годин до 24 годин, періоди накопичення енергії протягом 24 годин, періоди накопичення енергії від 24 годин до тижня, періоди накопичення енергії від тижня до року (наприклад, від декількох днів до декількох тижнів або декількох місяців) і т.д., при цьому зазначені терміни включають системи LODES (системи більше довгочасного накопичення енергії). Крім того, якщо явно не зазначено інше, терміни "довгочасний" і "понад-довгочасний", "гнізда для накопичення енергії", в тому числі "електрохімічні гнізда" й аналогічні терміни, повинні мати своє саме широке можливе тлумачення; та включають електрохімічні гнізда, які можна виконати з можливістю накопичення енергії протягом декількох днів, тижнів або сезонів.

У загальному випадку, в одному з варіантів реалізації гніздо для довгочасного накопичення енергії може являти собою електрохімічне гніздо з тривалим терміном служби. У загальному випадку, таке електрохімічне гніздо з тривалим терміном служби може накопичувати електроенергію, вироблювану електрогенеруючою системою, коли: (i) джерело енергії або паливо для такої генерації є доступним, широко розповсюдженим, недорогим, а також їх комбінації та варіанти; (ii) коли необхідні потужності або потреби в електроенергії з боку електромережі, споживача або іншого користувача менші, ніж кількість електроенергії, вироблюваної електрогенеруючою системою, ціна, сплачена за надання такої енергії мережі, споживачу або іншому користувачу, перебуває нижче економічно ефективного рівня для виробітку такої енергії (наприклад, вартість виробництва перевищує ринкову ціну на електроенергію), а також їх комбінації та варіанти; і (iii) мають місце комбінації та варіанти (i) і (ii), а також інші причини. Потім таку електроенергію, накопичену в електрохімічному гнізді з тривалим терміном служби, можна розподіляти за мережею, споживачу або іншому користувачу у періоди, коли це економічно вигідно або необхідно з інших причин. Наприклад, електрохімічні гнізда можна виконати з можливістю накопичення енергії, вироблюваної сонячними елементами у літні місяці, коли багато сонячного світла та виробіток сонячної енергії перевищує потреби електромережі, та з можливістю виділення накопиченої енергії у зимові місяці, коли сонячного світла може бути недостатньо для задоволення потреби електромережі.

Обговорюються різні варіанти реалізації відносно застосування заліза прямого відновлення (DRI) в якості матеріалу для акумуляторної батареї (або гнізда), в якості компонента акумуляторної батареї (або гнізда), а також їх комбінації та варіанти. У різних варіантах реалізації DRI можна одержати з матеріалу або може являти собою матеріал, отриманий в результаті відновлення природних або перероблених залізних руд, при цьому таке відновлення здійснюють без досягнення температури плавлення заліза. У різних варіантах реалізації залізна руда може являти собою таконіт, або магнетит, або гематит, або гетит і т.д. У різних варіантах реалізації DRI може бути присутнім у вигляді котунів, які можуть бути сферичними або по суті сферичними. У різних варіантах реалізації DRI може бути пористим, мати відкрити та/або закрити внутрішню пористість. У різних варіантах реалізації DRI може містити матеріали, які були додатково оброблені за допомогою гарячого або холодного брикетування. У різних варіантах реалізації DRI можна одержати шляхом відновлення залізрудних котунів з одержанням більше металевого (більше відновленого, менше сильно окисненого) матеріалу, такого як металеве залізо (Fe^0), вюстит (FeO) або композиційний котун, що містить металеве залізо та залишкові оксидні фази. У різних необмежуваних варіантах реалізації DRI може являти собою відновлений залізрудний таконіт, таконіт прямого відновлення ("DR"), відновлені котуни "рівня доменної печі (BF)", відновлені котуни "рівня електродугової печі (EAF)", котуни "заліза холодного прямого відновлення (CDRI)", котуни DRI, гаряче брикетоване залізо (HBI) або будь-яку їхню комбінацію. У чорній металургії DRI іноді називають "губчастим залізом"; така практика особливо поширена в Індії. Варіанти реалізації залізовмісних матеріалів, у тому числі, наприклад, варіанти реалізації матеріалів із заліза прямого відновлення, для застосування у різних варіантах реалізації, описаних у даному документі, в тому числі в якості електродних матеріалів, можуть мати одну, більше однієї або всі властивості матеріалу, наведені нижче в таблиці 1. В описі даного винаходу, в тому числі в таблиці 1, наведені нижче терміни мають наступні значення, якщо явно не зазначено інше: "Питома площа поверхні" означає загальну площу поверхні матеріалу на одиницю маси, яка включає площу поверхні пор у пористій структурі; "вміст вуглецю" або "вуглець (% мас.)" означає масу загального вуглецю у відсотках щодо загальної маси заліза прямого відновлення; "вміст цементиту" або "цементит (% мас.)" означає масу Fe_3C у відсотках щодо загальної маси заліза прямого відновлення; "загальний вміст Fe (% мас.)" означає масу всього заліза у відсотках щодо загальної маси заліза прямого відновлення; "вміст металевого Fe (% мас.)" означає масу заліза в стані Fe^0 у відсотках щодо загальної маси заліза прямого відновлення; та "металізація" означає масу заліза в стані Fe^0 у відсотках щодо загальної маси заліза. У контексті даного документа мають на увазі, що масові й об'ємні відсотки і гадані щільності виключають будь-який електроліт, що містить інфільтровані пори або летучі добавки всередині пористості, якщо не зазначено інше.

Властивість матеріалу	Діапазон варіантів реалізації
Питома площа поверхні*	0,01-25 м ² /г
Фактична щільність**	4,6-7,1 г/см ³
Гадана щільність***	2,3-6,5 г/см ³
Мінімальний d _{пор, 90 % об'єму} ****	10 нм-50 мкм
Мінімальний d _{пор, 50 % площі поверхні} *****	1 нм-15 мкм
Загальний вміст Fe (% мас.) [#]	65-95 %
Металевий Fe (% мас.) ^{##}	46-90 %
Металізація (%) ^{###}	59-96 %
Вуглець (% мас.) ^{####}	0-5 %
Fe ²⁺ (% мас.) ^{#####}	1-9 %
Fe ³⁺ (% мас.) ^{\$}	0,9-25 %
SiO ₂ (% мас.) ^{\$\$}	1-15 %
Ферит (% мас., XRD) ^{\$\$\$}	22-97 %
Вюстит (FeO, % мас., XRD) ^{\$\$\$\$}	0-13 %
Гетит (FeOOH, % мас., XRD) ^{\$\$\$\$\$}	0-23 %
Цементит (Fe ₃ C, % мас., XRD) ⁺	<< 80 %

*Питома площа поверхні, переважно обумовлена за допомогою адсорбційного способу Брунауера-Еммета-Телера ("БЕТ") як БЕТ і більше переважно, як викладено в ISO 9277 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами визначення БЕТ, можна використовувати інші випробування, такі як фарбування метиленовим синім (MB), адсорбція монометилового ефіру етиленгліколю (EGME), електрокінетичний аналіз адсорбції комплексних іонів і спосіб відкладання білків (PR).

**Фактична щільність, переважно обумовлена за допомогою гелієвої (He) пікнометрії та більше переважно, як викладено в ISO 12154 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. У даній області техніки фактичну щільність також можна називати "дійсною щільністю" або "кістяковою щільністю".

***Гадана щільність, переважно обумовлена шляхом занурення у воду та більше переважно, як викладено в ISO 15968 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. Пористість можна визначити як відношення гаданої щільності до фактичної щільності:

$$\text{Пористість} = \frac{\text{гадана щільність}}{\text{фактична щільність}}$$

****d_{пор, 90 % об'єму}, переважно обумовлений із застосуванням ртутної (Hg) порозиметрії та більше переважно, як викладено в ISO 15901-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами Hg-порозиметрії, можна використовувати й інші випробування, такі як адсорбція газу. d_{пор, 90 % об'єму} являє собою діаметр пор, вище якого присутні 90 % від загального об'єму пор.

*****d_{пор, 50 % площі поверхні}, переважно обумовлений із застосуванням ртутної (Hg) порозиметрії та більше переважно, як викладено в ISO 15901-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами Hg-порозиметрії, можна використовувати й інші випробування, такі як адсорбція газу. d_{пор, 50 % площі поверхні} являє собою діаметр пор, вище якого перебувають 50 % від площі вільної поверхні.

[#]Загальний вміст Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою біхроматної титриметрії та більше переважно, як викладено в ASTM E246-10 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з біхроматною титриметрією, можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду олова(II), титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду титану(III), спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP).

^{##}Вміст металевого Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою титриметрії із застосуванням хлориду заліза(III) та більше переважно, як викладено в ISO 16878 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з титриметрією із застосуванням хлориду заліза(III), можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрію із застосуванням бром-метанолу.

^{###}Металізація (%), переважно обумовлена по відношенню до вмісту металевого Fe до загального вмісту Fe, кожен з яких переважно визначають із застосуванням раніше описаних способів.

^{####}Вміст вуглецю (% мас.), переважно обумовлений за допомогою поглинання інфрачервоного випромінювання після спалювання в індукційній печі та більше переважно, як викладено в ISO 9556 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з поглинанням інфрачервоного випромінювання після спалювання в індукційній печі, можна використовувати й інші випробування, такі як різні способи спалювання та плавлення в інертному газі, наприклад, описані в ASTM E1019-18.

^{#####}Вміст Fe²⁺ (% мас.), переважно обумовлений за допомогою титриметрії та більше переважно, як

викладено в ASTM D3872-05 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з титриметрією, можна використовувати й інші випробування, такі як месбауєровська спектроскопія, рентгенівська абсорбційна спектроскопія та т.д.

^{\$}Вміст Fe³⁺ (% мас.), переважно обумовлений по співвідношенню балансу маси між загальним вмістом Fe (% мас.), вмістом металевого Fe (% мас.), вмістом Fe²⁺ (% мас.) і вмістом Fe³⁺ (% мас.). Зокрема, рівність Загальний вміст Fe (% мас.) = вміст металевого Fe (% мас.) + вміст Fe²⁺ (% мас.) + вміст Fe³⁺ (% мас.) повинно виконуватися за рахунок збереження маси, тому вміст Fe³⁺ (% мас.) можна розрахувати, як вміст Fe³⁺ (% мас.) = загальний вміст Fe (% мас.) – вміст металевого Fe (% мас.) – вміст Fe²⁺ (% мас.).

^{\$\$}Вміст SiO₂ (% мас.), переважно обумовлений за допомогою гравіметричних способів і більше переважно, як викладено в ISO 2598-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з гравіметричними способами, можна використовувати й інші випробування, такі як спектрофотометричні способи із застосуванням відновленого молібдосилікату, рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст SiO₂ у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Si (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. SiO₂ на основі стехіометрії SiO₂; тобто припускають, що молярне відношення Si:O становить 1:2.

^{\$\$\$}Вміст фериту (% мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

^{\$\$\$\$}Вміст вюститу (FeO, % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

^{\$\$\$\$\$}Вміст гетиту (FeOOH, % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

⁺Вміст цементиту ((Fe₃C, % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

Крім того, варіанти реалізації залізовмісних матеріалів, у тому числі, наприклад, варіанти реалізації матеріалів із заліза прямого відновлення, для застосування у різних варіантах реалізації, описаних в даному описі, в тому числі в якості електродних матеріалів, можуть мати одну або більше з наступних властивостей, ознак або характеристик (з урахуванням того, що значення з одного рядка або одного стовпця можуть бути присутніми зі значеннями у різних рядках або стовпцях), як зазначено в таблиці 2.

Таблиця 2

Загальний вміст Fe (% мас.) ¹	> 60 %	> 70 %	> 80 %	~83-94 %
SiO ₂ (% мас.) ^{II}	< 12 %	< 7,5 %	1-10 %	1,5-7,5 %
Al ₂ O ₃ (% мас.) ^{III}	< 10 %	< 5 %	0,2-5 %	0,3-3 %
MgO (% мас.) ^{IIII}	< 10 %	< 5 %	0,1-10 %	0,25-2 %
CaO (% мас.) ^{IIIII}	< 10 %	< 5 %	0,9-10 %	0,75-2,5 %
TiO ₂ (% мас.) ⁶	< 10 %	< 2,5 %	0,05-5 %	0,25-1,5 %
Розмір (найбільша відстань у поперечному перерізі, наприклад, діаметр для сфери)	< 200 мм	~ 50 - ~ 150 мм	~2 - ~30 мм	~4 - ~20 мм
Фактична щільність (г/см ³) ^{8&}	~ 5	~5,8 - ~6,2	~4,0 - ~6,5	< 7,8
Гадана щільність (г/см ³) ^{8&&}	< 7,8	> 5	> 4	3,4 ~ 3,6
Насипна щільність (кг/м ³) ^{8&&&}	< 7	> 1,5	~2,4 - ~3,4	~1,5 - ~2,0
Пористість (%) ^{8&&&&}	> 15 %	> 50 %	~ 20 % - ~90 %	~50 % - ~70 %

¹Загальний вміст Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою біхроматної титриметрії та більше переважно, як викладено в ASTM E246-10 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з біхроматною титриметрією, можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду олова(II), титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду титану(III), спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP).

^{II}Вміст SiO₂ (% мас.), переважно обумовлений за допомогою гравіметричних способів і більше переважно, як викладено в ISO 2598-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з гравіметричними способами, можна використовувати й інші випробування, такі як спектрофотометричні способи із застосуванням відновленого молібдосилікату, рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст SiO₂ у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Si (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) та розраховують % мас. SiO₂ на основі стехіометрії SiO₂; тобто припускають, що молярне відношення Si:O становить 1:2.

^{III}Вміст Al₂O₃ (% мас.), переважно обумовлений за допомогою способу полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії та більше переважно, як викладено в ISO 4688-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати зі способом полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії, можна використовувати й інші випробування, такі як рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст Al₂O₃ у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Al (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. Al₂O₃ на основі стехіометрії Al₂O₃; тобто припускають, що молярне відношення Al:O становить 2:3.

^{IIII}Вміст MgO (% мас.), переважно обумовлений за допомогою способу полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії та більше переважно, як викладено в ISO 10204 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати зі способом полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії, можна використовувати й інші випробування, такі як рентгенівська

дифракція (XRD). У деяких способах вміст MgO у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Mg (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. MgO на основі стехіометрії MgO; тобто припускають, що молярне відношення Mg:O становить 1:1.

!!!!Вміст CaO (% мас.), переважно обумовлений за допомогою способу полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії та більше переважно, як викладено в ISO 10203 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати зі способом полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії, можна використовувати й інші випробування, такі як рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст CaO у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Ca (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. CaO на основі стехіометрії CaO; тобто припускають, що молярне відношення Ca:O становить 1:1.

®Вміст TiO₂ (% мас.), переважно обумовлений за допомогою спектрофотометричного способу із застосуванням діантипірилметану та більше переважно, як викладено в ISO 4691 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати зі спектрофотометричним способом із застосуванням діантипірилметану, можна використовувати й інші випробування, такі як рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст TiO₂ у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Ti (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. TiO₂ на основі стехіометрії TiO₂; тобто припускають, що молярне відношення Ti:O становить 1:2.

®®Фактична щільність, переважно обумовлена за допомогою гелієвої (He) пікнометрії та більше переважно, як викладено в ISO 12154 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. У даній області техніки фактичну щільність також можна називати "дійсною щільністю" або "кістяковою щільністю".

®®®Гадана щільність, переважно обумовлена шляхом занурення у воду та більше переважно, як викладено в ISO 15968 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування.

®®®®Насипна щільність (кг/м³), переважно обумовлена шляхом вимірювання маси досліджуваної проби, що вводиться в контейнер відомого об'єму до тих пір, поки його поверхня не стане рівною, та більше переважно, як викладено в способі 2 документа ISO 3852 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати зі способом вимірювання маси, можна використовувати й інші випробування.

®®®®®Пористість, переважно обумовлена по відношенню до гаданої щільності до фактичної щільності:

$$\text{Пористість} = \frac{\text{гадана щільність}}{\text{фактична щільність}}$$

Властивості, наведені в таблиці 1, також можуть бути присутніми у варіантах реалізації разом із властивостями, наведеними в таблиці 2, на додаток до таких властивостей або замість них. У різних варіантах реалізації також можуть бути присутніми більші та менші значення зазначених властивостей.

У варіантах реалізації питома площа поверхні котунів може становити від приблизно 0,05 м²/г до приблизно 35 м²/г, від приблизно 0,1 м²/г до приблизно 5 м²/г, від приблизно 0,5 м²/г до приблизно 10 м²/г, від приблизно 0,2 м²/г до приблизно 5 м²/г, від приблизно 1 м²/г до приблизно 5 м²/г, від приблизно 1 м²/г до приблизно 20 м²/г, більше приблизно 1 м²/г, більше приблизно 2 м²/г, менше приблизно 5 м²/г, менше приблизно 15 м²/г, менше приблизно 20 м²/г й їх комбінації та варіанти, а також більші та менші значення.

У загальному випадку, залізорудні котуни одержують за допомогою дроблення, подрібнювання або перемелювання залізної руди до дрібнодисперсної порошкової форми, яку потім концентрують шляхом видалення домішкових фаз (так званої "порожньої породи"), які виділяються при операції подрібнювання. У загальному випадку, в міру подрібнювання руди до більше дрібнодисперсних (більше дрібних) частинок чистота отриманого концентрату підвищується. Потім концентрат формують в котуни за допомогою процесу окомкування або окомкування (із застосуванням, наприклад, барабанного або тарілкового окомкувача). У загальному випадку, для одержання рудних котунів із більше високим ступенем чистоти потрібно більше витрат енергії. Залізорудні котуни, як правило, поставляють на ринок або продають за двома основними категоріями: котуни рівня доменної печі (BF) та котуни прямого відновлення (рівень DR) (також іноді згадуються як котуни рівня електродугової печі (EAF)), при цьому основна відмінність полягає у вмісті SiO₂ й інших домішкових фаз, який вище у котунах рівня BF у порівнянні з котунами рівня DR. Типовими основними характеристиками котунів або сировини рівня DR є загальний вміст Fe у масових відсотках у діапазоні від 63 до 69 % мас., наприклад 67 % мас., і вміст SiO₂ у масових відсотках менше 3 % мас., наприклад 1 % мас. Типовими основними характеристиками котунів або сировини рівня BF є загальний вміст Fe у масових відсотках у діапазоні від 60 до 67 % мас., наприклад 63 % мас., і вміст SiO₂ у масових відсотках у діапазоні від 2 до 8 % мас., наприклад 4 % мас.

У певних варіантах реалізації DRI можна одержати шляхом відновлення котунів "доменної печі", у цьому випадку отримане DRI може мати властивості матеріалу, наведені нижче в таблиці 3. Застосування відновленого DRI рівня BF може мати перевагу завдяки меншій кількості споживаної енергії, необхідній для одержання котунів, що призводить до більше низької вартості готового матеріалу.

Таблиця 3

Властивість матеріалу	Діапазон варіантів реалізації
Питома площа поверхні*	0,21-25 м ² /г

Фактична щільність**	5,5-6,7 г/см ³
Гадана щільність***	3,1-4,8 г/см ³
Мінімальний d _{пор} , 90 % об'єму****	50 нм-50 мкм
Мінімальний d _{пор} , 50 % площі поверхні*****	1 нм-10 мкм
Загальний вміст Fe (% мас.)#	81,8-89,2 %
Металевий Fe (% мас.)##	68,7-83,2 %
Металізація (%)###	84-95 %
Вуглець (% мас.)####	0,03-0,35 %
Fe ²⁺ (% мас.)#####	2-8,7 %
Fe ³⁺ (% мас.)\$	0,9-5,2 %
SiO ₂ (% мас.)\$\$	3-7 %
Ферит (% мас., XRD)\$\$\$	80-96 %
Вюстит (FeO, % мас., XRD)\$\$\$\$	2-13 %
Гетит (FeOOH, % мас., XRD)\$\$\$\$\$	0-11 %
Цементит (Fe ₃ C, % мас., XRD)*	0-80 %

*Питома площа поверхні, переважно обумовлена за допомогою адсорбційного способу Брунауера-Еммета-Телера ("БЕТ") як БЕТ і більше переважно, як викладено в ISO 9277 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами визначення БЕТ, можна використовувати інші випробування, такі як фарбування метиленовим синім (MB), адсорбція монометилового ефіру етиленгліколю (EGME), електрокінетичний аналіз адсорбції комплексних іонів і спосіб відкладання білків (PR).

**Фактична щільність, переважно обумовлена за допомогою гелієвої (He) пікнометрії та більше переважно, як викладено в ISO 12154 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. У даній області техніки фактичну щільність також можна називати "дійсною щільністю" або "кістяковою щільністю".

***Гадана щільність, переважно обумовлена шляхом занурення у воду та більше переважно, як викладено в ISO 15968 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. Пористість можна визначити як відношення гаданої щільності до фактичної щільності:

$$\text{Пористість} = \frac{\text{гадана щільність}}{\text{фактична щільність}}$$

****d_{пор}, 90 % об'єму переважно обумовлений із застосуванням ртутної (Hg) порозиметрії та більше переважно, як викладено в ISO 15901-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами Hg-порозиметрії, можна використовувати й інші випробування, такі як адсорбція газу. d_{пор}, 90 % об'єму являє собою діаметр пор, вище якого присутні 90 % від загального об'єму пор.

*****d_{пор}, 50 % площі поверхні переважно обумовлений із застосуванням ртутної (Hg) порозиметрії та більше переважно, як викладено в ISO 15901-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами Hg-порозиметрії, можна використовувати й інші випробування, такі як адсорбція газу. d_{пор}, 50 % площі поверхні являє собою діаметр пор, вище якого перебувають 50 % від площі вільної поверхні.

#Загальний вміст Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою біхроматної титриметрії та більше переважно, як викладено в ASTM E246-10 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з біхроматною титриметрією, можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду олова(II), титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду титану(III), спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP).

##Вміст металевого Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою титриметрії із застосуванням хлориду заліза(III) та більше переважно, як викладено в ISO 16878 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з титриметрією із застосуванням хлориду заліза(III), можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрію із застосуванням бром-метанолу.

###Металізація (%), переважно обумовлена по відношенню до вмісту металевого Fe до загального вмісту Fe, кожне з яких переважно визначають із застосуванням раніше описаних способів.

####Вміст вуглецю (% мас.), переважно обумовлений за допомогою поглинання інфрачервоного випромінювання після спалювання в індукційній печі та більше переважно, як викладено в ISO 9556 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з поглинанням інфрачервоного випромінювання після спалювання в індукційній печі, можна використовувати й інші випробування, такі як різні способи спалювання та плавлення в інертному газі, наприклад, описані в ASTM E1019-18.

#####Вміст Fe²⁺ (% мас.), переважно обумовлений за допомогою титриметрії та більше переважно, як викладено в ASTM D3872-05 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з титриметрією, можна використовувати й інші

випробування, такі як месбауерівська спектроскопія, рентгенівська абсорбційна спектроскопія та т.д.

*Вміст Fe^{3+} (% мас.), переважно обумовлений по співвідношенню балансу маси між загальним вмістом Fe (% мас.), вмістом металевого Fe (% мас.), вмістом Fe^{2+} (% мас.) і вмістом Fe^{3+} (% мас.). Зокрема, рівність Загальний вміст Fe (% мас.) = вміст металевого Fe (% мас.) + вміст Fe^{2+} (% мас.) + вміст Fe^{3+} (% мас.) повинно виконуватися за рахунок збереження маси, тому вміст Fe^{3+} (% мас.) можна розрахувати, як вміст Fe^{3+} (% мас.) = загальний вміст Fe (% мас.) – вміст металевого Fe (% мас.) – вміст Fe^{2+} (% мас.).

**Вміст SiO_2 (% мас.), переважно обумовлений за допомогою гравіметричних способів і більше переважно, як викладено в ISO 2598-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з гравіметричними способами, можна використовувати й інші випробування, такі як спектрофотометричні способи із застосуванням відновленого молібдосилікату, рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст SiO_2 у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Si (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. SiO_2 на основі стехіометрії SiO_2 ; тобто припускають, що молярне відношення Si:O становить 1:2.

\$\$\$Вміст фериту (% мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

\$\$\$\$Вміст вюститу (FeO , % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

*****Вміст гетиту (FeOOH , % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

+Вміст цементиту (Fe_3C , % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

Властивості, наведені в таблиці 3, також можуть бути присутніми у варіантах реалізації разом із властивостями, наведеними в таблицях 1 і/або 2, на додаток до таких властивостей або замість них. У різних варіантах реалізації також можуть бути присутніми більші та менші значення зазначених властивостей.

У певних варіантах реалізації DRI можна одержати шляхом відновлення котунів рівня DR, у цьому випадку отримане DRI може мати властивості матеріалу, описані нижче в таблиці 4. Застосування відновленого DRI рівня DR може мати перевагу завдяки більше високому вмісту Fe в котуні, що збільшує щільність енергії акумуляторної батареї.

Таблиця 4

Властивість матеріалу	Діапазон варіантів реалізації
Питома площа поверхні*	0,1-0,7 м ² /г у стані поставки або 0,19-25 м ² /г після виконання стадії формування попереднього заряду
Фактична щільність**	4,6-7,1 г/см ³
Гадана щільність***	2,3-5,7 г/см ³
Мінімальний $d_{\text{пор}}$, 90 % об'єму****	50 нм-50 мкм
Мінімальний $d_{\text{пор}}$, 50 % площі поверхні*****	1 нм-10 мкм
Загальний вміст Fe (% мас.)#	80-94 %
Металевий Fe (% мас.)##	64-94 %
Металізація (%)###	80-100 %
Вуглець (% мас.)####	0-5 %
Fe^{2+} (% мас.)#####	0-8 %
Fe^{3+} (% мас.)\$	0-10 %
SiO_2 (% мас.)\$\$	1-4 %
Ферит (% мас., XRD)\$\$\$	22-80 %
Вюстит (FeO , % мас., XRD)\$\$\$\$	0-13 %
Гетит (FeOOH , % мас., XRD)\$\$\$\$\$	0-23 %
Цементит (Fe_3C , % мас., XRD)+	<< 80 %

*Питома площа поверхні, переважно обумовлена за допомогою адсорбційного способу Брунауера-Еммета-Телера ("БЕТ") як БЕТ і більше переважно, як викладено в ISO 9277 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами визначення БЕТ, можна використовувати інші випробування, такі як фарбування метиленовим синім (MB), адсорбція монометилового ефіру етиленгліколю (EGME), електрокінетичний аналіз адсорбції комплексних іонів і спосіб відкладання білків (PR).

**Фактична щільність, переважно обумовлена за допомогою гелієвої (He) пікнометрії та більше переважно, як викладено в ISO 12154 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. У даній області техніки фактичну щільність також можна називати "дійсною щільністю" або "кістяковою щільністю".

***Гадана щільність, переважно обумовлена шляхом занурення у воду та більше переважно, як викладено в ISO 15968 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами He-пікнометрії, можна використовувати й інші випробування. Пористість можна визначити як відношення гаданої щільності до фактичної щільності:

$$\text{Пористість} = \frac{\text{гадана щільність}}{\text{фактична щільність}}$$

**** $d_{\text{пор, 90 \% об'єму}}$ переважно обумовлений із застосуванням ртутної (Hg) порозиметрії та більше переважно, як викладено в ISO 15901-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами Hg-порозиметрії, можна використовувати й інші випробування, такі як адсорбція газу. $d_{\text{пор, 90 \% об'єму}}$ являє собою діаметр пор, вище якого присутні 90 % від загального об'єму пор.

***** $d_{\text{пор, 50 \% площі поверхні}}$ переважно обумовлений із застосуванням ртутної (Hg) порозиметрії та більше переважно, як викладено в ISO 15901-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з результатами Hg-порозиметрії, можна використовувати й інші випробування, такі як адсорбція газу. $d_{\text{пор, 50 \% площі поверхні}}$ являє собою діаметр пор, вище якого перебувають 50 % від площі вільної поверхні.

#Загальний вміст Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою біхроматної титриметрії та більше переважно, як викладено в ASTM E246-10 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з біхроматною титриметрією, можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду олова(II), титриметрія після відновлення із застосуванням хлориду титану(III), спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP).

##Вміст металевого Fe (% мас.), переважно обумовлений за допомогою титриметрії із застосуванням хлориду заліза(III) та більше переважно, як викладено в ISO 16878 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при цьому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з титриметрією із застосуванням хлориду заліза(III), можна використовувати й інші випробування, такі як титриметрію із застосуванням бром-метанолу.

###Металізація (%), переважно обумовлена по відношенню до вмісту металевого Fe до загального вмісту Fe, кожне з яких переважно визначають із застосуванням раніше описаних способів.

####Вміст вуглецю (% мас.), переважно обумовлений за допомогою поглинання інфрачервоного випромінювання після спалювання в індукційній печі та більше переважно, як викладено в ISO 9556 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з поглинанням інфрачервоного випромінювання після спалювання в індукційній печі, можна використовувати й інші випробування, такі як різні способи спалювання та плавлення в інертному газі, наприклад, описані в ASTM E1019-18.

#####Вміст Fe^{2+} (% мас.), переважно обумовлений за допомогою титриметрії та більше переважно, як викладено в ASTM D3872-05 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з титриметрією, можна використовувати й інші випробування, такі як месбауерівська спектроскопія, рентгенівська абсорбційна спектроскопія та т.д.

\$Вміст Fe^{3+} (% мас.), переважно обумовлений по співвідношенню балансу маси між загальним вмістом Fe (% мас.), вмістом металевого Fe (% мас.), вмістом Fe^{2+} (% мас.) і вмістом Fe^{3+} (% мас.). Зокрема, рівність Загальний вміст Fe (% мас.) = вміст металевого Fe (% мас.) + вміст Fe^{2+} (% мас.) + вміст Fe^{3+} (% мас.) повинна виконуватися за рахунок збереження маси, тому вміст Fe^{3+} (% мас.) можна розрахувати, як $\text{вміст } \text{Fe}^{3+} (\% \text{ мас.}) = \text{загальний вміст Fe } (\% \text{ мас.}) - \text{вміст металевого Fe } (\% \text{ мас.}) - \text{вміст } \text{Fe}^{2+} (\% \text{ мас.})$.

\$\$Вміст SiO_2 (% мас.), переважно обумовлений за допомогою гравіметричних способів і більше переважно, як викладено в ISO 2598-1 (повний опис якого включений у дану заявку за допомогою посилання); при тому розумінні, що для одержання результатів, які можуть корелювати з гравіметричними способами, можна використовувати й інші випробування, такі як спектрофотометричні способи із застосуванням відновленого молібдосилікату, рентгенівська дифракція (XRD). У деяких способах вміст SiO_2 у % мас. не визначають прямо, а вимірюють концентрацію Si (у тому числі нейтральні й іонні сполуки) і розраховують % мас. SiO_2 на основі стехіометрії SiO_2 ; тобто припускають, що молярне відношення Si:O становить 1:2.

\$\$\$Вміст фериту (% мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

\$\$\$\$Вміст вюститу (FeO , % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

\$\$\$\$\$Вміст гетиту (FeOOH , % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

*Вміст цементиту ((Fe_3C) , % мас., XRD), переважно обумовлений за допомогою рентгенівської дифракції (XRD).

Властивості, наведені в таблиці 4, також можуть бути присутніми у варіантах реалізації разом із властивостями, наведеними в таблицях 1, 2 і/або 3, на додаток до таких властивостей або замість них. У різних варіантах реалізації також можуть бути присутніми більші та менші значення зазначених властивостей.

Електрохімічне гніздо, таке як акумуляторна батарея, накопичує електрохімічну енергію за рахунок застосування різниці електрохімічних потенціалів, що створюють різницю напруг між позитивним і негативним електродами. При з'єднанні електродів за допомогою провідного елемента така різниця напруг створює електричний струм. В акумуляторній батареї негативний електрод і позитивний електрод з'єднані за допомогою зовнішнього та внутрішнього провідних елементів паралельно. У загальному випадку, зовнішній елемент проводить електрони, а внутрішній елемент (електроліт) проводить іони. Оскільки підтримка дисбалансу заряду між негативним електродом і позитивним електродом неможлива, такі два потоки повинні подавати іони й електрони з однаковою швидкістю. У процесі роботи електричний струм можна використовувати для приведення в дію зовнішнього пристрою. Акумуляторну батарею, що перезаряджається, можна знову зарядити шляхом прикладання різниці протилежних напруг, що пускає в хід електронний струм й іонний струм, що протікають у напрямку, протилежному напрямку у батареї, що розряджається, у процесі експлуатації.

Як правило, але особливо у випадку варіантів застосування з довгочасним накопиченням, потрібні електроди й електродні матеріали, що мають низьку вартість та прості у виготовленні. Способи виробництва та/або

виготовлення можна оцінити і вибрати на основі множини критеріїв, що включають капітальні витрати, коефіцієнт використання матеріалу, експлуатаційні витрати, кількість типових операцій, кількість переміщень матеріалу, кількість стадій обігу з матеріалами, необхідні витрати енергії, кількість відходів, що утворюються, і/або побічних продуктів і т.д.

Електрохімічне гніздо, таке як акумуляторна батарея, накопичує електрохімічну енергію за рахунок застосування різниці електрохімічних потенціалів, що створюють різницю напруг між позитивним і негативним електродами. При з'єднанні електродів за допомогою провідного елемента така різниця напруг створює електричний струм. В акумуляторній батареї негативний електрод і позитивний електрод з'єднані за допомогою зовнішнього та внутрішнього провідних елементів паралельно. У загальному випадку, зовнішній елемент проводить електрони, а внутрішній елемент (електроліт) проводить іони. Оскільки підтримка дисбалансу заряду між негативним електродом і позитивним електродом неможлива, такі два потоки повинні поставляти іони й електрони з однаковою швидкістю. У процесі роботи електричний струм можна використовувати для приведення в дію зовнішнього пристрою. Акумуляторну батарею, що перезаряджається, можна знову зарядити шляхом прикладання різниці протилежних напруг, що пускає в хід електронний струм й іонний струм, що протікають у напрямку, протилежному напрямку у батареї, що розряджається, у процесі експлуатації.

Залізо є ідеальним електродним матеріалом завдяки його низькій вартості, дуже високим обсягам виробництва, можливості переробки для вторинного використання та високої теоретичної та практичної здатності до накопичення енергії у перерахунку на енергію, накопичену на одиницю маси матеріалу. Низька вартість матеріалу та високий рівень накопичення енергії призводять до накопичення великої кількості енергії на одиницю кількості сировини. Такі фактори, особливо витрати на одиницю кількості накопиченої енергії й обсяги виробництва, мають вирішальне значення для варіантів застосування з довгочасним накопиченням енергії у масштабі мережі, які дуже чутливі до витрат і вимагають накопичення дуже великих кількостей енергії. Залізо також від природи має електронну провідність, що може спростити проблеми, пов'язані з вступом заряду в матеріали акумуляторного електрода й із зазначених матеріалів, з якими зустрічаються у багатьох акумуляторних системах.

Центральна проблема в конструкції всіх акумуляторних електродів полягає в забезпеченні переносу електронів й іонів до місць протікання реакції й із зазначених місць. У загальному випадку, для цього потрібна взаємозалежна пористість електроліту для переносу іонів і перколяційна електропровідна мережа. В описаних у даному документі залізних акумуляторних електродах пористе залізо у формі частинок забезпечує пористість, яку заповнюють лужним електролітом. Перколяційну електропровідну мережу можна створити за допомогою самого залізновмісного матеріалу, при цьому провідні металургійні зв'язки формуються шляхом термомеханічної обробки. Металургійні зв'язки можуть виникати в результаті комбінації дифузії у твердому стані та зв'язування внаслідок механічно індукованої пластичності. Залізо, зокрема, утворює продукти, що утворюються при розряді, з обсягом набагато більшим, ніж обсяг самого металевого заліза. Таким чином, для забезпечення можливості мікроскопічного утворення великої кількості, що утворюється при розряді продукту, залізні електроди повинні мати у загальному випадку високий рівень мікроскопічної пористості (>40 %, при цьому набагато більший рівень є переважним). Пористий залізновмісний матеріал у формі частинок задовольняє вимогам, запропонованим до внутрішньої провідності та наявності більше високого рівня мікропористості. Способи, представлені у даному документі, описують, як ефективно зв'язувати зазначені матеріали для того, щоб одержати високопродуктивний електрод з низькою вартістю.

Ідеальним електричним провідником для залізного електрода є саме залізо, оскільки його застосування як провідника не вимагає додаткових деталей, складання, зв'язування або інших елементів конструкції, які збільшують вартість та складність матеріалу. Центральна проблема, пов'язана з формуванням металургійних зв'язків між пористим залізновмісним матеріалом у формі частинок, полягає у тому, що багато способів, які застосовують для зв'язування зазначених металів, або погано підходять для зв'язування пористих матеріалів, або викликають ущільнення мікропористості, або проявляють інші супутні труднощі. Наприклад, дугове зварювання може призвести до випаровування пористих залізновмісних матеріалів, спікання викликає ущільнення в цілому та, отже, втрату мікропористості, а механічне пресування при низьких температурах призводить до ущільнення матеріалів і поганого електричного з'єднання внаслідок відсутності взаємної дифузії між частинками. Проблеми з низькотемпературним механічним пресуванням зростають у міру збільшення розміру частинок матеріалу у формі частинок внаслідок підвищеної схильності матеріалу до течії/ослаблення ущільнення. Високотемпературна термомеханічна обробка однозначно підходить для зв'язування частинок пористого заліза у формі частинок для застосування в акумуляторних батареях, оскільки концентрація напруг у точках контакту між частинками дозволяє локалізувати деформацію (і, отже, зв'язування) у зазначених точках контакту між частинками при одночасному забезпеченні утворення металургійного зв'язку. Локалізована деформація дозволяє уникнути втрати мікропористості вдаліні від точок контакту між частинками.

Деякі форми високотемпературної термомеханічної обробки вже використовуються у більших масштабах, у тому числі одноосове гаряче пресування, гаряче брикетування та гаряче ізостатичне пресування.

У загальному випадку, високотемпературна термомеханічна обробка включає одночасне прикладення до матеріалу високих температур і тисків для деформації та/або консолідації матеріалу. У цьому контексті високі температуру та тиск використовують для забезпечення металургійного зв'язування пористих залізновмісних матеріалів у формі частинок. Технологічні умови для типового варіанта реалізації разом з діапазонами параметрів процесу описані нижче в таблиці 5.

Таблиця 5

Параметр процесу	Рекомендовані діапазони	Коментарі та рекомендації
Температура	300-1000	Високі температури знижують границю текучості

деформації, °С		та збільшують дифузію у твердому стані, але призводять до більше високих капітальних витрат, зношування інструментів й ускладнення процесу охолодження деталей.
Тиск, МПа	0,1-200 МПа	Потрібний тиск може сильно мінятися залежно від початкової пористості матеріалу, типу застосовуваного пресування та складу матеріалу. Переважні діапазони часто можуть бути ближче до 1-100 МПа.
Спосіб навантаження	Одноосьовий	Можливі всі способи, що включають одноосьові, двохосьові, триосьові, ізостатичні способи або способи із застосуванням роликів.
Строки деформації	Залежить від технології виробництва	Деякі способи, такі як гаряче ізостатичне пресування, підходять для часу деформації від декількох хвилин до декількох годин, тоді як у деяких способах, таких як способи на основі пресування валками, час деформації становить від декількох секунд до декількох хвилин.

Аналогічним чином, можливий розкид вихідних матеріалів. Такі вихідні матеріали зазвичай успадковують свої склади і властивості матеріалів від технологій обробки, застосовуваних для їхнього виробництва. Наприклад, матеріали із заліза прямого відновлення будуть, як правило, мати пористість всередині частинок від 50 до 70 % за об'ємом і вміст заліза ≥ 85 % мас. У загальному випадку, високі ступені чистоти є переважними для більше щільних і високопродуктивних електродів. Пористий залізовмісний матеріал у формі частинок повинен мати помірковано високу питому площу поверхні з кращими значеннями $>0,003 \text{ м}^2/\text{г}$, при цьому високі значення є переважними до певного ступеня. Дуже великі площі поверхні можуть бути занадто реакційноздатними як під час обробки, так і під час застосування, при цьому питома площа поверхні $>3 \text{ м}^2/\text{г}$ є занадто високими. Напроти, губчасте залізо, застосовуване для виробництва автомобільних деталей способом порошкової металургії, може мати набагато більше високі ступені чистоти, але може бути значно менше пористим. У загальному випадку, електродний матеріал, виготовлений способами, описаними у даному документі, може забезпечити задовільні характеристики, коли загальна мікропористість кінцевої виготовленої деталі, становить >50 %. Таку загальну мікропористість можна одержати завдяки мікропористості частинок, що подаються у високотемпературний термомеханічний процес, або вона може виникнути в результаті комбінації мікропористості всередині частинок і мікропористості, що виникає при утворенні зв'язків між частинками.

Посібник з коректування параметрів процесу на основі вихідних властивостей матеріалів і технологічних змін.

Внаслідок різноманітності можливих механічних властивостей, досяжних при застосуванні пористих залізовмісних матеріалів у формі частинок, і того, як зазначені властивості можуть мінятися при термомеханічній обробці, фахівцю в даній області техніки буде зрозуміло, що описані у даному документі діапазони тиску та температури можуть потребувати модифікації залежно від конкретного застосовуваного матеріалу. У даному документі дані деякі рекомендації, які допоможуть при модифікації процесу. У випадках, коли пористе залізо у формі частинок містить зміцнюючу фазу або елемент, такий як вуглець, необхідні значення тиску можуть бути вище, ніж описано у даному документі, для подолання підвищеної границі текучості. Тиск повинен приблизно відповідати границі текучості матеріалу та/або твердості матеріалу при вдавлюванні при температурі обробки. Аналогічним чином, пористі залізовмісні матеріали у формі частинок із більше низькою пористістю можуть зажадати більше високих значень напруги для консолідації.

Переважні морфології пресування.

Деформація, необхідна для достатнього зв'язування між частинками, залежить від типу застосовуваного вихідного матеріалу. Для матеріалу, який вводять у вигляді порівняно великих частинок ($>1 \text{ мм}$), мікропористість, створювана при зв'язуванні частинок, може бути незначною у порівнянні з мікропористістю всередині частинок. Це має місце, наприклад, у випадку матеріалу у вигляді заліза прямого відновлення. У цьому випадку для підтримки достатньої пористості всередині матеріалу процес пресування можна регулювати таким чином, щоб об'ємне зменшення пористості було достатньо низьким, щоб після процесу пресування мікропористість всередині частинок матеріалу зберігалася на рівні >50 об. %. У першому наближенні це можна розрахувати на основі збереження основного обсягу й об'ємної поздовжньої деформації, прикладеної до матеріалу. Таким чином, вихідні матеріали з більше високою початковою пористістю всередині частинок можуть забезпечити можливість більше сильних деформацій при одночасному збереженні мікропористості всередині частинок на рівні >50 об. %. У багатьох випадках частинки не будуть мати достатню початкову пористість, необхідну, щоб частинки зазнавали значної об'ємної деформації. У випадках, коли значна об'ємна деформація не є бажаною, така деформація може відбуватися тільки на контактах при відповідному коректуванні процесу, як схематично показано на фіг. 1А, 1В і 1С.

Дуже переважна інертна атмосфера.

У багатьох випадках пористе залізо у формі частинок може мати теплоізоляційні властивості при обігу з ним у вигляді сипучого матеріалу у формі частинок. Може бути переважним попереднє нагрівання матеріалу у пристрої, призначеному для рівномірного нагрівання теплоізоляційних матеріалів (такому як піч, що обігривається, або змішувач). В інших випадках пористе залізо у формі частинок можна одержати із застосуванням високотемпературного способу, та вже гарячий матеріал можна подавати у пристрій для пресування. Такі нагрівальні та завантажувальні пристрої можуть містити по суті неокислювальну атмосферу.

У багатьох випадках більша площа поверхні пористого заліза у формі частинок допускає небажане окиснення, якщо матеріал зазнає впливу кисню або інших окиснювачів при підвищених температурах. Таким чином, неокислювальна атмосфера (наприклад, інертна або відбудовна атмосфера) може бути переважною під час будь-яких етапів процесу, що відбуваються при підвищених температурах, при цьому виготовлені деталі можна ефективно охолоджувати до температур, при яких реакції протікають повільніше (наприклад, нижче 100 °C), перед впливом кисню або інших окиснювачів. У деяких випадках матеріал можна ефективно пасивувати шляхом впливу невеликої кількості кисню перед впливом великої кількості кисню. Слід додатково зазначити, що електричні з'єднання між частинками також повинні служити в якості теплових з'єднань між частинками. Таким чином, після виготовлення пресування можна ефективно охолоджувати конвективним способом з однієї сторони (наприклад, шляхом проходження під вентилятором), хоча одностороння конвекція не є ефективним способом охолодження для сипучих матеріалів у формі частинок, які не перебувають у тепловому контакті один з одним. Таким чином, у деяких варіантах реалізації деталі можна виготовляти в інертній або відбудовній атмосфері, видаляти зі стрічки після виготовлення й охолоджувати за допомогою конвекції при одночасному перебуванні у по суті неокислювальній атмосфері. Пасивація може відбуватися одночасно з охолодженням або після охолодження. У деяких варіантах реалізації виготовлені пресування можна вивантажувати у гарячому вигляді у бункери або інші контейнери, заповнені по суті неокислювальною атмосферою, для охолодження та можливо пасивації.

У деяких випадках запобігання окиснення під час або після високотемпературної термомеханічної обробки може виявитися неможливим у потрібному ступені. У таких випадках після формування електрода можна припинити окиснення на зазначених поверхнях за допомогою підходящих способів. Наприклад, у деяких варіантах реалізації поверхневі оксиди, що утворюються під час або після обробки, можна відновити електрохімічним способом в акумуляторній системі до або під час циклування. У деяких варіантах реалізації поверхневі оксиди, що утворюються під час або після обробки, можна відновити термохімічним способом у потоці відновлювального газу перед введенням в акумуляторну систему. У деяких варіантах реалізації поверхневі оксиди можна відновити хімічним способом шляхом введення підходящого відновлювального розчину, такого як кислота. Підходящі кислоти для відновлення поверхневих оксидів заліза можуть включати кислоти, застосовувані для травлення або декапування сталей, у тому числі розчини, що містять азотну, сірчану й оцтову кислоти.

Високотемпературну термомеханічну обробку можна здійснювати за допомогою підходящих способів прикладення впливу. Таким чином, у різних варіантах реалізації можна прикладати тиск і/або тепло за допомогою одного або більше з наступних технологічних процесів: гарячого ізостатичного пресування (HIP), одноосового гарячого пресування, гарячого валкового пресування (яке може бути одноосовим або двоосовим), гарячого брикетування (яке у деяких варіантах реалізації здійснюють із застосуванням валків, а в інших випадках шляхом одноосового пресування) або гарячого кування. Далі для кожної технології обробки обговорюються конкретні способи забезпечення геометричних розмірів, що підходять для застосування для акумуляторних електродів, з особливим акцентом на електроди, що підходять для довготривалого накопичення енергії.

Гаряче ізостатичне пресування можна використовувати для економічного виготовлення більших заготовок матеріалу із забезпеченням точних рівнів пресування за допомогою підходящого вибору графіків час-температура-тиск. У цьому випадку застосування HIP відрізняється тим, що повне або близьке до повного ущільнення не є метою, а метою скоріше є консолідація матеріалу економічним способом. У деяких варіантах реалізації форму електрода вбудовують у циліндр, застосовуваний для консолідації матеріалу, та результатом процесу HIP є одержання підходящого електрода. У деяких варіантах реалізації для зниження витрат на виготовлення циліндра виготовляють дуже великий циліндр і вирізують електроди із заготовки, отриманої в результаті обробки HIP. Перераховані вище умови температури і тиску можна використовувати в якості вихідної точки для коректування процесу HIP при застосуванні даного матеріалу й електрода.

Одноосове гаряче пресування можна використовувати для виготовлення більших заготовок, коли потрібні низькі тиски пресування. У багатьох випадках потрібні тиски пресування набагато нижче, ніж у типових варіантах застосування гарячого пресування, як і потрібні температури. Таким чином, питомі витрати на гаряче пресування можна значно знизити у порівнянні з типовими варіантами застосування. У деяких варіантах реалізації можна встановити сталевий прес для гарячого пресування, гравіметрично подавати матеріал у зазначений прес, при цьому такий матеріал можна пресувати автоматично. Зазначений процес може нагадувати одноосове гаряче пресування з точки зору розміру одержуваних виробів, але може нагадувати обробку за допомогою гарячого брикетування з точки зору деталей, зроблених за одиницю часу, та строків, необхідних для пресування. У деяких варіантах реалізації матеріал у формі частинок можна консолідувати з високою швидкістю та протягом дуже короткого часу, так що процес гарячого одноосового пресування найбільше нагадує гаряче кування.

Способи консолідації

Термічне напилювання

Термічне напилювання можна використовувати для виготовлення великих заготовок із частинок. Характеристики зв'язування, щільність й інші властивості отриманого пресування можна коректувати переважно шляхом регулювання параметрів процесу, таких як швидкість, температура та напрямки, а також швидкість осадження частинок, що розпорошуються. В одному з варіантів реалізації частинки пористого заліза у формі частинок можна напилювати на підкладку. Підкладка може служити в якості струмоприймача або структурної арматури для отриманої заготовки. В іншому варіанті реалізації сполучні частинки можна напилювати разом із частинками пористого заліза у формі частинок або на підготовлений шар частинок DRI, щоб зв'язати разом частинки пористого заліза у формі частинок.

Адитивне виробництво (наприклад, пряме лазерне спікання металів (DMLS)) із застосуванням лазерного спікання або лазерного плавлення DRI можна використовувати для зв'язування одна з одною частинок пористого заліза у формі частинок, з формуванням, тим самим, більшої заготовки або збільшення її розміру. У деяких варіантах реалізації можна використовувати пошаровий процес, у якому осаджують один або більше шарів

матеріалу у формі частинок і впливають лазерною енергією на весь шар або на вибрані області всередині шару. У деяких варіантах реалізації для напрямку лазерної енергії на необхідні області можна використовувати один або більше гальванометрів, систем позиціонування й/або оптичних компонентів. У деяких варіантах реалізації замість або разом з лазером можна використовувати інші стратегії спрямованого енергетичного впливу, такі як технологія проєкції цифрової обробки світла (DLP), мікрохвильове випромінювання, резистивне нагрівання й електродугове нагрівання. Такі способи також можна використовувати для локальної модифікації однієї або більше областей на існуючій заготовці.

Способи зварювання.

У деяких варіантах реалізації можна використовувати одну або більше технологій зварювання для з'єднання або консолідації частинок пористого заліза у формі частинок, наприклад, шляхом формування металургійного зв'язку між частинками пористого заліза у формі частинок, з'єднуючи, тим самим, їх разом з одержанням механічно й/або електрично сполученої заготовки. Такі способи включають контактне зварювання змінним струмом (AC), контактне зварювання постійним струмом (DC), дугове зварювання, підривне зварювання, ковальське зварювання, високочастотне (HF) зварювання, зварювання ємнісним розрядом, зварювання тертям з перемішуванням й інші традиційні способи зварювання плавленням. У деяких варіантах реалізації можна використовувати матеріал-наповнювач і/або флюс, наприклад, для посилення зв'язування або зменшення або усунення схильності до окиснення на зварених швах.

Ультразвукові ущільнюючі вібрації, в тому числі ультразвукові вібрації, можна використовувати у даному винаході в якості способу нагрівання або механічного перемішування пористого заліза у формі частинок, або окремо, або в комбінації з іншими способами нагрівання та перемішування. Вібрації можна використовувати в комбінації з іншими способами пресування для забезпечення однорідності, швидкості, міцності з'єднання або інших аспектів процесу пресування.

Виготовлення більшого або більше простого пресування і його розрізання або наступна механічна обробка: У деяких варіантах реалізації отримана заготовка може бути більшою, ніж необхідна геометрія електрода або його компонента, або іншим способом відрізатися від зазначеної геометрії, тому згодом таку заготовку можна розрізати, механічно обробляти, збирати або іншим способом обробляти з одержанням підходящих проміжних або кінцевих форм. Це може бути перевагою з погляду забезпечення низької вартості та високої продуктивності при формуванні заготовки шляхом коректування форми заготовки відповідно до застосовуваних способів пресування. Таку заготовку можна одержати із застосуванням будь-якого одного або більше підходящих способів пресування. Вихідна форма може бути аналогічна необхідній формі або суттєво відрізатися від неї. У деяких варіантах реалізації вихідна форма може містити декілька ділянок з необхідною геометрією, що проходять у напрямку однієї або більше осей, наприклад, з 2D-профілем, що проходить у третьому вимірюванні, так що розрізування заготовки на секції забезпечує потрібну форму. В інших варіантах реалізації для досягнення потрібної форми може знадобитися тільки локалізована механічна обробка або зміна форми заготовки. Такий поділ на частини або формування можна здійснювати шляхом застосування одного або більше способів різання, поділу, фрезерування або шліфування. Зазначені способи можуть включати різання водоструминним способом, із застосуванням плазми, лазера, кисневого пальника та/або механічне розпилювання. Матеріал заготовки також можна розрізати, обрізати, надрізати, розламувати, згинати або формувати із забезпеченням переважної геометрії. Отримана геометрія може являти собою один або більше готових електродів або компонентів електрода, один або більше з яких можуть бути зібрані разом з іншими компонентами з одержанням електрода.

Холодне пресування. У деяких варіантах реалізації процеси консолідації, описані вище, зокрема, валкове пресування, ізостатичне пресування й одноосьове пресування, можна здійснювати при кімнатній температурі або при температурі, суттєво меншій, ніж температура, яку зазвичай використовують у промисловості для даного процесу пресування. Таке низькотемпературне формування заготовки є переважним, оскільки воно дозволяє зменшити або усунути більшу частину складних проблем і витрат, пов'язаних з нагріванням матеріалу до підвищених температур і встаткуванням, необхідним для високотемпературної обробки. Таку низькотемпературну обробку можна здійснювати шляхом відповідного коректування параметрів процесу, таких як час або тиск, і за рахунок розробки складу або іншої модифікації пористого заліза у формі частинок. У деяких варіантах реалізації склад, мікроструктуру та/або форму частинок заліза можна розробити таким чином, щоб полегшити формування заготовки при більш низьких температурах. У деяких варіантах реалізації для полегшення формування заготовок при більш низьких температурах можна використовувати фізичну, хімічну або іншу обробку поверхні.

В якості альтернативи холодному зв'язуванню, можна використовувати холодну екструзію для формування форм, які виконані з можливістю підвищення продуктивності електрода за рахунок збільшення його доступної площі поверхні. Холодну екструзію можна використовувати для створення тривимірного звивистого блоку з рудної пульпи, яку пропускають через реактор DRI у вигляді блоку та перетворюють у залізні блоки з високими площами поверхні. Форма може включати сфери, циліндри або будь-які тривимірні форми, які будуть вільно протікати у реакторі відновлення. Площу поверхні можна додатково збільшити за рахунок отворів або доданої поверхневої текстури, такої як ямки і ребра. У деяких варіантах реалізації для підвищення внутрішньої пористості можна використовувати зв'язувальну речовину й інший додатковий матеріал, який буде вигорати при високій температурі під час відновлення;

Альтернативно, холодну екструзію можна використовувати для формування форми, описаної вище, після відновлення оксиду заліза до заліза.

Іншим способом створення складних тривимірних форм із доданою пористістю є сушіння пульпи залізної руди із застосуванням способів, розповсюджених у керамічній промисловості, таких як гіпсове лиття, фасонне лиття, які потім затвердівають у високотемпературних печах. В інших варіантах реалізації такі способи можна використовувати з відновленим залізом.

Нерівномірні температури пресування.

У деяких варіантах реалізації одна або більше областей матеріалу можуть мати одну або більше різних

температур, можливо з більшим діапазоном більше гарячих і більше холодних температур у різних точках простору та часу. Такий неоднорідний температурний профіль можна вигідно використовувати для зміни поведінки і властивостей пористого залізовмісного матеріалу для забезпечення сприятливого зв'язування, пористості, деформації або інших характеристик, що представляють інтерес. У деяких варіантах реалізації матеріал може бути найбільше гарячим на зовнішніх поверхнях плоского електрода, що створює, тим самим, найбільшу міцність за краями, при цьому внутрішня частина залишається тільки злегка деформованою. Отриманий електрод буде демонструвати корисну комбінацію високої міцності на вигин в результаті деформації поблизу гарячих поверхонь при збереженні пористості у більше холодній внутрішній частині вдалі від зовнішніх поверхонь.

Об'єднання декількох заготовок, додавання частинок до існуючих заготовок. У деяких варіантах реалізації способи пресування та зв'язування, в тому числі описані у даному документі в якості способів консолідації пористого заліза у формі частинок, також можна застосовувати відносно його заготовок або деякої комбінації пористого заліза у формі частинок і його заготовок. Такі способи можна використовувати, наприклад, для з'єднання однієї або більше заготовок з іншою або для з'єднання додаткової кількості пористого заліза у формі частинок з існуючою заготовкою. Будь-яке таке нагрівання, пресування, зварювання, напилювання або інші технології можна використовувати один або більше разів у різних послідовностях.

Форма електрода або заготовки.

Будь-яка заготовка або електрод повинні мати достатню механічну й електричну стійкість, щоб уникнути ушкодження протягом усього їх терміну служби, що включає будь-які процедури виготовлення, складання, транспортування, експлуатації, обслуговування й утилізації. Геометричну форму електрода або заготовки можна вибирати таким чином, щоб сприяти їхній стійкості. У деяких варіантах реалізації розміри, товщина та співвідношення сторін заготовки або електрода можна вибрати таким чином, щоб геометрія була досить стійкою до різних форм ушкодження або деструкції.

Канальні електроди з поліпшеними експлуатаційними характеристиками.

У загальному випадку, для багатьох акумуляторних електродів й особливо для електродів товстого формату перенос іонів може обмежувати пропускну здатність електрода. Зокрема, у гарячепресованих і пресованих і спечених електродах частинки можуть деформуватися й утворювати щільну структуру, що призводить до зниження рівня макропористості, необхідного для переносу іонів через товщину анода. Крім того, макропористість, що виникає в результаті, може проявляти сильно звивисту та несприятливу орієнтацію щодо напрямку переносу іонів. Таким чином, існує потреба у конструкціях устаткування та способах обробки, які поліпшують перенос іонів через товщину електрода. Крім того, у випадку пористих електродів у деяких процесах гарячої прокатки можуть виникнути труднощі із забезпеченням поверхні, до якої притискають матеріал для захоплення електрода, якщо потрібний низький ступінь пресування. Виступаючі елементи можуть забезпечувати механічне зчеплення ролика з матеріалом для того, щоб процес прокатки міг відбуватися при менших зусиллях. Текстуrowані або каналні електроди з різним ступенем пресування та/або металургійного зв'язування за всією площею електрода можуть ефективно проявляти підвищену механічну стійкість та поліпшені характеристики електричної провідності.

Канали змінної товщини й інші аналогічні структури заданої форми в металургійно зв'язаних електродах можна формувати різними способами.

Інструменти для виготовлення електродів можуть містити структури з множиною виступаючих елементів (шипів, конусів, стрижнів або аналогічних елементів), які призводять до виникнення макропористості, що проходить за всією товщиною електрода, внаслідок видалення матеріалу під час процесу пресування. Потім такі інструменти можна використовувати для пресування, прокатки або іншим способом механічного виготовлення електрода. Електрод можна пресувати з метою наступного спікання, при цьому інструмент може залишатися з електродом протягом щонайменше частини процесу спікання, або зазначений інструмент можна використовувати для пресування (при гарячому або холодному пресуванні) електрода для наступного застосування. У деяких варіантах реалізації для забезпечення оптимального компромісу між пропускну здатністю та просторовою ємністю для конкретних варіантів застосування можна оптимально розрахувати частку площі та відстань між виступаючими елементами. У деяких варіантах реалізації можна використовувати спосіб валкового пресування. У процесі валкового пресування для металургійного зв'язування електродного матеріалу можна використовувати високі температури вище 300 °C. Вихідним матеріалом для виготовлення електрода може бути залізо або його похідна. Більше конкретно, електродний матеріал може являти собою губчасте залізо, залізо прямого відновлення або будь-який інший подібний матеріал, що представляє собою високопористе металеве залізо. Для забезпечення належного потоку матеріалу навколо виступів і мінімізації зношування інструментів можна використовувати конічні виступи. Для забезпечення поверхні, до якої притискають матеріал, можна вибрати або іншим способом оптимізувати кут виступів. На фіг. 7, 8A і 8B показані приклади операцій інструментальної обробки і пресування для формування каналних електродів згідно з різними варіантами реалізації.

Для створення каналної структури в електроді можна використовувати ролик із зубцями, аналогічний наведеному нижче. На фіг. 9 показаний приклад ролика із зубцями, який може підходити для застосування при формуванні каналного електрода згідно з різними варіантами реалізації.

Ролики у пресі гарячої прокатки можуть бути текстуrowані для навмисного збільшення щільності гарячепресованого матеріалу у певних місцях. Підвищена щільність матеріалу може виконувати дві функції: (1) Така щільність збільшує кількість областей з підвищеною міцністю, що дозволить поліпшити зручно-оброблюваність. (2) Така щільність збільшує кількість областей з високою провідністю, що забезпечить магістраль для потоку електронів. Зазначені елементи будуть діяти як вбудовані/ формовані електричні шини. Потім до зазначених областей можна прямо приварити сталеві електричні шини для відводу струму від електрода. На фіг. 10A показані зображення ілюстративного каналного електрода згідно з різними варіантами реалізації. На фіг. 10B показаний поперечний переріз частини ілюстративного каналного електрода,

зображеного на фіг. 10А. На фіг. 11А показаний приклад текстурованого ролика, та на фіг. 11В показаний приклад операцій з формування каналнього електрода згідно з різними варіантами реалізації із застосуванням двох із текстурованих роликів, зображених на фіг. 11А. Ролики у пресі гарячої прокатки можуть бути текстуровані для навмисного збільшення щільності гарячепресованого матеріалу у певних місцях. Підвищена щільність матеріалу може виконувати дві функції: а саме, збільшувати кількість областей з підвищеною міцністю, поліпшуючи зручно-оброблюваність; та збільшувати кількість областей з високою провідністю, забезпечуючи магістраль для потоку електронів. Зазначені елементи можуть діяти як вбудовані/ формовані електричні шини. Наприклад, потім до зазначених областей можна прямо приварити сталеві електричні шини для відводу струму від електрода.

У процесах валкового пресування електроди можна розділяти на листи за допомогою ріжучого або розділового елемента, вбудованого у ролики, який періодично розріже листи або створює елементи у безперервному листі для наступного поділу. Ролики можуть являти собою ущільнювальні ролики, при цьому прикладений тиск може щонайменше частково створюватися такими ущільнювальними роликами. На фіг. 12А-12С показані зображення профілю одного з прикладів ріжучого або розділового елемента, застосовуваного для поділу листів сформованих електродів. На фіг. 12А-12С сформований електродний лист подають між роликами (у напрямку вниз згідно з орієнтацією, показаною на фігурах). На фіг. 12А показаний сформований електродний лист, первинно подаваний між роликами. На фіг. 12В показаний ріжучий елемент, що виступає з кожного ролика, при зіткненні, коли два ролики обертаються протилежно один одному для відрізання сформованого електрода. На фіг. 12С показаний сформований електродний лист, усе ще подаваний між роликами, але при цьому ділянка, розташована під роликами, тепер відрізана.

У деяких варіантах реалізації гаряче валкове пресування або гаряче брикетування за допомогою роликів можна використовувати для зв'язування пористого залізовмісного матеріалу у формі частинок у вигляді листа електропровідного матеріалу. Наприклад, на фіг. 2 показаний варіант реалізації гарячого валкового пресування, в якому роблять механічно й електрично з'єднаний матеріал. Згідно з різними варіантами реалізації електрод можна ввести в електрохімічну систему без прикладення до зазначеного електрода зовнішнього струмоприймача або ущільнення. На лист можна нанести візерунок або його можна вирізати під час процесу прокатки у будь-якому напрямку для забезпечення необхідної геометрії для введення в акумуляторний електрод або для полегшення наступного формування такої геометрії. Способи гарячого валкового пресування, такі як гаряче брикетування, використовують для одержання сильно ущільнених брикетів із пористого заліза у формі частинок, зокрема заліза прямого відновлення (DRI). Спосіб гарячого брикетування заліза прямого відновлення називають способом одержання гаряче-брикетованого заліза (HBI). У процесі HBI мета полягає у тому, щоб максимально ущільнити (тобто збільшити щільність) DRI для зменшення кількості мікропористості та, отже, для зниження реакційної здатності матеріалу для більше безпечного транспортування й обігу із зазначеним матеріалом. Для створення ефективного матеріалу для акумуляторної батареї може бути доцільно повністю поміняти парадигму ущільнення для HBI: мета такого процесу брикетування буде полягати у тому, щоб якнайменше ущільнити матеріал при одночасному збереженні міцних провідних металургійних зв'язків між матеріалами. Така модифікація процесу одержання гаряче-брикетованого заліза має декілька важливих переваг. По-перше, при застосуванні вбудованих модулів для брикетування на установках DRI матеріал уже є гарячим і перебуває у відновлювальній/ захисній атмосфері. Це суттєво зменшує витрати, пов'язані з описаними аспектами термомеханічної обробки. По-друге, даний процес є безперервним і високопродуктивним (на деяких установках HBI роблять >1 мільйона тонн HBI на рік). По-третє, процес брикетування є недорогим - він лише мінімально збільшує вартість вихідних матеріалів для виробництва сталі. Нарешті, машини для гарячого брикетування вже інтегрують у зазначений процес ріжучий механізм для перетворення безперервного листа брикетованого матеріалу в окремий набір електродів. Для запобігання руйнування мікропористості процес брикетування може у загальному випадку відбуватися при інших робочих умовах, ніж умови, зазвичай застосовувані для одержання продукту у вигляді HBI з більше високою щільністю. Такі параметри будуть специфічними для геометрії електрода, що виготовляється, та матеріалу, що зазнає пресування, але можуть бути визначені емпіричним шляхом. По-перше, температуру DRI під час пресування можна зменшити для обмеження розм'якшення заліза та підтримання внутрішньої пористості. По-друге, тиск, прикладений до валка(ів), можна зменшити і допустити його відхилення до певного межі. По-третє, швидкість прокатки можна зменшити для збільшення часу, протягом якого залізо перебуває під тиском, і підвищення його здатності утворювати зв'язки між частинками. По-четверте, зазор між валками можна регулювати з більше твердим допуском для забезпечення рівномірної товщини пресованого електрода.

Обіг з матеріалами та модифікація перед консолідацією залізних електродів.

При обігу з матеріалами для створення металургійно зв'язаних залізних електродів виникає декілька проблем. По-перше, матеріали повинні бути змішані та залишатися змішаними під час завантаження. По-друге, необхідно регулювати масу й обсяг матеріалів для мінімізації неоднорідності всередині та між електродами. По-третє, матеріали повинні бути оброблені належним чином і підготовлені для зв'язування за допомогою будь-якого застосовного нагрівання та хімічних реакцій, протікання яких є бажаним. По-четверте, будь-які інші застосовні матеріали, необхідні для включення в електрод, повинні подаватися у відповідний пристрій для зв'язування матеріалів у формі частинок.

Підготовка поверхні: Поверхню матеріалів необов'язково можна підготувати за допомогою способів підготовки поверхні, описаних нижче. Підготовка поверхні може відбуватися у багатьох точках під час обробки матеріалу й обігу з ним. Для досягнення необхідного ступеня зв'язування між частинками заліза може знадобитися очищення поверхні від будь-яких домішок або шкідливих фаз, які будуть перешкоджати, сповільнювати або запобігати утворенню металевго зв'язку. Особливий інтерес представляє оксидне покриття, часто пов'язане з виробництвом DRI; така неорганічна сполука призначена для запобігання прилипання під час виробництва заліза прямого відновлення та, як така, буде перешкоджати зв'язуванню в наступних операціях. Перед нагріванням і консолідацією можна використовувати такі широко застосовувані способи, як промивання розчинниками, кислотне травлення, піскоструминна обробка/ дробоструминна обробка.

Нагрівання: У багатьох процесах консолідації та/або металургійного зв'язування перед самою стадією зв'язування або консолідації може бути бажаним або необхідним нагрівання матеріалу. Наприклад, для забезпечення металургійного зв'язування за допомогою процесів гарячого пресування часто потрібні температури $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогічним чином, у багатьох зварювальних процесах (наприклад, при контактному зварюванні) попереднє нагрівання матеріалу підвищує однорідність й якість зв'язків. Залізовмісні матеріали можна нагрівати за допомогою великої кількості способів. У деяких випадках пористі залізовмісні матеріали можна нагрівати із застосуванням радіаційних й/або електричних нагрівачів, шляхом індуктивного з'єднання із самим пористим залізовмісним матеріалом або їх можна нагрівати у присутності атмосфери згорілого газу. Пористий залізовмісний матеріал також може самонагріватися шляхом введення кисню в технологічну атмосферу та реакції з пористими залізними матеріалами. Механічний вплив, такий як дроблення, обертання, перемішування або ультразвукове перемішування, також можна використовувати в якості засобу нагрівання, незалежно від того, чи застосовують такий вплив також для досягнення інших цілей чи ні. Матеріал можна додатково або замість цього попередньо нагрівати і зберігати у теплоізолюваних контейнерах для зберігання сипучих матеріалів, щоб не допускати влучення вологи і виключити необхідність дуже швидкого нагрівання. Нагрівання може відбуватися у безперервній печі, такий як піч з обертним подом, обертова піч, піч із лінійним подом, тунельна піч або піч із прямими ґратами, серед іншого. У деяких випадках атмосферу при нагріванні також можна спроектувати таким чином, щоб забезпечити хімічну зміну пористих залізовмісних матеріалів.

Регулювання розміру частинок і змішування: Розмір пористих залізовмісних матеріалів у формі частинок можна зменшувати, класифікувати зазначені матеріали за розміром і змішувати для досягнення оптимальних властивостей частинок для формування металургійно зв'язаних електродів. Зменшення розміру частинок може відбуватися за допомогою кожного з відомих у даній області техніки способів зменшення розмірів частинок матеріалів у формі частинок, включаючи, але не обмежуючись ними, розмелюючі вальці під високим тиском, дроблення у шоківій дробарці, дроблення у жираторній дробарці та/або подрібнювання у молотковій дробарці. У деяких випадках для одержання оптимальної суміші або оптимального розподілу за розміром можна поєднувати пористі залізовмісні матеріали у формі частинок із двох різних джерел або виробничих процесів. В інших випадках один вихідний матеріал можна розділити на різні частини, і зазначені різні частини можна піддавати різним процесам зменшення розміру та класифікації частинок для досягнення необхідного розподілу за розміром. Підходящий розподіл за розміром можна забезпечити шляхом застосування сит, повітряних класифікаторів або інших способів визначення розмірів і сортування частинок, відомих у даній області техніки для обігу з металовмісними матеріалами у формі частинок. Такі операції визначення розмірів частинок можна здійснювати безперервно відповідно до обробки матеріалу або окремими партіями. Для забезпечення якості й однорідності продукту можна здійснювати змішування або гомогенізацію. Змішування виконують за допомогою різних способів змішування та поділу, що підходять для застосовуваних розмірів частинок. Наприклад, матеріал, що складається з більше дрібних частинок, можна змішувати у барабанному змішувачі двохконусної конфігурації або V-подібному змішувачі, тоді як матеріал, що складається з більших частинок, можна більш ефективно змішувати за допомогою серії стадій рифлення та комбінування.

Вимірювання необхідних кількостей, транспортування та дозування: Пористі залізовмісні матеріали у формі частинок можна транспортувати, відмірювати необхідні кількості та дозувати із застосуванням способів, що підходять для розглянутих розмірів частинок і масових витрат. У деяких варіантах реалізації для забезпечення рівномірної об'ємної витрати матеріалу можна використовувати шнекові конвеєри або інші волюметричні способи. У деяких варіантах реалізації для забезпечення постійної подаваної маси в одиницю часу можна використовувати ваговий дозатор, такий як вібраційний ваговий дозатор або ваговий дозатор безперервної дії. У деяких випадках об'ємне та гравіметричне транспортування можна об'єднати у різних точках у процесах подання матеріалу. У тих випадках, коли регульовані швидкості потоку не так важливі, для транспортування матеріалів між різними технологічними модулями можна використовувати пневматичне, магнітне транспортування або транспортування із застосуванням наспензії. Для забезпечення однорідності матеріалу змішування може відбуватися на початку транспортування, наприкінці транспортування або періодично протягом усього транспортування матеріалу.

Обробка та підвищення якості матеріалів під час транспортування: У деяких випадках пил, пов'язаний з матеріалами, може перешкоджати зв'язуванню під час наступної обробки. У таких випадках пористі залізовмісні матеріали у формі частинок можна очищати від пилу. У деяких варіантах реалізації знепилювання може відбуватися за допомогою струминного обдування частинок повітрям. У деяких варіантах реалізації знепилювання може відбуватися шляхом проходження матеріалу через камеру зі швидкістю повітря, достатньому для забезпечення транспортування та видалення будь-якого пилу, що утворюється, таку як вібраційна поверхня, яка може механічно видаляти пил з поверхні шляхом струшування та видаляти її з пористого залізовмісного матеріалу у формі частинок.

Модифікація матеріалу для застосування у процесах консолідації з точки зору форми і властивостей матеріалу: У деяких випадках матеріали, застосовувані для металургійного зв'язування з одержанням залізних електродів, можуть мати форми, відмінні від сферичних форм, часто застосовуваних у процесах прямого відновлення. У таких випадках більше підходящі форми можна одержати шляхом екструзії, модифікації способів очокування, пресування або інших підходящих процесів. Для виготовлення пористих матеріалів у формі частинок можна використовувати циліндри, шестигранники, восьмикутники або інші форми.

Застосування способів зменшення розміру частинок для виготовлення залізних електродів.

Металургійне зв'язування заліза прямого відновлення може бути утруднене, оскільки на котуни часто наносять покриття для запобігання їх прилипанню під час різних процесів нагрівання, маніпулювання та відновлення, які виконують для виготовлення DRI. Проте такий процес зв'язування можна здійснювати, наприклад, шляхом застосування більшої кількості тепла, підвищених температури, тиску або інших підходящих технологічних змінних - по суті плавлення, деформування, в інших випадках ущільнення та зміна мікроструктури більшою мірою в остаточному підсумку призводить до задовільного зв'язування. Однак модифікація

мікроструктури в результаті зварювання зазвичай призводить до зниження електрохімічних характеристик внаслідок, наприклад, ущільнення та супутніх втрат мікропористості та питомої площі поверхні, які необхідні для забезпечення продуктивності електрода.

Автори даного винаходу виявили, що деякі процеси зменшення розміру частинок призводять до збереження подавляючої частини мікропористості пористого залізовмісного матеріалу у формі частинок. При зменшенні розміру частинок зазначеного матеріалу відкривається свіжа площа поверхні, яка не містить антиадгезійних покриттів, застосовуваних для запобігання адгезії матеріалу на попередніх стадіях процесу. Потім таку свіжу площу поверхні можна порівняно легко піддавати металургійному зв'язуванню. Зменшення розміру частинок не обов'язково повинно бути величезним, щоб виявити дуже великий вплив на посилення адгезії. В якості дуже грубого наближення, за умови, що частинки сферичні, зменшення розміру частинок удвічі призводить до того, що 75 % поверхні не має покриття. Зменшення розміру частинок до однієї чверті розміру частинок призводить до того, що приблизно 93,75 % площі поверхні залишається без покриття. Таким чином, невелике зменшення розміру частинок може призвести до більших змін у поведінці матеріалу під час металургійного зв'язування.

Застосування таких способів зменшення розміру частинок не тільки ефективно поліпшує адгезію електродів й якість електричних з'єднань, але також забезпечує меншу чутливість електродів до попередніх змін параметрів процесу, пов'язаних із постачальниками, і дозволяє виявити можливий набір постачальників, які можуть поставляти матеріал для електродів, оскільки технічні вимоги й обмеження відносно типів і кількостей покриттів пом'якшуються. Таким чином, застосування зменшених розмірів частинок дозволяє ефективно підвищити стійкість процесу, зменшити мінливість електродів і підвищити гнучкість постачальників при виробництві матеріалів. [00169] Способи зменшення розміру частинок включають дроблення у щоківній дробарці, подрібнювання у молотковій дробарці, подрібнювання у жираторній дробарці та подрібнювання у порошок за допомогою млина з паралельними пластинами.

Способи металургійного зв'язування можуть включати зварювання, спікання або пресування або їх комбінації з іншими способами і серед перерахованих способів. Зварювання може включати контактне зварювання постійним струмом і високочастотне контактне зварювання змінним струмом. Спікання може включати спікання під невеликим тиском і пресування перед спіканням. Пресування може включати гаряче або холодне пресування. Пресування може включати застосування тиску вздовж однієї або більше осей.

Застосування широких або спроектованих розподілів за розміром для виготовлення залізних електродів.

Деякі міркування дозволяють обґрунтувати застосування спроектованих розподілів за розміром в залізних електродах, виготовлених із пористих матеріалів у формі частинок. По-перше, акумуляторні електроди потребують, щоб активний матеріал залишався в електричному з'єднанні зі струмоприймачами для того, щоб струм міг проходити через зовнішній ланцюг. Електрична ізоляція активного матеріалу є основною формою втрати ємності у багатьох акумуляторних системах. Це особливо важливо в металевих електродних системах, у яких активний матеріал часто служить в якості свого власного струмоприймача за всією товщиною електрода. По суті, системи або способи, які забезпечують більший ступінь контакту або більшу стійкість електричного контакту між активними матеріалами в металевих електродах, є корисними для підвищення стійкості акумуляторного електрода відносно неналежного обігу та/або деструкції активного матеріалу. По-друге, стиск і/або пресування пористих металевих матеріалів являє собою спосіб одержання електрично зв'язаних матеріалів із високою пористістю для акумуляторних електродів. Однак такі процеси пресування за своєю природою обмежені тим, що в акумуляторному електроді потрібна пористість, а процеси пресування часто викликають ущільнення або механічну деструкцію внаслідок пластичної деформації та перерозподілу частинок, що підлягають пресуванню. У той же час акумуляторний електрод повинен бути механічно стійким, щоб його можна було обробляти, поміщати у збірні пристрої та підтримувати відмінні робочі характеристики і можливість підключення протягом усього терміну служби. Механічна стійкість зростає зі збільшенням ступеня пресування, тоді як працездатність акумуляторної батареї часто зменшується зі збільшенням ступеня пресування - таким чином, зазначені дві потрібні властивості акумуляторної батареї часто перебувають у протиріччі у процесах виробництва електродів на основі пресування. Відповідно, способи та/або системи для запобігання необхідності такого інженерно-технічного вибору будуть дуже корисні для виробництва пресованих металевих електродів.

Широкі та/або спроектовані розподіли частинок за розміром, у тому числі мультимодальні впакування, часто здатні створювати більше контактів на одиницю об'єму в упакуванні частинок і збільшувати щільність упакування матеріалів, що містяться в упакуванні, у порівнянні з більше вузькими розподілами частинок за розміром. Таким чином, широкі та спроектовані розподіли частинок за розміром застосовні для розрахунків стійкості контакту частинок у пресованих електродах, у яких активний матеріал також є провідною фазою, що одночасно збільшує щільність упакування. Більше висока щільність упакування призводить до меншої товщини і зниження загальних витрат системи (наприклад, внаслідок меншої кількості електроліту, необхідного у комірі).

Проблема, викликана широкими та/або спроектованими впакуваннями частинок, полягає у тому, що більше дрібні частинки можуть переміщатися всередині порового простору більших частинок. Об'ємна частка таких частинок, що переміщуються, сильно залежить від розподілу частинок за розміром, форми і способу впакування матеріалів, що має на увазі, що широкі та спроектовані впакування можуть призвести до відсутності відтворюваності властивостей та продуктивності електрода від партії до партії та від циклу до циклу. Однак простір, який мають зазначені частинки для переміщення, часто є досить невеликим і часто становить порядку менше 1 % від діаметра частинки.

Таким чином, існує можливість значного поліпшення відтворюваності та продуктивності електродів шляхом комбінації широких і/або спроектованих розподілів частинок за розміром і застосування способів пресування електродів, здатних забезпечувати одноосову пластичну деформацію >1 %. Прикладення невеликого ступеня (~1 %) ущільнюючої пластичної деформації може призвести до значного збільшення кількості та масової частки взаємозалежних активних матеріалів і сильно підвищити стійкість з'єднань між активними матеріалами. У випадку залізовмісних електродних матеріалів, виготовлених із матеріалів із високою внутрішньою пористістю (наприклад,

порошків з губчастого заліза), таку деформацію можна здійснити або шляхом прикладення дуже високих зусиль при температурі, близькій до кімнатної (~ 0,5-50 МПа), або шляхом гарячого пресування заліза при трохи більше низьких тисках (~ 0,1-10 МПа), але при значно підвищеній температурі (>400 °C і <1200 °C). Зазвичай, існує цілий ряд комбінацій температури і тиску між такими двома крайніми значеннями. Крім одноосового пресування можливі й інші способи пресування.

Крім того, було виявлено, що механічна стійкість отриманих електродних матеріалів набагато вище при тому же ступені пресування (наприклад, при тому ж прикладеному тиску та/або при тій же ущільнюючій одноосовій деформації), коли для вихідного матеріалу, спрямованого у процес пресування, використовують широкий та/або спроектований розподіл частинок за розміром.

Таким чином, застосування широкого та/або спроектованого розподілу частинок за розміром є корисним для 1) створення більше стійкої провідної мережі між частинками, 2) збільшення щільності впакування та зменшення товщини електродів і вартості систем і 3) підвищення механічної стійкості отриманого продукту. На фіг. 3А і 3В наведений приклад порівняння одноmodalного впакування, зображеного на фіг. 3А, з двохmodalним впакуванням, зображеним на фіг. 3В, на якому показані різні розподіли частинок за розміром у двохmodalному впакуванні та більше дрібні частинки, що заповнюють зазори між більше великими частинками.

Діапазони розмірів, що відносяться до різних форм DRI, і деякі необмежуючі обговорення того, як їх зробити, наведені нижче. Основним міркуванням є збереження мікропористості губчастого заліза при зменшенні розміру частинок. Було показано, що такі способи зменшення розміру частинок дозволяють зменшити розмір частинок при по суті одночасному збереженні внутрішньої мікропористості губчастого заліза. В якості одного з необмежуючих прикладів, DRI може бути у формі цільних котунів, таких як котуни розміром приблизно від 6 мм до 20 мм, отримані у шахтній печі. Інші способи можуть характеризуватися іншими переважними діапазонами розмірів. Наприклад, деякі процеси прямого відновлення, такі як процеси у псевдозрідженому шарі, дозволяють первинно одержувати більше дрібні частинки DRI. В якості з одного необмежуючих прикладів, можна використовувати псевдозріджені шари, в результаті чого частинки мають розмір винятково менше 6 мм. В якості одного з необмежуючих прикладів, DRI може бути у формі подрібненого DRI, яке зазвичай може бути щонайменше у два рази менше, ніж цільні котуни DRI, наприклад, від приблизно 3 мм до приблизно 10 мм, часто у 3-5 разів менше, наприклад, від 1 мм до 6 мм. В якості необмежуючих прикладів, таке DRI можна одержати способами, які включають шокую дробарку, жираторну дробарку, що розмелюють вальці під високим тиском і/або молоткову дробарку з більше меншою енергією. У деяких випадках розмір частинок DRI можна зменшити за допомогою безконтактних способів або способів з обмеженими контактами, таких як видавлювання DRI при швидкому обертанні з такою великою швидкістю, що воно розпадається. В якості одного з необмежуючих прикладів, DRI може бути у формі тонкоподрібненого або розмеленого у порошок DRI, наприклад, з розміром від приблизно 0,1 мм до приблизно 2 мм. В якості одного з необмежуючих прикладів, таке DRI можна одержати за допомогою молоткової дробарки з більше високою енергією, вертикальної дробарки й/або іншого способу з більше тонким подрібнюванням. В якості інших необмежуючих прикладів, також можна використовувати інші форми губчастого заліза, такі як губчате залізо, отримане для порошкової металургії за допомогою, наприклад, процесу одержання губчастого заліза Хеганеса. Деякі конкретні деталі варіантів реалізації спроектованих розподілів за розміром можуть включати цільні котуни DRI, змішані з подрібненим DRI та/або змішані з дрібнодисперсними частинками DRI, при цьому частинки подрібненого DRI у 3-7 разів менше, ніж цільні котуни DRI. Деякі конкретні деталі варіантів реалізації спроектованих розподілів за розміром можуть включати цільні котуни DRI, змішані з подрібненим DRI і/або змішані з дрібнодисперсними частинками DRI, при цьому дрібнодисперсні частинки DRI є відходами установки прямого відновлення, які не можуть потрапити в електричну дугу в піч. Деякі конкретні деталі варіантів реалізації спроектованих розподілів за розміром можуть включати DRI у вигляді цільних котунів із шахтної печі, змішаних з отриманому у псевдозрідженому шарі DRI набагато більше дрібного розміру. Деякі конкретні деталі варіантів реалізації спроектованих розподілів за розміром можуть включати подрібнене DRI, що включає DRI, подрібнене за допомогою різних способів і, отже, досягає різних розподілів за розміром частинок. Деякі конкретні деталі варіантів реалізації спроектованих розподілів за розміром можуть включати спосіб дроблення, при цьому зазначений спосіб дроблення розроблений таким чином, щоб одержати по суті широкий розподіл за розміром.

У деяких варіантах реалізації може потребуватися задана товщина електрода. У таких умовах розмір частинок можна вибрати таким чином, щоб він був або набагато менше загальної товщини електрода, або щоб частинки формували ціле число шарів за всією товщиною електрода. Це показано на фіг. 4, ілюстрація бажаної (суцільні горизонтальні лінії) та небажаної (пунктирні горизонтальні лінії) товщини анода відносно цілочислового приросту шарів частинок пористого заліза у формі частинок (наприклад, DRI). Може бути вигідно координувати товщину анода та діаметр частинок пористого заліза у формі частинок для забезпечення підходящого впакування всередині анода. Крім того, додавання деякої частки подрібненого пористого заліза у формі частинок може сприяти опосередкуванню такого ефекту за рахунок зменшення приросту необхідної товщини незалежно від діаметра цільних котунів. На фіг. 4 показаний приклад бажаної (горизонтальні лінії 2 і 4) та небажаної (пунктирні лінії 1 і 3) товщини анода відносно цілочислового приросту шарів частинок DRI. Може бути вигідно координувати товщину анода та діаметр частинок DRI для забезпечення підходящого впакування всередині анода. Крім того, додавання деякої частки подрібненого DRI може сприяти опосередкуванню такого ефекту за рахунок зменшення приросту необхідної товщини незалежно від діаметра цільних котунів.

У певних варіантах реалізації залізовмісні електродні матеріали і залізні електроди, описані у даному винаході, можна використовувати в якості негативного електрода у лужних електрохімічних гніздах, таких як Fe-Ni, Fe-MnO₂, або Fe-повітряних акумуляторних батареях; інші позитивні електроди, відомі фахівцям у даній області техніки, можна з'єднувати попарно із залізними (негативними) електродами.

Повторне нагрівання та регульоване охолодження DRI для досягнення фазового поділу.

DRI й інші пористі залізовмісні матеріали у формі частинок являють собою недорогі форми заліза для

застосування в залізних негативних електродах в акумуляторних батареях, але DRI й інші пористі залізовмісні матеріали у формі частинок часто містять значну кількість карбіду заліза, часто називаного цементитом. Цементит і залізо мають складну електрохімічну поведінку при гальванічному з'єднанні, так що, як було виявлено, проектування залізного негативного електрода, що складається з вихідних матеріалів, що включають як залізо, так і цементит, утруднене, але електроди, що містять аналогічну кількість графіту, може бути легше розробляти внаслідок більше простих шляхів реакції. Такі електроди з низьким вмістом цементиту можуть мати більше високу продуктивність на практиці.

Автори даного винаходу виявили, що для розробки більше високопродуктивних залізних електродів, що містять вуглець, можна використовувати метастабільну природу карбіду заліза. Більше конкретно, можна нагрівати цементитовмісні пористі залізовмісні матеріали у формі частинок до температури, при якій карбід заліза розкладається з утворенням заліза та графіту, що, тим самим, поліпшує робочі характеристики пористих залізовмісних матеріалів у формі частинок. Загальні вимоги до нагрівання полягають у тому, що матеріал витримує при досить високій температурі для того, щоб метастабільна фаза карбіду заліза перетворилася в залізо та графіт. Кінетика такої реакції розкладання є складною, але добре вивчена в області сталеплавильного виробництва. Температурою та часом можна керувати для регулювання масштабу довжини мікроструктури залізної та графітової фаз. У загальному випадку, масштаб довжини при фазовому поділі може залежати від застосування акумуляторного електрода, при цьому більше низькі температури сприяють фазовому поділу більше дрібних мікроструктур, а більше високі температури сприяють фазовому поділу більших мікроструктур. У загальному випадку, температура обробки повинна становити від приблизно 300 °C до нижче приблизно температури евтектоїда залізо-вуглець, що становить 727 °C. Вище такої температури значна кількість вуглецю розчиняється в залізі, що, тим самим, накладає обмеження на кількість цементиту, яка може зазнавати фазового поділу. Переважні діапазони температур можуть становити від 500 до 650 °C залежно від застосовуваних матеріалів.

Можна також підтримувати пористі залізовмісні матеріали у формі частинок у гарячому стані після вивантаження з відновлювальної печі, щоб забезпечити фазовий поділ цементиту у пористих залізовмісних матеріалах у формі частинок без необхідності його повторного нагрівання, або зменшити кількість часу й енергії, необхідних для повторного нагрівання матеріалів до температури фазового поділу. Такий процес можна назвати "гарячим вивантаженням". Концепції гарячого розвантаження та повторного нагрівання можна об'єднати: пористі залізовмісні матеріали у формі частинок можна охолоджувати до проміжної температури і повторно нагрівати та витримувати при температурі повторного нагрівання для досягнення фазового поділу. Для регулювання мікроструктурних характеристик будь-якого цементиту, що залишився, можна регулювати профілі охолодження зазначених процесів.

Способи очищення залізних електродів від вуглецю.

У самому широкому змісті, часто становить інтерес зниження рівня домішок в електродах для вторинних акумуляторних батарей з метою поліпшення продуктивності електрода, але це, як правило, супроводжується відповідними витратами внаслідок, наприклад, додаткової обробки. Інновації, що є низьковитратними способами очищення електродів, становлять інтерес для багатьох різних типів електродів. У деяких варіантах реалізації може бути вигідно мати низькі рівні вуглецю у залізних негативних електродах для варіантів застосування для вторинного накопичення. Це може бути вигідним, наприклад, з електрохімічних причин або з причин, пов'язаних із продуктивністю комірки, або з причин, пов'язаних з технологічністю виготовлення, таких як здатність консолідувати і зв'язувати DRI з формуванням анода за допомогою гарячого пресування. Оскільки кінцевий вміст вуглецю в DRI може мінятися залежно від вихідних матеріалів, було б бажано мати можливість знижувати рівні вуглецю у DRI шляхом керування параметрами обробки і/або застосування додаткових процесів.

Для зміни вмісту вуглецю у залізовмісних матеріалах можна використовувати хімічні реакції пористих залізовмісних матеріалів у формі частинок з газоподібною атмосферою. Деякі з таких реакцій описані нижче. Зазначені реакції можуть відбуватися шляхом селективної модифікації технологічної атмосфери у процесах відновлення, процесах спікання або в якості окремого спеціально передбаченого процесу хімічної обробки.

Застосування слідових кількостей кисню для зниження вмісту вуглецю у пористому залізовмісному матеріалі у формі частинок: Одним із потенційних способів зниження рівнів вуглецю у пористому залізовмісному матеріалі у формі частинок є навмисний вплив на нього кисневмісної атмосфери, при цьому губчасте залізо перебуває при підвищених температурах, наприклад, за рахунок подання слідових кількостей кисню в атмосферу, що оточує DRI. Завдання полягає в окисненні вуглецю у губчастому залізі для того, щоб вилучити його з матеріалу губчастого заліза. Реакцією, що протікає, буде або $C + O_2 \rightarrow CO_2$, або $2C + O_2 \rightarrow CO$. Згідно з діаграмою Елінгема, показаною на фіг. 5, температура, при якій такі реакції починають бути спонтанними, становить ~700 °C (залежно від чистоти атмосфери). Вільні енергії окиснення вуглецю та заліза перетинаються в межах такою температурою: ~700 °C, що вказує на те, що вуглець може відновлювати залізо за умови, що вуглецевмісні газоподібні побічні продукти видаляють в міру протікання реакції відновлення. Реакція протікає у вигляді: $Fe_3O_4 + 4C \rightarrow 3Fe + 4CO$ (або, залежно від температури, $Fe_3O_4 + 2C \rightarrow 3Fe + 2CO_2$, при цьому для інших оксидів заліза існують аналогічні інші реакції відновлення). При протіканні такої реакції утворюється газоподібний побічний продукт, або CO_2 , або CO , який необхідно видаляти, щоб реакція відновлення тривала.

Застосування кисню у DRI для видалення вуглецю у пористому залізі у формі частинок: Якщо температура вибрана правильно, вуглець може зменшити кількість оксидів заліза, навіть коли обидва перебувають у твердому стані. У загальному випадку, це може відбуватися при температурі вище ~700 °C, коли окиснення вуглецю починає ставати термодинамічно переважним стосовно окиснення заліза, в результаті чого протікає реакції у вигляді $FeO + C \leftrightarrow Fe + CO_{газ}$ або $2FeO + C \leftrightarrow Fe + CO_{2,газ}$. Це може призвести до видалення домішок вуглецю з пористого заліза у формі частинок й утворення більшої кількості металевого заліза замість оксидів заліза, при цьому і те, й інше є бажаним з точки зору електрохімічної поведінки. Потік інертного газу, такого як аргон або азот, необхідний, щоб зрушити реакцію відновлення вправо. Величину потоку можна вибрати на основі кількості

газоподібних продуктів, які необхідно видаляти в міру протікання процесу відновлення. Застосування кисню, який вже є присутнім у пористому залізі у формі частинок, зручне тим, що така реакція не вимагає твердого контролю над загальним вмістом кисню в атмосфері й є самообмежуючою та, отже, легко регульованою. Небажане окиснення заліза по суті вдається уникнути, оскільки кисень не вводять.

Переважні діапазони температур для такого способу видалення вуглецю із заліза можна вибрати таким чином, щоб розчинність вуглецю в залізі була високою, та, отже, щоб кінетика розчинення Fe_3C і графіту була швидкою (тобто вище температури евтектоїда $\text{Fe}-\text{C}$, що становить $\sim 723^\circ\text{C}$). Верхній кінець температурного діапазону обмежений витратами на нагрівання, ущільненням і прилипанням пористого заліза у формі частинок під час подання матеріалу, яке може відбуватися при підвищених температурах. Таким чином, бажаними є температури, які не настільки високі, щоб викликати зазначені явища. У загальному випадку, оптимальні робочі температури становлять від $\sim 700^\circ\text{C}$ до $\sim 900^\circ\text{C}$ для зневуглецювання заліза за допомогою його власних оксидів.

У деяких варіантах реалізації губчасте залізо можна використовувати безпосередньо з установки для виробництва DRI, використовуючи сховану теплоту, втримувану в матеріалі. У таких випадках для забезпечення зневуглецювання можна використовувати додаткові подання інертних газів і нагрівання для регулювання температури матеріалу і його атмосфери.

На фіг. 6 показана діаграма стану "залізо-вуглець". Стадією обмеження швидкості для реакцій відновлення $\text{FeO}-\text{C}$ нижче температури евтектоїда $\text{Fe}-\text{C}$ при $\sim 723^\circ\text{C}$ часто є розчинення та дифузія вуглецю в залізі, внаслідок чого вуглець може досягати сусідніх оксидів і відновлювати їх. Щоб таке відновлення могло протікати швидше, матеріал необхідно нагрівати вище температури евтектоїда, вище якої розчинність вуглецю в залізі збільшується приблизно у 40 разів, що, тим самим, забезпечує набагато більше швидку дифузію вуглецю в оксиди у губчастому залізі й їх наступне відновлення.

Застосування хімічно активного газу з меншою окислювальною здатністю для полегшення зневуглецювання без окиснення заліза: У деяких випадках може бути важко досягти достатнього ступеня зневуглецювання без супутнього окиснення губчастого заліза. У таких випадках третім способом досягнення зневуглецювання може бути додавання хімічно активного газу в атмосферу, що містить губчасте залізо, для видалення вуглецю. У деяких випадках зазначений спосіб є переважним, оскільки таке залізо менше піддане окисненню, ніж чисте залізо. У деяких варіантах реалізації для видалення вуглецю можна використовувати водень за допомогою реакцій у вигляді: $\text{Cs} + 2\text{H}_{2,\text{газ}} \rightarrow \text{CH}_{4,\text{газ}}$ (це працює як із цементитним, так і з графітовим вуглецьми). Кінетика та термодинаміка такої реакції найкраще працюють при проміжних температурах від 300 до 800°C , при цьому реакція зневуглецювання стає стехіометрично обмеженою при високих температурах ($> 800^\circ\text{C}$) і кінетично повільною при низьких температурах ($< 300^\circ\text{C}$). У деяких варіантах реалізації можна використовувати діоксид вуглецю для зневуглецювання губчастого заліза при високих температурах (зазвичай вище 700°C). Температури і парціальні тиски, при яких CO викликає навуглецювання, добре вивчені при виробництві чавуну та регулюються реакцією Будуара: $\text{CO}_{2,\text{г}} + \text{C}_{\text{тв.}} \leftrightarrow 2\text{CO}_{\text{газ}}$. Додавання CO_2 зрушить таку реакцію вправо з утворенням CO за рахунок окиснення вуглецю. Більше низька окислювальна активність CO_2 у порівнянні з киснем може ефективно обмежувати ступінь окиснення заліза, що протікає. У деяких варіантах реалізації в якості зневуглецюючого газу можна використовувати воду, що призводить до реакцій у вигляді $\text{C}_{\text{тв.}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{газ}} \rightarrow \text{CO}_{\text{газ}} + \text{H}_{2,\text{газ}}$. Вода може являти собою більш ефективний зневуглецюючий агент, ніж водень з точки зору кінетики, й її реакція з вуглецем призводить до утворення відновлювальних газів, які можуть обмежувати або запобігати окисненню заліза, а у деяких випадках можуть призводити до відновлення оксидів заліза. Воду можна додавати в якості ефективного зневуглецюючого агента у тих же температурних діапазонах, що і діапазони, застосовувані для водню. Концентрацію води можна регулювати шляхом барботування вхідних газів через товщу води при регульованій температурі, що, тим самим дозволяє регулювати точку роси.

Автори даного винаходу виявили, що деякі форми вуглецю, що містяться у DRI, демонструють більше швидку кінетику зневуглецювання, ніж інші форми вуглецю. У деяких випадках DRI з високим вмістом графітового вуглецю може зазнавати зневуглецювання швидше, ніж DRI з порівнянною кількістю загального вуглецю, але з високим вмістом цементитного вуглецю. Таким чином, DRI з високим вмістом графітового вуглецю можна ефективно використовувати в якості вихідного матеріалу для процесів зневуглецювання, щоб мінімізувати кількість газів, час і температуру, необхідні для обробки. Реакції зневуглецювання, які може бути легше довести до завершення (або коли реакцію можна приблизно розглядати як доведену до завершення), демонструють більше стабільні характеристики й однорідність продукту. Однорідність властивостей матеріалу за всією частинкою порошку та всередині неї є дуже переважною властивістю для активних матеріалів акумуляторних батарей, оскільки однорідні вихідні склади запобігають концентрації струмів і прискорену деструкцію у певних точках електродів. У деяких варіантах реалізації зневуглецьовані матеріали включають у металургійно зв'язаний електрод. У деяких варіантах реалізації зневуглецьовані матеріали включають в електроди, які не зв'язані металургійно, але можуть, наприклад, бути включені в конструкції, що містять активні матеріали, спресовані між двома струмоприймачами.

У деяких варіантах реалізації для керування хімічними реакціями можна використовувати комбінації технологічних газів. Наприклад, суміші $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ і CO/CO_2 можна використовувати для регульованого зневуглецювання пористих залізовмісних матеріалів у формі частинок. Такі суміші можуть, наприклад, ефективно встановлювати кисневий потенціал технологічної атмосфери таким чином, щоб кисень міг окислювати вуглець, що присутній у залізі, без окиснення самого заліза. Склад таких технологічних газів можна розрахувати на основі термодинамічних даних або визначити емпірично.

Зневуглецювання можна здійснювати на різному встаткуванні для обробки матеріалів, включаючи випалювальні печі, тунельні печі, штовхальні печі або печі з обертовим подом.

Наступна обробка металургійно зв'язаних електродів:

Після зв'язування та зневуглецювання сформований електрод може зазнавати ряду обробок, включаючи (1) швидке охолодження, (2) різання, (3) очищення поверхні та (4) нанесення захисного шару.

Для швидкого охолодження пресованого електрода можна використовувати різні способи. Швидке охолодження є переважним з точки зору мінімізації ризиків повторного окиснення та фазової трансформації, які можуть відбуватися під час повільного охолодження. У деяких варіантах реалізації охолодження можна здійснювати шляхом обдування повітрям або інертними газами, при цьому потік газоподібних з'єднань має достатній обсяг і швидкість для посилення теплопередачі від пресованого електрода до газу; при необхідності газ можна рециркулювати через теплообмінники або інші засоби для відведення та повторного застосування тепла, відведеного з пресованого анода. Інші варіанти реалізації можуть включати застосування рідинного охолодження, такого як розпилення або занурення у резервуар; безперервний процес вимагає застосування транспортування в зону рідинного охолодження та з неї із застосуванням таких засобів, як бремсберг, конвеєрна стрічка або інші широко застосовувані способи. Рідини слід вибирати таким чином, щоб підсилити охолодження та запобігти окисненню електрода або через хімічну несумісність, або внаслідок домінування кінетики реакції окиснення; рідину, таку як вода, масло, азот або акумуляторний електроліт, можна використовувати окремо або в комбінації. У деяких варіантах реалізації охолодна рідина може також служити в якості захисного покриття.

Після охолодження розміри електрода можуть зажадати коректування для відповідності припустимому відхиленню від установлених розмірів для акумуляторної батареї.

Для видалення залишків від стадії пресування та наступних стадій може знадобитися очищення поверхні отриманого електрода. Перед нагріванням і консолідацією можна використовувати такі широко застосовувані способи, як промивання розчинниками, кислотне травлення, піскоструминна обробка/ дробоструминна обробка. [00202] Заключною стадією при обробці анода є покриття електрода захисним шаром для запобігання повторного окиснення електрода під час транспортування, зберігання, обігу та складання акумуляторної батареї. У деяких варіантах реалізації нанесення покриття може полягати у формуванні тонкого шару оксиду заліза в регульованій, злегка окислювальній атмосфері (процес, також відомий як пасивація). Інші варіанти реалізації можуть включати напилювання або занурення пресованого анода в хімічний реагент, що охороняє від іржавіння, або рідини, сумісні з електролітом акумуляторної батареї. Інші варіанти реалізації можуть включати нанесення герметизуючої плівки або оболонки під вакуумом.

Маніпулювання й автоматизація для маніпулювання

Механічна природа консолідованого електрода з пористого заліза у формі частинок допускає обмежену міцність та збільшення маси й об'єму залежно від вмісту вуглецю та процесу консолідації. Така обмежена міцність означає, що обіг із зазначеними матеріалами може бути утруднений та вимагає нових засобів, процесів і механізмів маніпулювання для акумуляторних електродів. Для збільшення міцності та зручно-оброблюваності електрода можна використовувати засоби, що включають матеріал-основу, прикріплену до однієї або обох сторін електрода. Така основа може являти собою проникний залізовмісний матеріал, який відразу діє в якості струмопровідної підкладки. Матеріал-основа також може перебувати в середині електрода, при цьому пористий залізовмісний матеріал у формі частинок консолідований на обох поверхнях. У консолідованому електроді можуть існувати області, спеціально виготовлені з високою щільністю, що забезпечують підвищену міцність та провідність, спроектовані за певною схемою для полегшення потоку електричного струму або забезпечення підвищеної міцності в місцях, що несуть навантаження. На один або декілька країв електрода може бути нанесена захисна рамка, яка може служити для збільшення міцності при обігу, а також для забезпечення місця для електричного з'єднання. У самому електроді або у таких захисних рамках можуть перебувати елементи, які дозволяють закріплювати, розміщати, обмежувати або підвішувати електрод усередині електрохімічного складання. Такі елементи можуть являти собою отвори, канавки, борозенки, уступи і можуть забезпечувати за допомогою захисної рамки контакт електрода тільки з його механічною опорою та струмопровідною доріжкою, а не з самим матеріалом, отриманим із DRI. Конструкція електрода може включати конкретні елементи, які дозволяють щільно та надійно впаковувати електроди, у транспортувальний контейнер, який потім повертають на місце виготовлення для повторного застосування. Консолідацію електрода можна виконувати в місці відновлення матеріалу або зневуглецювання, при цьому електрод можна охолоджувати і пасивувати шляхом занурення в сам електроліт усередині посудини, яка служить в електрохімічному пристрої в якості ємності для рідини.

Способи поділу блоків металургійно зв'язаних залізних електродів

При обробці товстих або крихких електродів виникає декілька проблем, оскільки такі електроди не можна повертати або іншим способом компактно впаковувати із застосуванням способу "желейний рулет" або інших аналогічних способів, таких як способи, застосовувані для літій-іонних акумуляторних батарей. Таким чином, товсті або крихкі електроди слід розрізати або надавати їм необхідний розмір і форму. Такий спосіб повинен забезпечувати електроди постійної форми і маси. Труднощі виникають при безперервній обробці, коли крихкий матеріал повинен бути розрізаний з одержанням певної форми без ушкодження іншої частини електрода. Такі процеси різання стають ще більше складними, коли крихкі електроди виготовляють з металу й особливо металургійно зв'язаних металевих частинок, таких як залізо. Зазначені металургійно зв'язані електроди, як правило, виготовляють з мікроскопічно твердих і термостійких матеріалів, але вони можуть бути тендітними макроскопічно внаслідок, наприклад, того, що розмір точок контакту між частинками суттєво менше, ніж самі частинки, і через супутню концентрацію напруг у точках контакту. Мікроструктуру металургійно зв'язаних металевих електродів, як правило, ретельно розробляють для досягнення потрібної комбінації пористості, площі поверхні та механічної стійкості для даного застосування. Для мінімізації втрати або недовикористання матеріалу потрібні способи різки, які зберігають таку спроектовану мікроструктуру в як можна більшій частині електрода.

Архітектура системи: У деяких випадках металургійно зв'язані електроди можна виготовляти таким чином, щоб вони здобували їхню необхідну форму та розмір під час процесу зв'язування та тому подальший поділ не був потрібен. У деяких випадках виготовлення окремих електродів може відбуватися із застосуванням будь-якої кількості інтегрованих операцій, які включають різання, концентрацію напруг або інші операції, під час самого процесу зв'язування, наприклад, із застосуванням елементів для концентрації напруг, вбудованих у ролики, застосовувані для гарячого брикетування прямого відновленого заліза. У деяких випадках електрод можна

формувати безперервно та розділяти на більше пізній стадії процесу. У тих випадках, коли електрод формують безперервно, електроду можна надавати необхідний розмір шляхом розрізування або за допомогою іншої операції поділу, здійснюваної вздовж переміщення електрода. Операція поділу може бути стаціонарною або вона може переміщатися відповідно до електрода за допомогою такої інфраструктури, як кулачкова система.

Розділовий механізм: У деяких випадках металургійно зв'язані залізні електроди можна розрізати або інакше розділяти будь-яким способом, який зазвичай застосовують для різання металів й інших матеріалів, особливо тих, які є крихкими, у тому числі, але не обмежуючись ними: із застосуванням зрушення або іншої дії, що пресує, із застосуванням абразивної пилки, алмазної пилки, ланцюгової пилки або іншого обертового різального інструмента, із застосуванням водяного струменя, потоку дробоструминного апарата, зварювальних пальників, лазера або шляхом надрізання та розламування. У деяких випадках можна використовувати комбінацію перерахованих способів різання або поділу, наприклад, ротаційний ріжучий пристрій, застосовуваний для надрізання електрода з наступним механізмом розламування. У деяких випадках електроди можна розділяти за допомогою високошвидкісного текучого середовища, такого як повітряний або кисневий ніж, спроектований для досягнення певних механічних і/або термічних умов на електроді. У деяких випадках електрод можна сконструювати з таким тепловим профілем, який особливо підходить для різання або поділу, за допомогою способів, що включають, але не обмежених ним, введення в електрод кисню. У деяких випадках кисень можна ввести у процес різання, щоб викликати реакцію локального нагрівання, при якій кисень реагує з металом електрода, що викликає його нагрівання. У деяких випадках уведення кисню або інше джерело тепла можна використовувати для створення теплового градієнта та локального розм'якшення електрода у певній точці, що успішно сприяє поділу, наприклад, шляхом розтріскування, плавлення або їх комбінації.

Зміцнення: У деяких випадках ріжучий механізм може забезпечити зміцнення електрода, яке може відбуватися за допомогою термічних або механічних засобів. У деяких випадках стадію зміцнення можна включати до, під час або після різання.

Архітектури системи для встаткування для виробництва гарячепресованих анодів.

Гарячепресовані електроди можна виготовити при дуже низьких витратах й із застосуванням устаткування з високою пропускну здатністю. Це особливо вірно, якщо таке встаткування інтегроване в установку для виробництва DRI. DRI можна перенести безпосередньо з печі для одержання DRI в устаткування для гарячого пресування. Таке сполучення може виглядати дуже схожим на сполучення "піч для одержання DRI - HBI", коли гарячий матеріал безпосередньо випливає з печі в устаткуванні для гарячого брикетування. Таке компонування виключить необхідність повторного нагрівання DRI перед напрямком в устаткування для гарячого пресування. Це дозволить зменшити витрати, енергію та в остаточному підсумку збільшити пропускну здатність виробничого встаткування.

Гарячепресовані аноди можна виготовити при дуже низьких витратах й із застосуванням устаткування з високою пропускну здатністю. Для зниження витрат на транспортування та маніпулювання під час виробництва виробничу лінію з виготовлення гарячепресованих анодів можна розташувати поруч із установкою з одержання DRI. Однак таке встаткування з виробництва гарячепресованих анодів не має потреби в інтеграції з устаткуванням для одержання DRI. Може бути вигідно розділити два зазначені комплекти встаткування, щоб забезпечити попередню обробку DRI перед поданням матеріалу в установку гарячого пресування для поліпшення властивостей матеріалу, пов'язаних з пористістю, формою й адгезією.

Устаткування для виробництва гарячепресованих анодів можна спроектувати таким чином, щоб воно було контейнеризованим, тобто, щоб воно було модульним і мобільним. Це може бути дуже вигідно, оскільки вартість устаткування може бути дуже високою, при цьому зазначене встаткування буде, імовірно, використовуватися для конкретного проекту, який, імовірно, одержить DRI від найближчого заводу з виробництва DRI, що дозволить знизити витрати на транспортування та маніпулювання. Контейнеризоване встаткування для виготовлення гарячепресованих анодів можна описати, але не обмежуючись цим, у такий спосіб: системи нагрівання, пресування або прокатки, установлені у стандартному 40-футовому (приблизно 12 м) контейнері(ах), виробниче встаткування у 45-футовому (приблизно 14 м) контейнері(ах). Такий контейнер можна обладнати стандартними інтерфейсами для інтеграції у піч для одержання DRI, устаткування для маніпулювання з DRI, для автоматизації маніпулювання з гарячепресованими анодами. Зазначена інтеграція дозволить здійснювати автодорожні або морські перевезення на проектні об'єкти або об'єкти з виробництва DRI. Устаткування можна легко транспортувати на об'єкти з виробництва DRI, які розташовані якнайближче до місць розгортання встаткування для накопичення енергії компанії Form energy. Зазначене контейнеризоване встаткування може включати функціональні засоби для зневуглючення.

Механізм, застосовуваний для встаткування для виробництва гарячепресованих анодів, можна описати як, але не обмежуючись ними, наступні методології проектування. Зазначений механізм може використовувати безперервну роликову систему, аналогічну системі, яка застосовується в архітектурах устаткування для гарячого брикетування. Зазначений механізм може використовувати напівбезперервний процес, такий як одноосьова система пресування. Для збільшення пропускну здатності встаткування він може включати автоматичне маніпулювання з матеріалами на вході та виході з такого одноосьового преса. У системі пресування можна використовувати наступні системи керування: Гідравлічний або пневматичний поршень. Керування за допомогою кулачкових механізмів. Керування із приводом від ходового гвинта, електромагнітне керування. Такий механізм може включати напрямні паралельні пластини для забезпечення однорідності розмірів і стабільності пресування.

Механізм, застосовуваний для встаткування для виробництва гарячепресованих анодів, можна описати як, але не обмежуючись ними, наступні методології проектування. Матеріал можна подавати у пристрій пресування за допомогою конвеєрної стрічки, такої як приводний механізм. Зазначений механізм може являти собою автономний конвеєр або конвеєрну стрічку, яку потім вбудовують в анодний електрод і використовують для струмознімання.

Механізм, застосовуваний для встаткування для виробництва гарячепресованих анодів, можна описати як,

але не обмежуючись ними, наступні методології проектування. Устаткування для плоского або ротаційного пресування (аналогічне встаткуванню для пресування таблеток), в якому використовують декілька зон гарячого пресування та маніпулювання з матеріалами, що включає декілька паралельних або східчастих зон гарячого пресування. За допомогою такого встаткування можна одержувати електроди у формі невеликих (10 см × 10 см) плиток або більших (100 см × 100 см) панелей.

Анодне складання може включати вбудований струмоприймач.

Спосіб керування для пресування матеріалу також може працювати як спосіб керування для відрізання вбудованого струмоприймача від безперервного листа.

Архітектури системи для варіантів реалізації гарячепресованого анода

Архітектура реактора дозволяє ідеально використовувати металургійно зв'язані анодні електроди з великою площею (~1 м²), виготовлені безпосередньо з DRI або вихідного матеріалу у процесі виробництва сталі. Електроди з великою площею важко виготовити за допомогою пресування або виробничого процесу із застосуванням роликів, оскільки такі електроди вимагають дуже великого, твердого встаткування для пресування. Може бути вигідно виготовляти електроди з великою площею з більше дрібних деталей, виготовлених із застосуванням меншого, більше простого автоматизованого встаткування. Гарячепресований анод можна зібрати із застосуванням більше дрібних гарячепресованих анодних блоків, які потім з'єднують разом. Такий спосіб складання включає, але не обмежується ними, приварювання електромеханічним способом або безпосередньо до пресовки DRI, або до вбудованого та/або виступаючого струмоприймачу, ковка, термічне зв'язування, електрохімічне спікання.

При застосуванні способу на основі гарячих роликів анодні електроди можна виготовити у вигляді панелей або невеликих деталей (30 см × 30 см) шляхом застосування більших роликів, які містять вирізані елементи в ролик для формування пресовки у формі листа. Матеріал буде формуватися у порожньому просторі вирізаної частини ролика. Коли ролик повертається та відрізає сегменти на кінцях ролика, відбувається "відщиповування" листової пресовки й її розрізування у вигляді листа.

Описаний вище спосіб також можна використовувати для створення анодного складання, коли формують трохи пресовок DRI і з'єднують з одним сталевим сітчастим струмоприймачем. Потім таке складання у вигляді гірлянди можна обробляти у безперервній формі або розрізати на більше пізній стадії для полегшення маніпулювання.

І навпаки, можна одержувати безперервний лист матеріалу у безперервному процесі. Такий матеріал можна безперервно витягати для системи безперервного або напівбезперервного пресування, а потім розрізати на наступній стадії обробки на виробничій технологічній лінії.

Зберігання DRI може бути складним і дорогим завданням, простий спосіб обійти цю проблему полягає у виготовленні невеликих пакетів DRI для обігу та зберігання. Потім такі пакети можна пресувати безпосередньо у пристрої гарячого пресування. Зазначені пакети можна зробити або з матеріалу, подібного металевій сітці, або з пластикового матеріалу. При виготовленні з пластику оболонку пакета можна термічно спалювати на більше пізній стадії процесу виготовлення анода.

Способи струмознімання з металургійно зв'язаних електродів

Важко збирати струм з деяких металургійно зв'язаних залізних електродних архітектур й особливо залізних електродів, виготовлених із застосуванням зварювання або гарячого пресування. Більше конкретно, високі струми, створювані такими електродами, часто вимагають зварених з'єднань, при цьому може бути важко здійснювати безпосереднє приварювання до електродів, виготовлених із високопористих залізовмісних матеріалів. У деяких випадках струмознімальний матеріал, який можна легше приварити до електричної шини або клеми, може бути вбудований всередину електрода або на його поверхні або на кінець електрода, який повинен бути з'єднаний із зовнішнім ланцюгом. Струмознімальний матеріал може складатися зі смужок металу, сітчастих листів, перфорованих листів, нерівномірних розгалужених металевих тканин або дроту. У деяких варіантах реалізації струмознімальний матеріал можна вбудовувати в електрод під час того ж процесу металургійного зв'язування, який зв'язує пористий залізовмісний матеріал у формі частинок із самим собою, тоді як в інших варіантах реалізації струмоприймач можна ввести в електрод або зв'язати з ним на другій стадії зв'язування. Струмознімальні матеріали можуть складатися з будь-яких матеріалів, застосованих у даній області техніки для виготовлення струмоприймачів для електродів. У деяких варіантах реалізації струмоприймач виготовлений зі сталі, нікелю та/або міді. У деяких варіантах реалізації менше дорогий матеріал струмоприймача можна покрити корозійностійким матеріалом, як у нікельованій сталі.

У деяких варіантах реалізації матеріали струмоприймача можуть покривати всю поверхню електрода, тоді як в інших варіантах реалізації струмоприймачі можуть бути вбудовані винятково поблизу частини електрода близько клем для полегшення зварювання із сусідніми зовнішніми елементами ланцюга. У випадках, коли струмоприймач вбудований тільки в частину електрода, зазначений струмоприймач може бути вбудований у бічну сторону електрода, виготовленого за допомогою процесу прокатки, при цьому електрод може бути підключений до зовнішнього ланцюга через такий струмоприймач, вбудований в його сторону, як показано, наприклад, на фіг. 13. Над роликами можна розташувати дозатор і можна створити тонку щілину для забезпечення проходження "провідника з виступом". Провідник з виступом можна спресувати із залізом у затисковому пристрої на необхідній каденції. Крім того, наступний пристрій для продовжнього різання може видаляти носій. Якщо довжина провідника з виступом повинна відповідати довжині сляба, то аналогічний виріз можна зробити на протилежній стороні.

У деяких варіантах реалізації металургійно зв'язаний електрод може мати отвори для болтів і кільцевих клем для кріплення для струмознімання.

У деяких варіантах реалізації електричні шини прямо металургійно пов'язані з металургійно зв'язаними електродами.

У деяких варіантах реалізації струмоприймач може служити в якості кошика для розміщення матеріалу під

час операції пресування або зварювання, що дозволяє втримувати матеріал, а також забезпечує зв'язування струмоприймача з активними матеріалами.

У деяких варіантах реалізації на одну або обидві сторони анода можна нанести структурні поверхневі шари 1410. Це аналогічно зовнішньому покриттю паперу на панелях з гіпсокартону, без якого лист гіпсокартону був би дуже неміцним і з ним було би майже неможливо звертатися. Поверхневі шари 1410 можна виготовити з підходящого металевого матеріалу, такого як сталь або нікель, у підходящому форматі, такому як дротяна сітка, тягнений метал або перфорований лист. У деяких випадках поверхневий шар 1410 можна виготовити з пластикового або іншого неметалічного матеріалу. Поверхневий шар 1410 можна зв'язувати з DRI 1420 в якості частини процесу зв'язування (будь те із застосуванням роликів 1430, одноосового пресування або іншого процесу), так що він нерозривно пов'язаний з поверхнею анода. Застосування поверхневого шару 1410 може бути інспіроване потенційною потребою у додатковій механічній стійкості, але, крім того, він може відігравати роль струмоприймача, а також може служити в якості утримуючого екрана для забезпечення того, щоб будь-які вільні частинки DRI 1420 (незалежно від того, чи вдалося їм зв'язатися під час гарячого пресування або вони залишилися вільними після циклування) не могли мігрувати з оболонки анода та порушувати функціонування гнізда. Поверхневий шар 1410 також може відігравати роль механічної інтерфейсної структури, завдяки якій анод можна встановити на інших елементах гнізда під час складання. Поверхневий шар 1410 може відігравати роль під час виготовлення анода, наприклад, діючи в якості конвеєра, на якому DRI 1420 можна дозувати і транспортувати на стадію пресування. У деяких варіантах реалізації до контактних поверхонь електрода можна приєднати по обидва боки перфоровану сталеву сітку з формуванням тришарової структури з струмознімальним конструктивним елементом на контактних поверхнях, яка одночасно поліпшує струмознімання, механічну цілісність та зручно-оброблюваність. Структурні покриття на електродах не обов'язково повинні являти собою струмознімальні елементи і замість цього можуть бути виконані з пластикових або інших підходящих матеріалів. Приклад того, як структурне покриття може бути нанесене на електрод, показаний на фіг. 14.

Різні варіанти реалізації можуть забезпечувати пристрої та/або способи застосування у великомасштабних системах накопичення енергії, таких як системи довгочасного накопичення енергії (LODES), системи короточасного накопичення енергії (SDES) та т.д. Як приклад, різні варіанти реалізації можуть забезпечувати акумуляторні батареї для великомасштабних систем накопичення енергії, таких як акумуляторні батареї для систем LODES. Поновлювані джерела енергії стають все більше розповсюдженими й економічно ефективними. Однак багато поновлюваних джерел енергії зустрічаються з проблемою переривчастості, яка перешкоджає впровадженню поновлюваних джерел енергії. Вплив схильності до переривчастості поновлюваних джерел енергії можна пом'якшити шляхом об'єднання поновлюваних джерел енергії з великомасштабними системами накопичення енергії, такими як системи LODES, системи SDES і т.д. Для підтримання впровадження комбінованих систем виробітку, передачі та накопичення енергії (наприклад, електростанції, на якій є поновлюване джерело виробітку енергії, об'єднане з великомасштабною системою накопичення енергії, та пристрої для передачі електроенергії на кожній із систем, вибраних із електростанції та/або великомасштабної системи накопичення енергії) необхідні пристрої та способи для підтримання проектування й експлуатації таких комбінованих систем виробітку, передачі та накопичення енергії, такі як різні варіанти реалізації пристроїв і способів, описані у даному документі.

Комбінована система виробітку, передачі та накопичення енергії може являти собою електростанцію, що включає одне або більше джерел виробітку енергії (наприклад, одне або більше поновлюваних джерел виробітку енергії, одне або більше неоновлюваних джерел виробітку енергії, комбінації поновлюваних і неоновлюваних джерел виробітку енергії та т.д.), один або більше пристроїв для передачі електроенергії й одну або більше великомасштабних систем накопичення енергії. Пристрої для передачі електроенергії на кожній із систем, вибраних із електростанції та/або великомасштабної системи накопичення енергії, можна спільно оптимізувати із системою виробітку та накопичення енергії або можна накласти обмеження на проектування й експлуатацію системи виробітку та накопичення енергії. Комбіновані системи виробітку, передачі та накопичення енергії можна спроектувати з можливістю досягнення різних цілей за вихідною потужністю при різних конструктивних й експлуатаційних обмеженнях.

На фіг. 15-23 показані різні ілюстративні системи, в яких можна використовувати один або більше аспектів різних варіантів реалізації як частини великомасштабних систем накопичення енергії, таких як системи LODES, системи SDES і т.д. Наприклад, різні варіанти реалізації, описані у даному документі з посиланням на фіг. 1A-14, можна використовувати в якості акумуляторних батарей для великомасштабних систем накопичення енергії, таких як системи LODES, системи SDES і т.д., і/або різні електроди, описані у даному документі, можна використовувати в якості компонентів для великомасштабних систем накопичення енергії. У контексті даного документа термін "система LODES" може означати великомасштабну систему накопичення енергії, спроектовану таким чином, щоб час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) могло становити 24 години або більше, наприклад, 24 години, від 24 годин до 50 годин, більше 50 годин, від 24 годин до 150 годин, більше 150 годин, від 24 годин до 200 годин, більше 200 годин, від 24 годин до 500 годин, більше 500 годин і т.д.

На фіг. 15 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до вітрової електростанції 1502 й одного або більше пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Вітрова електростанція 1502 може бути електрично підключена до пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть бути електрично підключені до мережі 1508. Вітрова електростанція 1502 може виробляти енергію, при цьому зазначена вітрова електростанція 1502 може передавати вироблену енергію в систему 1504 LODES і/або пристрої 1506 для

передачі електроенергії. Система 1504 LODES може накопичувати енергію, отриману від вітрової електростанції 1502 та/або пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Система 1504 LODES може передавати накопичену енергію у пристрої 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть передавати енергію, отриману від однієї або обох систем із вітрової електростанції 1502 та системи 1504 LODES, у мережу 1508 та/або можуть одержувати енергію від мережі 1508 та передавати зазначену енергію у систему 1504 LODES. Вітрова електростанція 1502, система 1504 LODES та пристрої 1506 для передачі електроенергії разом можуть становити електростанцію 1500, яка може являти собою комбіновану систему виробітку, передачі та накопичення енергії. Енергію, вироблювану вітровою електростанцією 1502, можна безпосередньо подавати у мережу 1508 через пристрої 1506 для передачі електроенергії або можна спочатку накопичувати у системі 1504 LODES. У деяких випадках енергія, що подається у мережу 1508, може повністю надходити від вітрової електростанції 1502, повністю надходити від системи 1504 LODES або від комбінації вітрової електростанції 1502 та системи 1504 LODES. Розподіл енергії від комбінованої електростанції 1500, що складається з вітрової електростанції 1502 та системи 1504 LODES, можна регулювати відповідно до встановленого довгострокового (багатоденного або навіть багаторічного) графіку, або можна регулювати відповідно до ринку "на добу вперед" (з попереднім повідомленням за 15 години), або можна регулювати відповідно до ринку "на годину вперед", або можна регулювати у відповідь на сигнали ціноутворення у реальному часі.

В якості одного з прикладів роботи електростанції 1500, систему 1504 LODES можна використовувати для перетворення й "ущільнення" енергії, вироблюваної вітровою електростанцією 1502. В одному з таких прикладів пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 260 мегават (МВт) і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 106 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин (година) і номінальне енергоспоживання 15900 мегават-годин (МВт-год.). В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 300 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність 106 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 200 годин і номінальне енергоспоживання 21 200 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 176 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 53 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 88 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин і номінальне енергоспоживання 13 200 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 277 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 97 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 50 годин і номінальне енергоспоживання 4850 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 315 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 110 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 25 годин і номінальне енергоспоживання 2750 МВт-год.

На фіг. 16 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система, що показана на фіг. 16, може бути аналогічна системі, показаній на фіг. 15, за винятком того, що фотоелектрична (PV) електростанція 1602 може бути замінена на вітрову електростанцію 1502. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до PV електростанції 1602 й одного або більше пристроїв 1506 для передачі електроенергії. PV електростанція 1602 може бути електрично підключена до пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть бути електрично підключені до мережі 1508. PV електростанція 1602 може виробляти енергію, при цьому зазначена PV електростанція 1602 може передавати вироблену енергію у систему 1504 LODES та/або пристрої 1506 для передачі електроенергії. Система 1504 LODES може накопичувати енергію, отриману від PV електростанції 1602 та/або пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Система 1504 LODES може передавати накопичену енергію у пристрої 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть передавати енергію, отриману від однієї або обох систем із PV електростанції 1602 та системи 1504 LODES, у мережу 1508 та/або можуть одержувати енергію від мережі 1508 та передавати зазначену енергію у систему 1504 LODES. PV електростанція 1602, система 1504 LODES і пристрої 1506 для передачі електроенергії разом можуть становити електростанцію 1600, яка може являти собою комбіновану систему виробітку, передачі та накопичення енергії. Енергію, вироблювану PV електростанцією 1602, можна безпосередньо подавати у мережу 1508 через пристрої 1506 для передачі електроенергії або можна спочатку накопичувати у системі 1504 LODES. У деяких випадках енергія, що подається у мережу 1508, може повністю надходити від PV електростанції 1602, повністю надходити від системи 1504 LODES або від комбінації PV електростанції 1602 та системи 1504 LODES. Розподіл енергії від комбінованої електростанції 1600, що складається з PV електростанції 1602 та системи 1504 LODES, можна регулювати відповідно до встановленого довгострокового (багатоденного або навіть багаторічного) графіку, або можна регулювати відповідно до ринку "на добу вперед" (з попереднім повідомленням за 24 години), або можна регулювати відповідно до ринку "на годину вперед", або можна регулювати у відповідь на сигнали ціноутворення у реальному часі.

В якості одного з прикладів роботи електростанції 1600, систему 1504 LODES можна використовувати для перетворення та "зміцнення" енергії, вироблюваної PV електростанцією 1602. В одному з таких прикладів пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 490 МВт і коефіцієнт використання

встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 340 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин і номінальне енергоспоживання 51 000 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 680 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 410 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 200 годин і номінальне енергоспоживання 82 000 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 330 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 31 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 215 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин і номінальне енергоспоживання 32 250 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 510 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 380 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 50 годин і номінальне енергоспоживання 19 000 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 630 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 380 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 25 годин і номінальне енергоспоживання 9 500 МВт-год.

На фіг. 17 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система, що показана на фіг. 17 може бути аналогічна системам, показаним на фіг. 15 і 16, за винятком того, що вітрова електростанція 1502 та фотоелектрична (PV) електростанція 1602 можуть обидві являти собою генератори енергії, що спільно працюють на електростанції 1700. PV електростанція 1602, вітрова електростанція 1502, система 1504 LODES і пристрої 1506 для передачі електроенергії разом можуть становити електростанцію 1700, яка може являти собою комбіновану систему виробітку, передачі та накопичення енергії. Енергію, вироблювану PV електростанцією 1602 та/або вітровою електростанцією 1502, можна безпосередньо подавати у мережу 1508 через пристрої 1506 для передачі електроенергії або можна спочатку накопичувати у системі 1504 LODES. У деяких випадках енергія, що подається у мережу 1508, може повністю надходити від PV електростанції 1602, повністю надходити від вітрової електростанції 1502, повністю надходити від системи 1504 LODES або від комбінації PV електростанції 1602, вітрової електростанції 1502 та системи 1504 LODES. Розподіл енергії від комбінованої електростанції 1700, що складається з вітрової електростанції 1502, PV електростанції 1602 та системи 1504 LODES, можна регулювати відповідно до встановленого довгострокового (багаторічного або навіть багаторічного) графіку, або можна регулювати відповідно до ринку "на добу вперед" (з попереднім повідомленням за 24 години), або можна регулювати відповідно до ринку "на годину вперед", або можна регулювати у відповідь на сигнали ціноутворення у реальному часі. [00240] В якості одного з прикладів роботи електростанції 1700, систему 1504 LODES можна використовувати для перетворення й "ущільнення" енергії, вироблюваної вітровою електростанцією 1502 і PV електростанцією 1602. В одному з таких прикладів пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 126 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %, при цьому пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 126 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 63 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин і номінальне енергоспоживання 9 450 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 170 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %, при цьому пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 110 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 57 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 200 годин і номінальне енергоспоживання 11 400 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 105 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 51 %, при цьому пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 70 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 31 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 61 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин і номінальне енергоспоживання 9 150 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 135 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %, при цьому пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 90 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 68 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 50 годин і номінальне енергоспоживання 3 400 МВт-год. В іншому такому прикладі пікова продуктивність (потужність) вітрової електростанції 1502 може становити 144 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 41 %, при цьому пікова продуктивність (потужність) PV електростанції 1602 може становити 96 МВт і коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) може становити 24 %. Система 1504 LODES може мати номінальну потужність (потужність) 72 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 25 годин і номінальне енергоспоживання 1 800 МВт-год.

На фіг. 18 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна

використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до одного або більше пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Таким чином, система 1504 LODES може працювати "автономно" для розподілу енергії відповідно до ринкових цін і/або для запобігання обмежень при передачі електроенергії. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до одного або більше пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть бути електрично підключені до мережі 1508. Система 1504 LODES може накопичувати енергію, отриману від пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Система 1504 LODES може передавати накопичену енергію у пристрої 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть передавати енергію, отриману від системи 1504 LODES, у мережу 1508 та/або можуть одержувати енергію від мережі 1508 та передавати зазначену енергію у систему 1504 LODES.

Система 1504 LODES та пристрої 1506 для передачі електроенергії разом можуть становити електростанцію 900. Як приклад, електростанція 900 може бути розташована після місця обмеження передачі електроенергії, близько до місця споживання електроенергії. У такій ілюстративній розташованій після зазначеного місця електростанції 1800 час роботи системи 1504 LODES може становити від 24 до 500 годин, при цьому зазначена система 1504 може зазнавати одного або більше повних розрядів у рік для підтримання пікових значень споживання електроенергії у періоди, коли пропускної здатності недостатньо для обслуговування споживачів. Крім того, у такій ілюстративній розташованій після зазначеного місця електростанції 1800 система 1504 LODES може зазнавати декількох неглибоких розрядів (щодо або з більше високою частотою) для регулювання різниці між цінами на електроенергію у нічний та денний час і зниження загальних витрат на постачання споживача електроенергією. В якості додаткового прикладу, електростанція 1800 може бути розташована перед місцем обмеження передачі електроенергії, близько до місця виробітку електроенергії. У такій ілюстративній розташованій перед зазначеним місцем електростанції 1800 час роботи системи 1504 LODES може становити від 24 до 500 годин, при цьому зазначена система 1504 може зазнавати одного або більше повних зарядів у рік для поглинання надлишкової генерації енергії у періоди, коли пропускної здатності недостатньо для розподілу електроенергії серед споживачів. Крім того, у такій ілюстративній розташованій перед зазначеним місцем електростанції 1800 система 1504 LODES може зазнавати декількох неглибоких зарядів і розрядів (щодо або з більше високою частотою) для регулювання різниці між цінами на електроенергію у нічний та денний час і максимізації значення потужності установок для виробітку електроенергії.

На фіг. 19 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до торгово-промислового (C&I) споживача 1902, такого як центр обробки і зберігання даних, завод і т.д. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до одного або більше пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть бути електрично підключені до мережі 1508. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть одержувати енергію від мережі 1508 та передавати зазначену енергію у систему 1504 LODES. Система 1504 LODES може накопичувати енергію, отриману від пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Система 1504 LODES може передавати накопичену енергію торгово-промислового (C&I) споживачу 1902. Відповідно, система 1504 LODES може працювати для перетворення електроенергії, придбаної у мережі 1508, таким чином, щоб відповідати структурі споживання торгово-промислового (C&I) споживача 1902.

Система 1504 LODES і пристрої 1506 для передачі електроенергії разом можуть становити електростанцію 1900. Як приклад, електростанція 1900 може бути розташована близько до місця споживання електроенергії, тобто близько до торгово-промислового споживача 1902, наприклад, між мережею 1508 та торгово-промисловим споживачем 1902. У такому прикладі час роботи системи 1504 LODES може становити від 24 до 500 годин, при цьому зазначена система 1504 може здобувати електроенергію на ринках і, таким чином, можна заряджати систему 1504 LODES у періоди, коли електроенергія коштує дешевше. Потім систему 1504 LODES можна розряджати для забезпечення електроенергією торгово-промислового споживача 1902 у періоди, коли ринкова ціна є високою, що, тим самим, дозволяє компенсувати закупівлі на ринку торгово-промислового споживача 1902. В якості альтернативної конфігурації, замість розташування між мережею 1508 та торгово-промисловим споживачем 1902, електростанцію 1900 можна розташувати між поновлюваним джерелом, таким як PV електростанція, вітрова електростанція та т.д., і пристроями 1506 для передачі електроенергії, які можна підключити до поновлюваного джерела. У такому альтернативному прикладі час роботи системи 1504 LODES може становити від 24 до 500 годин, при цьому зазначена система 1504 може заряджатися у періоди, коли поновлювана енергія може бути доступною. Потім систему 1504 LODES можна розрядити для забезпечення торгово-промислового споживача 1902 поновлюваною вироблюваною електроенергією для того, щоб покрити частину або всі потреби торгово-промислового споживача 1902 в електроенергії.

На фіг. 20 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 1504 LODES може бути електрично підключена до вітрової електростанції 1502 й одного або більше пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Вітрова електростанція 1502 може бути електрично підключена до

пристроїв 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть бути електрично підключені до торгово-промислового споживача 1902. Вітрова електростанція 1502 може виробляти енергію, при цьому зазначена вітрова електростанція 1502 може передавати вироблену енергію у систему 1504 LODES та/або пристрої 1506 для передачі електроенергії. Система 1504 LODES може накопичувати енергію, отриману від вітрової електростанції 1502.

Система 1504 LODES може передавати накопичену енергію у пристрої 1506 для передачі електроенергії. Пристрої 1506 для передачі електроенергії можуть передавати енергію, отриману від однієї або обох систем із вітрової електростанції 1502 та системи 1504 LODES, торгово-промислового споживачу 1902. Вітрова електростанція 1502, система 1504 LODES і пристрої 1506 для передачі електроенергії разом можуть становити електростанцію 2000, яка може являти собою комбіновану систему виробітку, передачі та накопичення енергії. Енергію, вироблювану вітровою електростанцією 1502, можна безпосередньо подавати торгово-промислового споживачу 1902 через пристрої 1506 для передачі електроенергії або можна спочатку накопичувати у системі 1504 LODES. У деяких випадках енергія, що поставляється торгово-промислового споживачу 1902, може повністю надходити від вітрової електростанції 1502, повністю надходити від системи 1504 LODES або від комбінації вітрової електростанції 1502 та системи 1504 LODES. Систему 1504 LODES можна використовувати для перетворення електроенергії, вироблюваної вітровою електростанцією 1502, таким чином, щоб відповідати структурі споживання торгово-промислового споживача 1902. В одному з таких прикладів час роботи системи 1504 LODES може становити від 24 до 500 годин, при цьому зазначена система 1504 може заряджатися, коли виробіток поновлюваної енергії за допомогою вітрової електростанції 1502 перевищує енергетичне навантаження торгово-промислового споживача 1902. Потім, коли виробіток поновлюваної енергії за допомогою вітрової електростанції 1502 не забезпечує енергетичне навантаження торгово-промислового споживача 1902, система 1504 LODES може розряджатися для того, щоб надавати торгово-промислового споживачу 1902 стійкий профіль поновлюваної енергії, який компенсує частину або все споживання енергії торгово-промисловим споживачем 1902.

На фіг. 21 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 1504 LODES може бути частиною електростанції 2100, яку використовують для інтеграції більших кількостей вироблюваної поновлюваної енергії у мікромережі та координування потужності виробітку поновлюваної енергії за допомогою, наприклад, PV електростанції 1602 та вітрової електростанції 1502, з існуючою генерацією теплової енергії за допомогою, наприклад, теплової електростанції 2102 (наприклад, газогенераторної установки, вугільної електростанції, дизель-генераторної установки і т.д. або комбінації способів генерації теплової енергії), при цьому виробіток поновлюваної енергії та генерація теплової енергії забезпечують енергетичне навантаження торгово-промислового споживача 1902 з високим ступенем доступності. Мікромережі, такі як мікромережа, створена на електростанції 2100 та теплової електростанції 2102, можуть забезпечувати доступність, що складає 90 % або вище. Енергію, вироблювану за допомогою PV електростанції 1602 та/або вітрової електростанції 1502, можна безпосередньо подавати торгово-промислового споживачу 1902 або можна спочатку накопичувати у системі 1504 LODES.

У деяких випадках енергія, що подається торгово-промислового споживачу 1902, може повністю надходити від PV електростанції 1602, повністю надходити від вітрової електростанції 1502, повністю надходити від системи 1504 LODES, повністю надходити від теплової електростанції 2102 або від будь-якої комбінації PV електростанції 1602, вітрової електростанції 1502, системи 1504 LODES і/або теплової електростанції 2102. Як приклад, час роботи системи 1504 LODES на електростанції 2100 може становити від 24 годин до 500 годин. В якості конкретного прикладу, енергетичне навантаження торгово-промислового споживача 1902 може мати пікове значення, що становить 100 МВт, система 1504 LODES може мати номінальну потужність 14 МВт і час роботи 150 годин, вартість природного газу за мільйон британських теплових одиниць (MMBTU) (приблизно 28,5 млн. м³) може становити 6 доларів, і впровадження поновлюваних джерел енергії може становити 58 %. В якості іншого конкретного прикладу, енергетичне навантаження торгово-промислового споживача 1902 може мати пікове значення, що становить 100 МВт, система 1504 LODES може мати номінальну потужність 25 МВт і час роботи 150 годин, вартість природного газу за мільйон британських теплових одиниць (MMBTU) (приблизно 28,5 млн. м³) може становити 8 доларів, і впровадження поновлюваних джерел енергії може становити 65 %.

На фіг. 22 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Систему 1504 LODES можна використовувати для розширення атомної електростанції 2202 (або іншої негнучкої установки для виробітку електроенергії, такої як тепла електростанція, біопаливна електростанція та т.д., й/або установки будь-якого іншого типу, в якій швидкість лінійної зміни нижче 50 % від номінальної потужності за одну годину та високий коефіцієнт використання встановленої потужності, що становить 80 % або більше), для підвищення гнучкості об'єднаної потужності електростанції 2200, що складається з комбінованої системи 1504 LODES й атомної електростанції 2202. Атомна електростанція 2202 може працювати з високим коефіцієнтом використання встановленої потужності та з максимальною ефективністю, тоді як система 1504 LODES може заряджатися та розряджатися для ефективного перетворення енергії атомної електростанції 2202 таким чином, щоб відповідати споживанню електроенергії споживачем і/або ринковій ціні на електроенергію. Як приклад, час роботи системи 1504 LODES на електростанції 2200 може становити від 24 годин до 500 годин. В

одному з конкретних прикладів, номінальна потужність атомної електростанції 2202 може становити 1000 МВт, при цьому зазначена атомна електростанція 2202 може бути змушена працювати протягом тривалих періодів мінімального стабільного виробітку або навіть тимчасово зупинятися через занижені ринкові ціни на електроенергію. Система 1504 LODES дозволяє уникнути зупинок підприємства та може заряджатися у період низьких ринкових цін; при цьому згодом система 1504 LODES може розряджатися та збільшувати загальний виробіток електроенергії у періоди завищених ринкових цін.

На фіг. 23 показана ілюстративна система, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації можна використовувати в якості частини великомасштабної системи накопичення енергії. В якості конкретного прикладу, великомасштабна система накопичення енергії, що включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації, може являти собою систему 1504 LODES. Як приклад, система 1504 LODES може включати різні варіанти реалізації акумуляторних батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 1504 LODES може працювати в тандемі із системою 2302 SDES. Система 1504 LODES і система 2302 SDES разом можуть становити електростанцію 2300. Як приклад, систему 1504 LODES і систему 2302 SDES можна спільно оптимізувати, при цьому система 1504 LODES може надавати різні послуги, у тому числі довгострокове резервування та/або подолання багатоденних коливань (наприклад, багатоденних коливань ринкових цін, виробітку поновлюваної електроенергії, споживання електроенергії та т.д.), і система 2302 SDES може надавати різні послуги, у тому числі швидкі допоміжні послуги (наприклад, контроль над напругою, регулювання частоти і т.д.) і/або подолання внутрішньодобових коливань (наприклад, внутрішньодобових коливань ринкових цін, виробітку поновлюваної електроенергії, споживання електроенергії та т.д.). Час роботи системи 2302 SDES може становити менше 10 годин, а ефективність перетворення енергії може становити більше 80 %. Час роботи системи 1504 LODES може становити від 24 до 500 годин, а ефективність перетворення енергії може становити більше 40 %. В одному з таких прикладів час роботи системи 1504 LODES може становити 150 годин, при цьому зазначена система 1504 може підтримувати споживання електроенергії споживачем протягом до тижня в умовах недостатнього виробітку поновлюваної електроенергії. Система 1504 LODES також може підтримувати споживання електроенергії споживачем під час недостатнього внутрішньодобового виробітку електроенергії, що розширює можливості системи 2302 SDES. Крім того, система 2302 SDES може забезпечувати споживачів під час недостатнього внутрішньодобового виробітку електроенергії та надавати послуги із забезпечення потрібних рівнів потужності й якості електроенергії, такі як контроль над напругою та регулювання частоти.

Різні варіанти реалізації можуть включати акумуляторну батарею, що містить: перший електрод; електроліт; і другий електрод, при цьому щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода містить агломерати заліза. У деяких варіантах реалізації електроліт містить розчинний сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода додатково містить твердий сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода або другого електрода піддають стискаючому навантаженню. У деяких варіантах реалізації стискаюче навантаження прикладають до однієї сторони щонайменше одного електрода з першого електрода або другого електрода за допомогою струмознімального елемента. У деяких варіантах реалізації агломерати заліза містять щонайменше одну речовину, вибрану з магнетиту, гематиту та вюститу. У деяких варіантах реалізації електроліт містить інгібітор корозії. У деяких варіантах реалізації середня довжина агломератів заліза становить від приблизно 50 мкм до приблизно 50 мм. У деяких варіантах реалізації середня внутрішня пористість агломератів заліза становить від приблизно 10 % до приблизно 90 % за об'ємом. У деяких варіантах реалізації середня питома площа поверхні агломератів заліза становить від приблизно 0,1 м²/г до приблизно 25 м²/г. У деяких варіантах реалізації електроліт інфільтрований між агломератами заліза. У деяких варіантах реалізації електроліт містить 1-октантіол. У деяких варіантах реалізації електроліт містить аніон молібдату й аніон сульфідіду. У деяких варіантах реалізації агломерати заліза закріплюють всередині сітки з металевої тканини, що забезпечує для зазначених залізних агломератів стискальне зусилля та струмознімання. У деяких варіантах реалізації агломерати заліза зв'язані один з одним і зв'язані зі струмоприймачем.

Різні варіанти реалізації можуть включати акумуляторну батарею, що містить: перший електрод; електроліт; і другий електрод, при цьому щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода містить розпилений металевий порошок. У деяких варіантах реалізації електроліт містить розчинний сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода додатково містить твердий сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода або другого електрода піддають стискаючому навантаженню. У деяких варіантах реалізації стискаюче навантаження прикладають до однієї сторони щонайменше одного електрода з першого електрода або другого електрода за допомогою струмознімального елемента. У деяких варіантах реалізації розпилений металевий порошок містить щонайменше одну речовину, вибрану з магнетиту, гематиту та вюститу. У деяких варіантах реалізації електроліт містить інгібітор корозії. У деяких варіантах реалізації електроліт інфільтрований між розпиленим металевим порошком. У деяких варіантах реалізації електроліт містить 1-октантіол. У деяких варіантах реалізації електроліт містить аніон молібдату й аніон сульфідіду. У деяких варіантах реалізації розпилений металевий порошок закріплюють всередині сітки з металевої тканини, що забезпечує для зазначеного розпиленого металевого порошку стискальне зусилля та струмознімання. У деяких варіантах реалізації розпилений металевий порошок є зв'язаним і зв'язаний зі струмоприймачем.

Різні варіанти реалізації включають спосіб виготовлення електрода, який включає: електрохімічне одержання металевого порошку; і формування металевого порошку в електрод. У деяких варіантах реалізації електрохімічне одержання металевого порошку включає електрохімічне одержання металевого порошку щонайменше частково із застосуванням електрохімії розпавленої солі. У деяких варіантах реалізації електрохімічне одержання металевого порошку включає електрохімічне одержання металевого порошку щонайменше частково із застосуванням газового розпилення. У деяких варіантах реалізації електрохімічне одержання металевого

порошку включає електрохімічне одержання металевого порошку щонайменше частково із застосуванням водного розпилення.

Різні варіанти реалізації можуть включати великомасштабну систему накопичення енергії, що містить: одну або більше акумуляторних батарей, при цьому щонайменше одна батарея з однієї або більше акумуляторних батарей містить: перший електрод, електроліт і другий електрод, при цьому щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода містить агломерати заліза. У деяких варіантах реалізації великомасштабна система накопичення енергії являє собою систему довгочасного накопичення енергії (LODES). У деяких варіантах реалізації електроліт містить розчинний сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода додатково містить твердий сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода або другого електрода піддають стискаючому навантаженню. У деяких варіантах реалізації стискаюче навантаження прикладають до однієї сторони щонайменше одного електрода з першого електрода або другого електрода за допомогою струмознімального елемента. У деяких варіантах реалізації агломерати заліза містять щонайменше одну речовину, вибрану з магнетиту, гематиту та вюститу. У деяких варіантах реалізації електроліт містить інгібітор корозії. У деяких варіантах реалізації середня довжина агломератів заліза становить від приблизно 50 мкм до приблизно 50 мм. У деяких варіантах реалізації середня внутрішня пористість агломератів заліза становить від приблизно 10 % до приблизно 90 % за об'ємом. У деяких варіантах реалізації середня питома площа поверхні агломератів заліза становить від приблизно 0,1 м²/г до приблизно 25 м²/г. У деяких варіантах реалізації електроліт інфільтрований між агломератами заліза. У деяких варіантах реалізації електроліт містить 1-октантіол. У деяких варіантах реалізації електроліт містить аніон молібдату й аніон сульфід. У деяких варіантах реалізації агломерати заліза закріплюють всередині сітки з металевої тканини, що забезпечує для зазначених залізних агломератів стискальне зусилля та струмознімання. У деяких варіантах реалізації агломерати заліза зв'язані один з одним і зв'язані зі струмоприймачем.

Різні варіанти реалізації можуть включати великомасштабну систему накопичення енергії, що містить: одну або більше акумуляторних батарей, при цьому щонайменше одна батарея з однієї або більше акумуляторних батарей містить: перший електрод, електроліт і другий електрод, при цьому щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода містить розпилений металевий порошок. У деяких варіантах реалізації великомасштабна система накопичення енергії являє собою систему довгочасного накопичення енергії (LODES). У деяких варіантах реалізації електроліт містить розчинний сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода та другого електрода додатково містить твердий сульфід. У деяких варіантах реалізації щонайменше один електрод із першого електрода або другого електрода піддають стискаючому навантаженню. У деяких варіантах реалізації стискаюче навантаження прикладають до однієї сторони щонайменше одного електрода з першого електрода або другого електрода за допомогою струмознімального елемента. У деяких варіантах реалізації розпилений металевий порошок містить щонайменше одну речовину, вибрану з магнетиту, гематиту та вюститу. У деяких варіантах реалізації електроліт містить інгібітор корозії. У деяких варіантах реалізації електроліт інфільтрований між розпиленим металевим порошком. У деяких варіантах реалізації електроліт містить 1-октантіол. У деяких варіантах реалізації електроліт містить аніон молібдату й аніон сульфід. У деяких варіантах реалізації розпилений металевий порошок закріплюють всередині сітки з металевої тканини, що забезпечує для зазначеного розпиленого металевого порошку стискальне зусилля та струмознімання. У деяких варіантах реалізації розпилений металевий порошок є зв'язаним і зв'язаний зі струмоприймачем.

Приклади реалізації даного винаходу описані в наступних абзацах. Хоча деякі з наведених нижче прикладів реалізації описані в термінах ілюстративних способів, додаткові приклади реалізації можуть включати: ілюстративні способи, обговорювані в наступних абзацах, реалізовані з метою одержання залізного електрода й/або електрохімічної системи.

Приклад 1. Спосіб виготовлення залізного електрода, який включає подання залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрій, прикладення тиску та/або тепла до залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрої протягом певного періоду часу з одержанням електрода, що містить провідні з'єднання між частинками залізовмісного матеріалу у формі частинок.

Приклад 2. Спосіб згідно з прикладом 1, який додатково включає введення електрода в електрохімічну систему без прикладення до зазначеного електрода зовнішнього струмоприймача або ущільнення.

Приклад 3. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-2, у якому зазначений пристрій містить ущільнювальні ролики, при цьому прикладений тиск щонайменше частково створюється за допомогою зазначених ущільнювальних роликів.

Приклад 4. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-2, у якому тиск і/або тепло прикладають у процесі гарячого ізостатичного пресування (HIP), у процесі одноосового гарячого пресування, у процесі гарячого валкового пресування, у процесі гарячого брикетування або у процесі гарячого кування.

Приклад 5. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-4, у якому прикладене тепло призводить до підвищення температури в діапазоні від приблизно 300 до приблизно 1000 градусів Цельсія; прикладений тиск становить від приблизно 0,1 до приблизно 200 МПа; застосовуваний тиск прикладають за допомогою одноосового, двохосового, трьохосового, ізостатичного способу та/або способу із застосуванням роликів; і/або період часу становить від приблизно 1 секунди до приблизно 24 годин.

Приклад 6. Спосіб згідно з прикладом 5, у якому прикладений тиск становить від приблизно 1 до приблизно 100 МПа.

Приклад 7. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-6, у якому після прикладення тиску та підвищеної температури всередині частинок залізовмісного матеріалу у формі частинок зберігається більше 50 об. % мікропористості.

Приклад 8. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-7, у якому після прикладення тиску та підвищеної

температури електрод характеризується мікропористістю всередині частинок залізовмісного матеріалу у формі частинок, що становить більше 50 об. %.

Приклад 9. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-8, у якому тиск і/або тепло застосовують у неокислювальній атмосфері.

Приклад 10. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-8, який додатково включає усунення окиснення після формування електрода.

Приклад 11. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-10, який додатково включає формування на залізному електроді текстури.

Приклад 12. Спосіб згідно з прикладом 11, у якому зазначена текстура містить канали змінної товщини.

Приклад 13. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-12, у якому пристрій містить інструментально оброблену ділянку з конічними виступами з неї.

Приклад 14. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-12, у якому пристрій містить ролик із зубцями.

Приклад 15. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-12, у якому пристрій містить текстурований ролик.

Приклад 16. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-15, який додатково включає проведення поверхневого очищення залізовмісного матеріалу у формі частинок перед поданням зазначеного залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрій.

Приклад 17. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-16, який додатково включає перед поданням залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрій попереднє нагрівання залізовмісного матеріалу у формі частинок і/або механічну зміну одного або більше аспектів залізовмісного матеріалу у формі частинок.

Приклад 18. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-17, який додатково включає перед поданням залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрій регулювання розміру частинок зазначеного залізовмісного матеріалу у формі частинок.

Приклад 19. Спосіб згідно з прикладом 18, у якому регулювання розміру частинок залізовмісного матеріалу у формі частинок включає зменшення розміру частинок заліза у формі частинок від першого розміру частинок до другого розміру частинок.

Приклад 20. Спосіб згідно з прикладом 19, у якому другий розмір частинок становить половину від першого розміру частинок.

Приклад 21. Спосіб згідно з прикладом 19, у якому другий розмір частинок становить одну чверть від першого розміру частинок.

Приклад 22. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 19-21, у якому спосіб зменшення розміру частинок включає один або більше способів, вибраних із дроблення у шоківій дробарці, подрібнювання у молотковій дробарці, подрібнювання на жираторній дробарці та подрібнювання у порошок за допомогою млина з паралельними пластинами.

Приклад 23. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-22, у якому подання залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрій включає щонайменше частково процес термічного напилювання, в якому частину залізовмісного матеріалу у формі частинок наносять на підкладку та/або шар DRI.

Приклад 24. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-22, у якому подання залізовмісного матеріалу у формі частинок у пристрій включає щонайменше частково застосування способу адитивного виробництва.

Приклад 25. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-24, у якому формування електрода додатково включає застосування одного або більше способів, вибраних із ультразвукового ущільнення/ вібрації, розрізання, механічної обробки, холодного пресування, холодної екструзії, лиття, пресування при різних температурах і пресування та зв'язування з щонайменше частковим формуванням електрода.

Приклад 26. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-25, у якому прикладення тиску та/або тепла включає застосування тиску ~ 0,5-50 МПа при кімнатній температурі або застосування тиску ~ 0,1-10 МПа при температурі >400 °C і <1200 °C. [00283] Приклад 27. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-26, який включає прикладення тепла до залізовмісного матеріалу у формі частинок, що призводить до розкладання карбиду заліза з утворенням заліза та графіту.

Приклад 28. Спосіб згідно з прикладом 27, у якому прикладене тепло відповідає температурі від 300 до 727 °C.

Приклад 29. Спосіб згідно з будь-яким із прикладів 1-28, який додатково включає застосування тиску та/або тепла в атмосфері кисню при температурі від 700 до 900 °C.

Приклад 30. Залізний електрод, виготовлений способом згідно з будь-яким із прикладів 1-29.

Приклад 31. Залізний електрод, що містить: металургійно зв'язані частинки губчастого заліза, при цьому мікропористість всередині частинок губчастого заліза становить >50 об. %, і розмір частинок губчастого заліза становить >100 мкм.

Приклад 32. Залізний електрод згідно з прикладом 31, який відрізняється тим, що зазначений залізний електрод виготовлений із застосуванням будь-якого зі способів згідно з будь-яким із прикладів 1-29.

Приклад 33. Електрохімічна система, що містить залізний електрод, виготовлений способом згідно з будь-яким із прикладів 1-29, і/або залізний електрод згідно з будь-яким із прикладів 30-32.

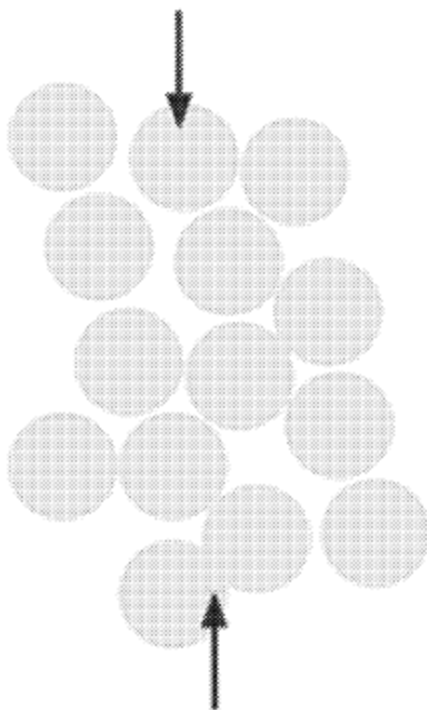
Приклад 34. Електрохімічна система згідно з прикладом 33, яка відрізняється тим, що зазначена електрохімічна система являє собою систему довгочасного накопичення енергії.

Наведений вище опис способів представлений винятково в якості ілюстративних прикладів і не вимагає або не має на увазі, що зазначені стадії різних варіантів реалізації повинні бути виконані у зазначеному порядку. Як буде зрозуміло фахівцю в даній області техніки, порядок виконання стадій в описаних вище варіантах реалізації може бути довільним. Такі слова, як "після", "потім", "наступний" та т.д. не обов'язково призначені для обмеження порядку стадій; дані слова можуть бути використані для ознайомлення читача з описом запропонованих способів. Крім того, будь-яке посилання на елементи формули винаходу в однині, наприклад, із застосуванням слова "один", "визначений" або "зазначений", не слід тлумачити як обмеження такого елемента одниною. Крім того,

будь-яка стадія будь-якого варіанта реалізації, наведеного в даному описі, може бути використана у будь-якому іншому варіанті реалізації.

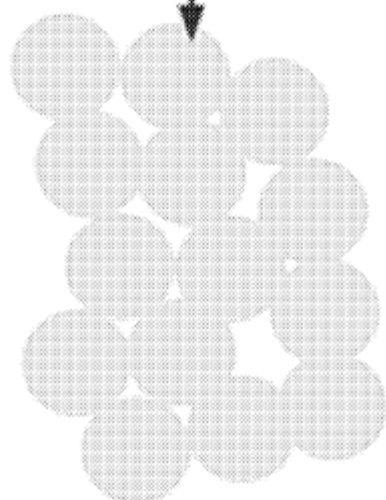
Наведений вище опис розкритих аспектів представлений, щоб дати можливість будь-якому фахівцю в даній області техніки створити або використовувати даний винахід. Різні модифікації даних аспектів будуть очевидні фахівцям у даній області техніки, а загальні принципи, визначені у даному документі, можна застосовувати до інших аспектів без відступу від обсягу даного винаходу. Таким чином, даний винахід не призначений для обмеження аспектами, описаними у даному документі, але повинен відповідати самому широкому обсягу з урахуванням принципів і нових ознак, розкритих в даному описі.

Недостатня деформація:



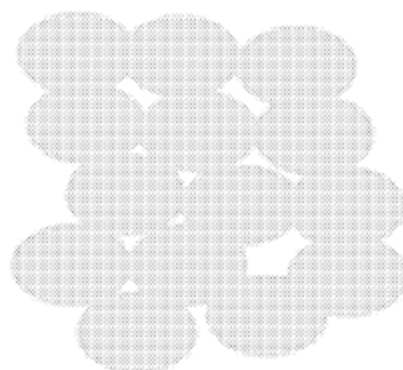
Фіг. 1А

Підходящий ступінь
деформації:



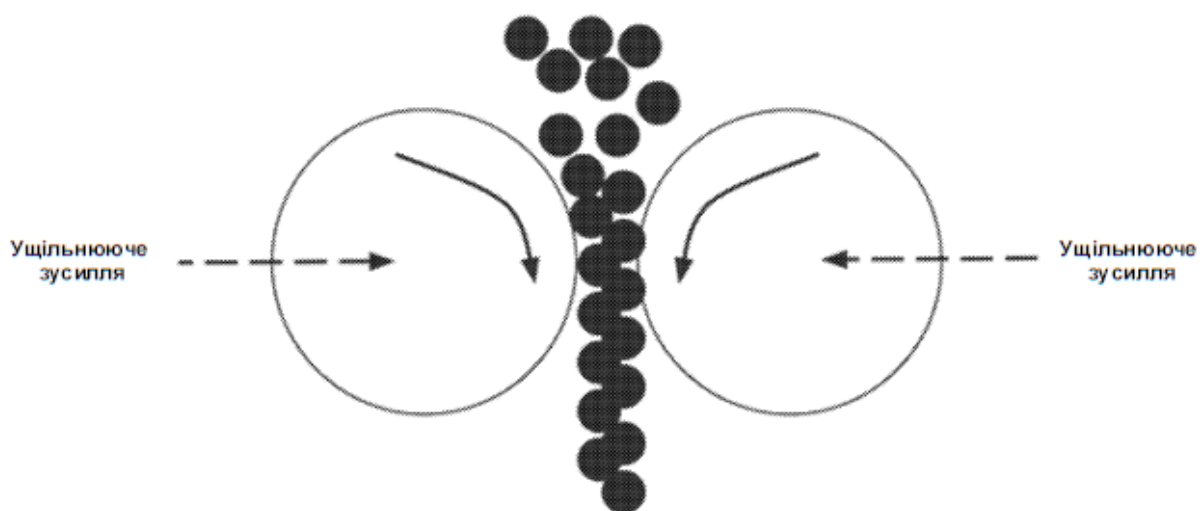
Фіг. 1В

Занадто велика деформація:



Фіг. 1С

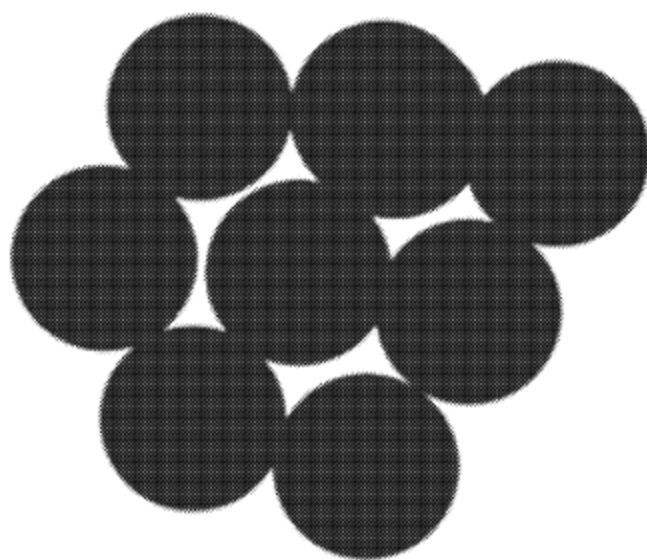
Вихідний пористий залізовмісний матеріал у формі вільних частинок



Металургійно й електрично зв'язаний вихідний матеріал

Фіг. 2

Одномодальна упаковка:



Фіг. 3А

Двомодальна упаковка:

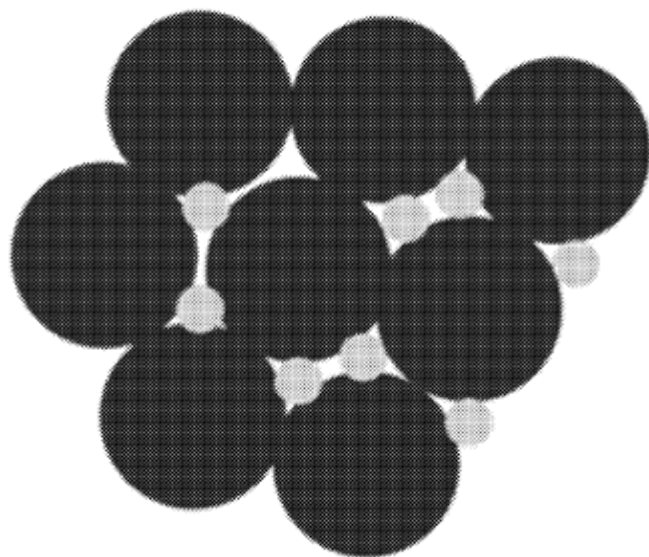


Fig. 3B

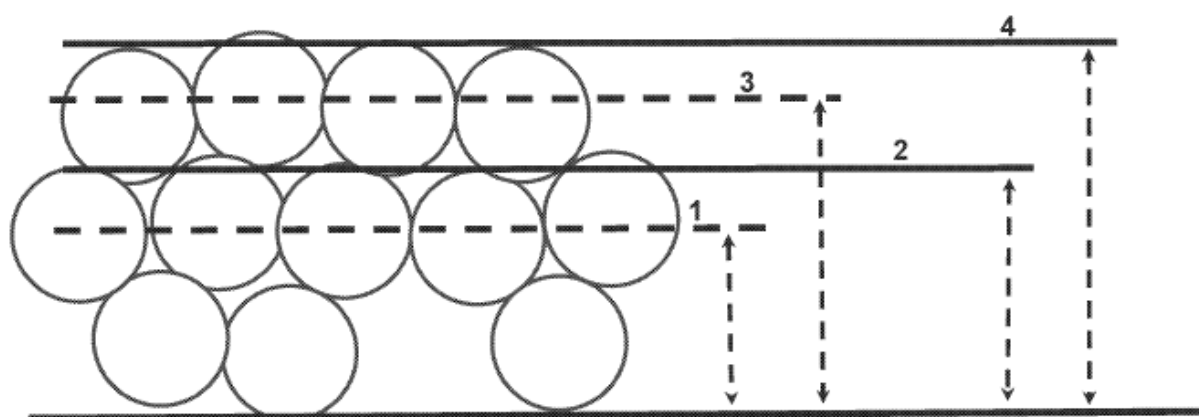
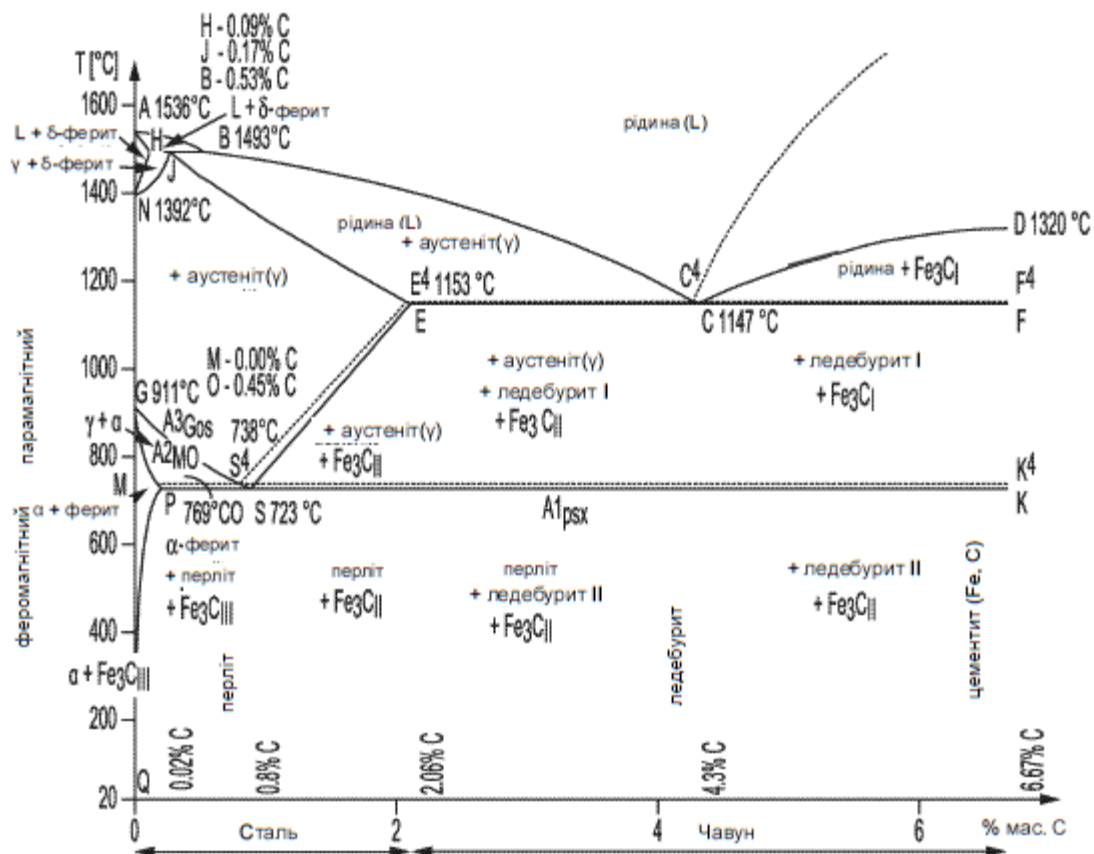
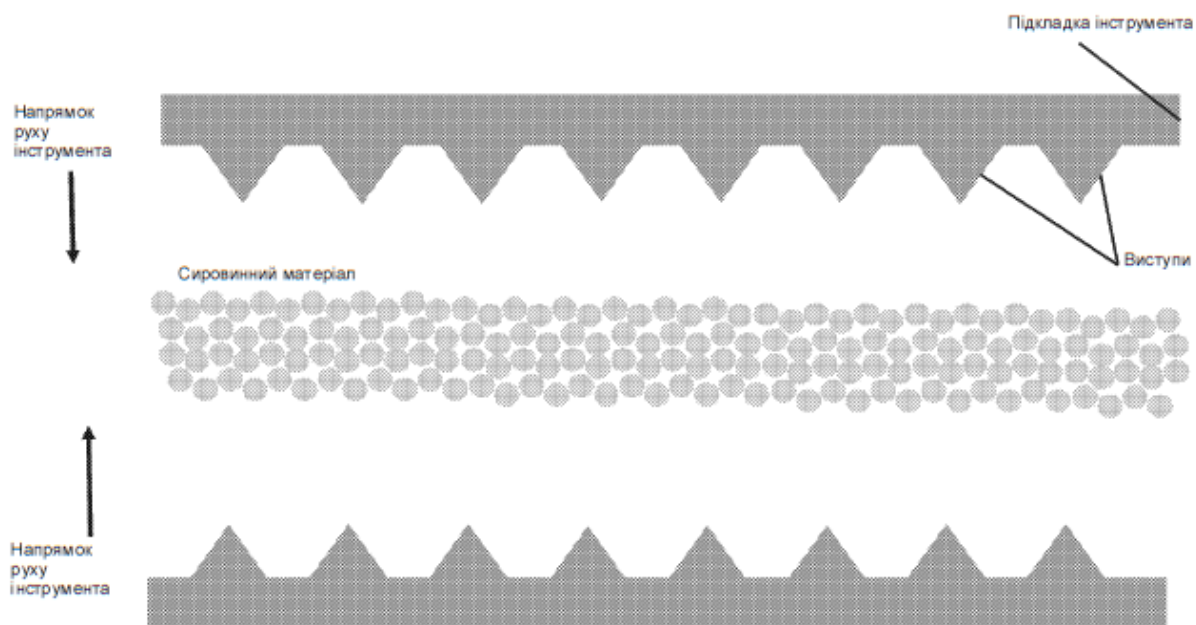


Fig. 4

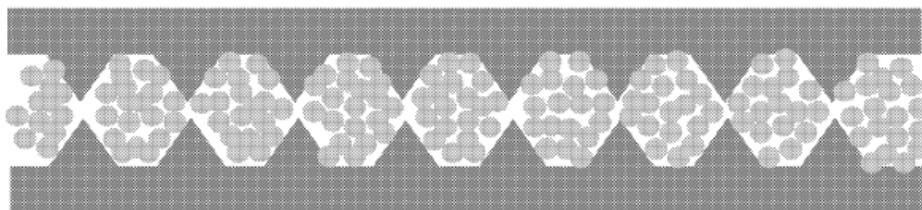


Фіг. 6



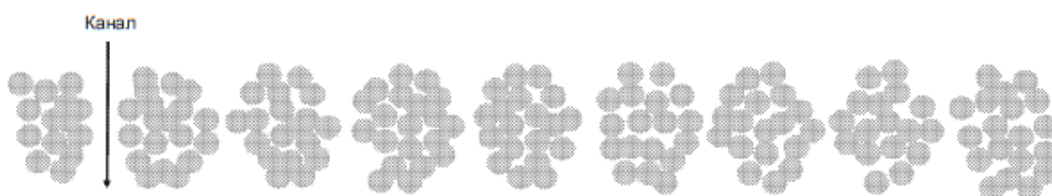
Фіг. 7

Поверхні
інструмента та
сировинний
матеріал під
час пресування

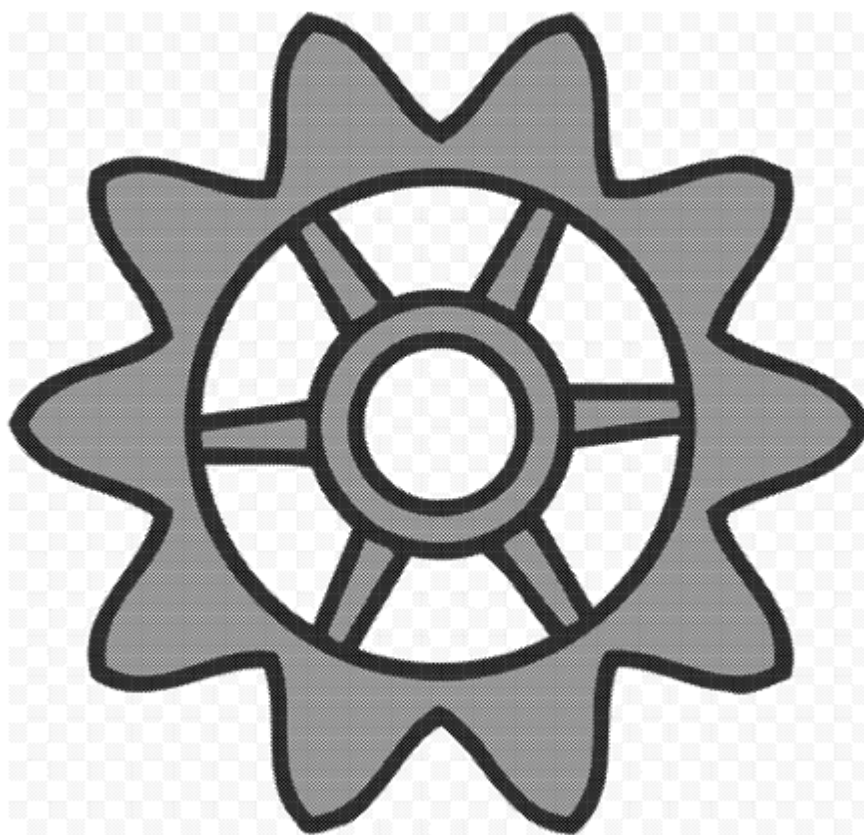


Фіг. 8А

Поперечний
переріз
електрода
після
пресування



Фіг. 8В



Фіг. 9

Необов'язкова
зварювальна
стрічка для
з'єднання з
коміркою

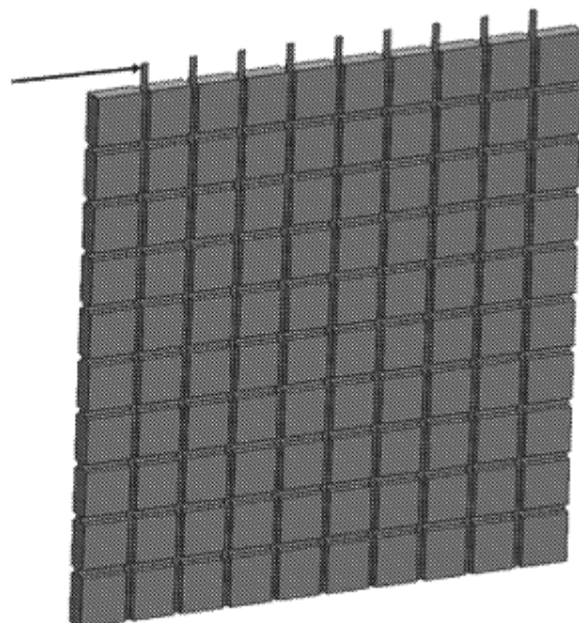


Fig. 10A

Сильно
ущільнені
секції

Високопористі
секції



Fig. 10B

Текстурований
ролик

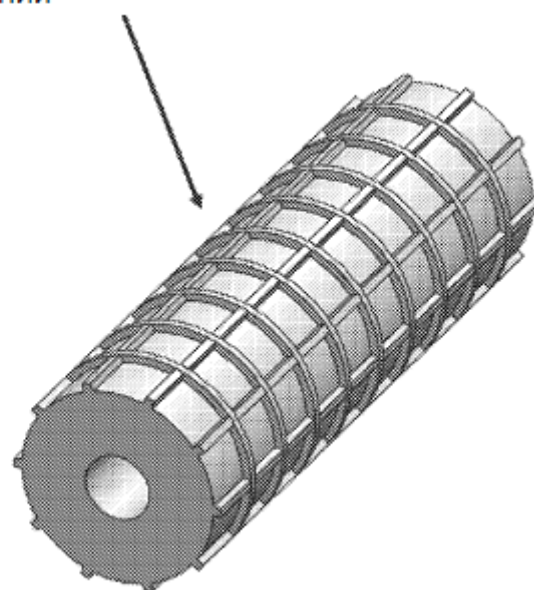


Fig. 11A

Поверхня контакту
роликового електрода
створює елементи для
поліпшення продуктивності
комірки

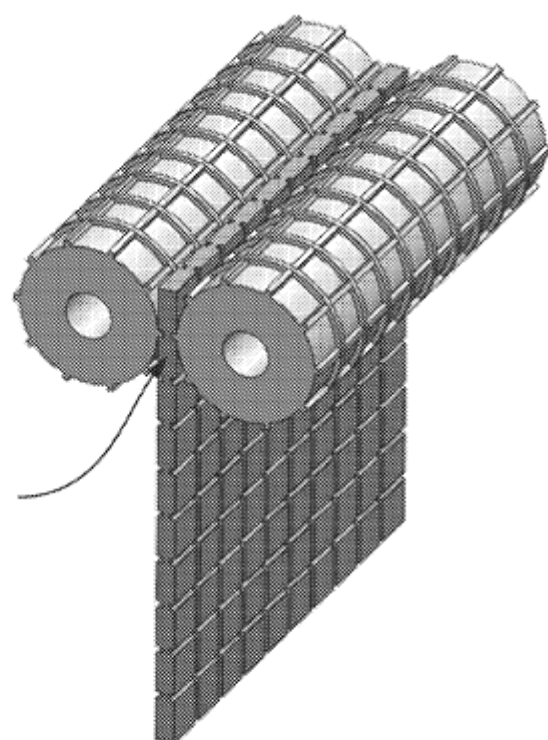


Fig. 11B

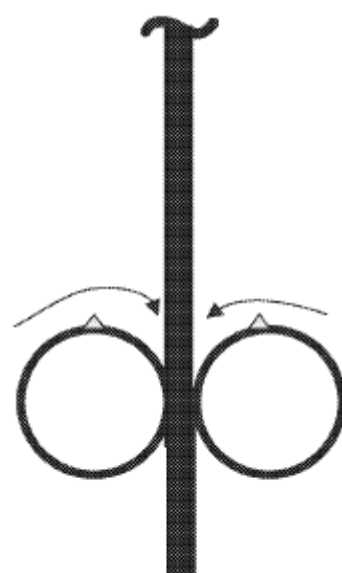


Fig. 12A

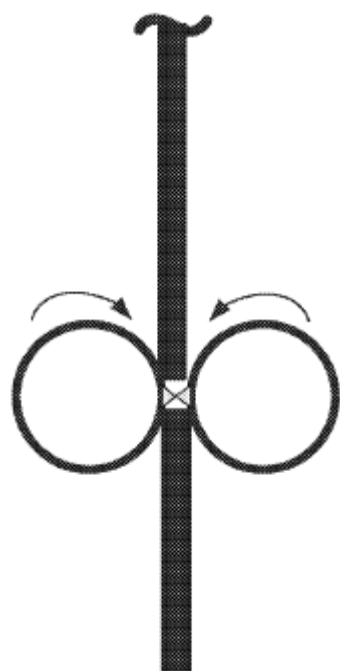


Fig. 12B

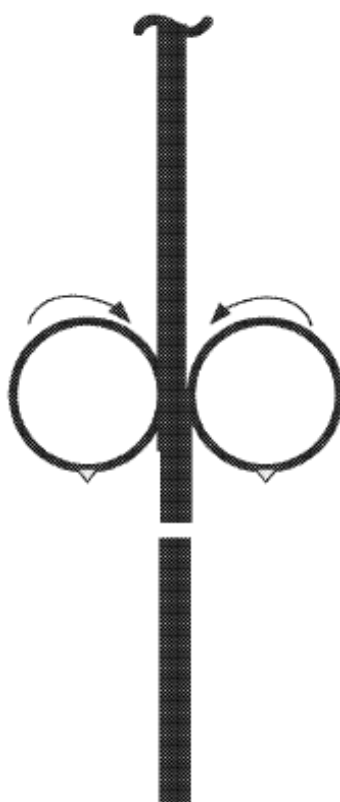


Fig. 12C

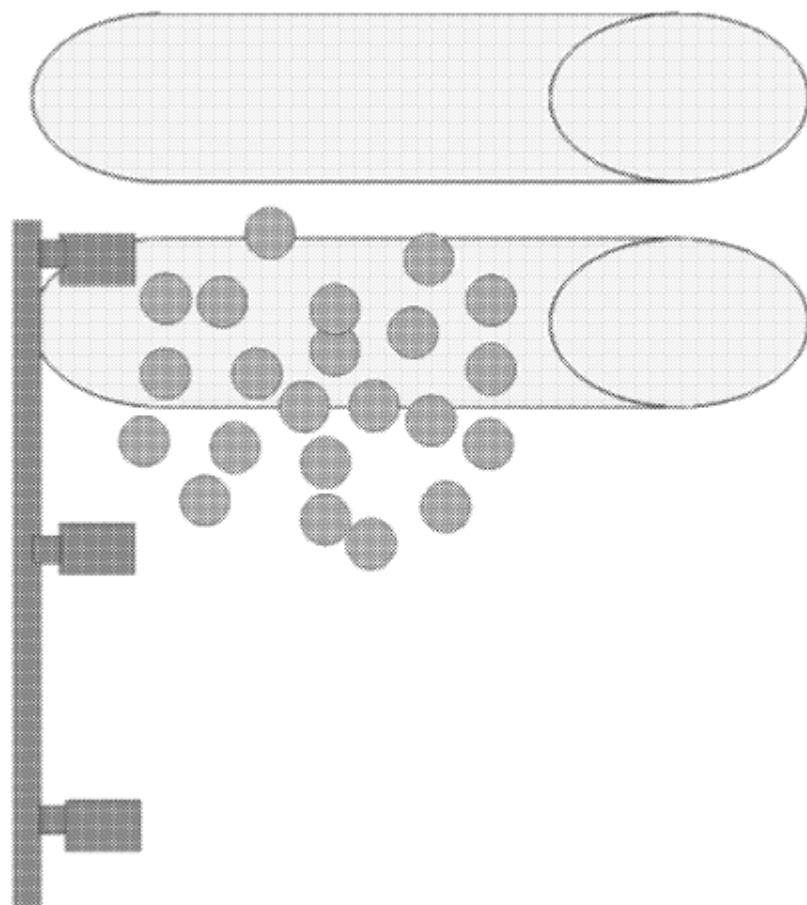


Fig. 13

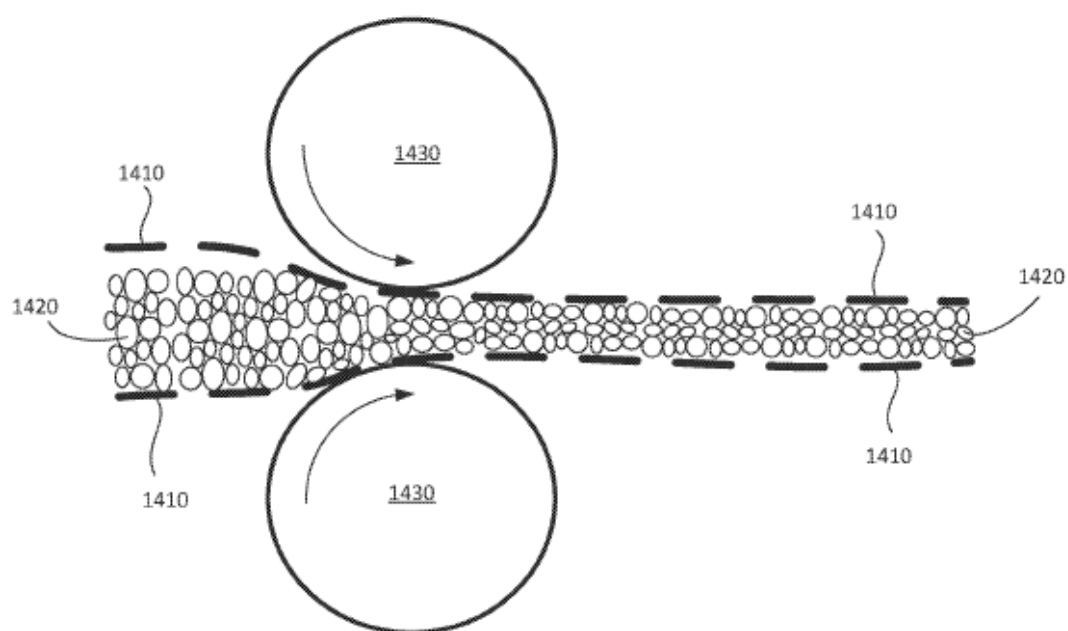
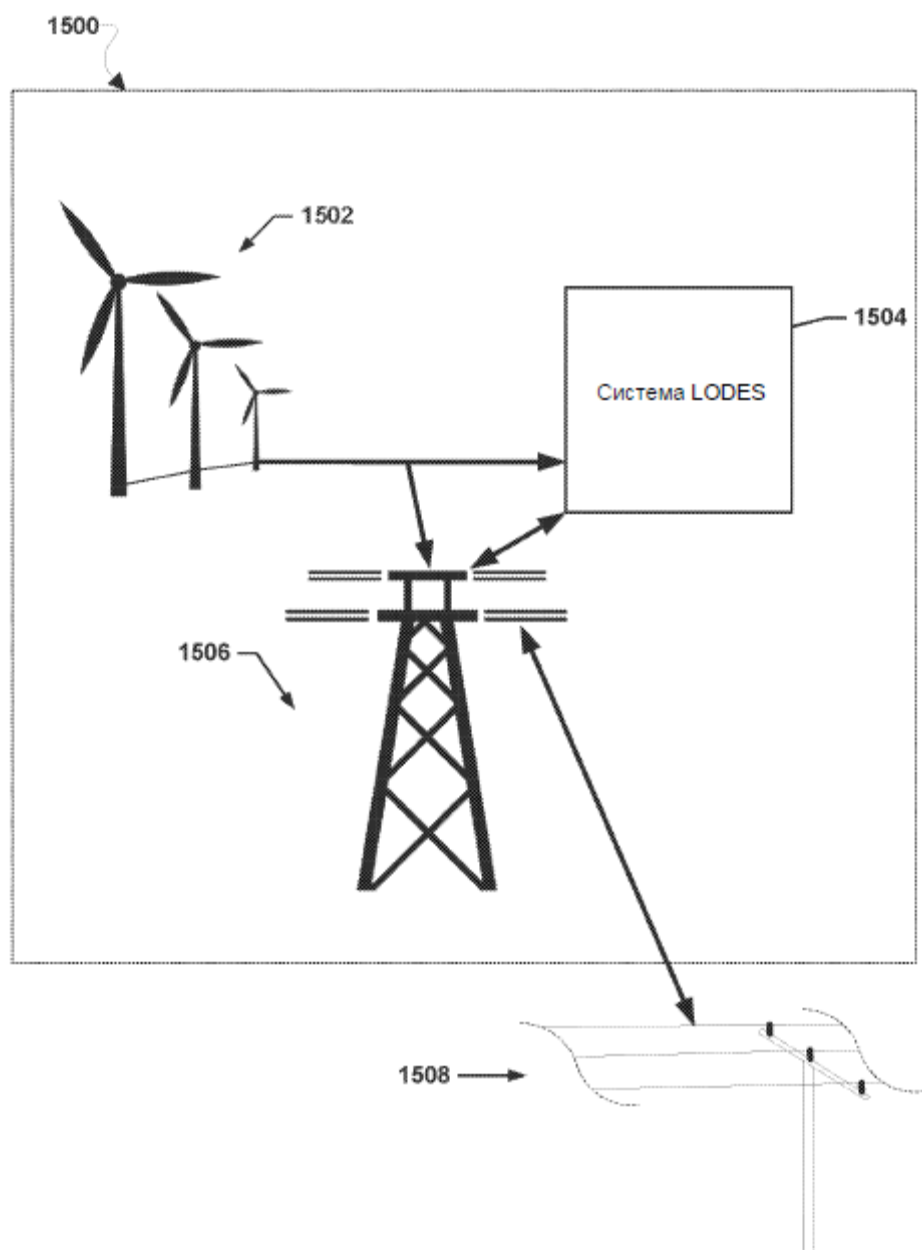


Fig. 14



Фиг. 15

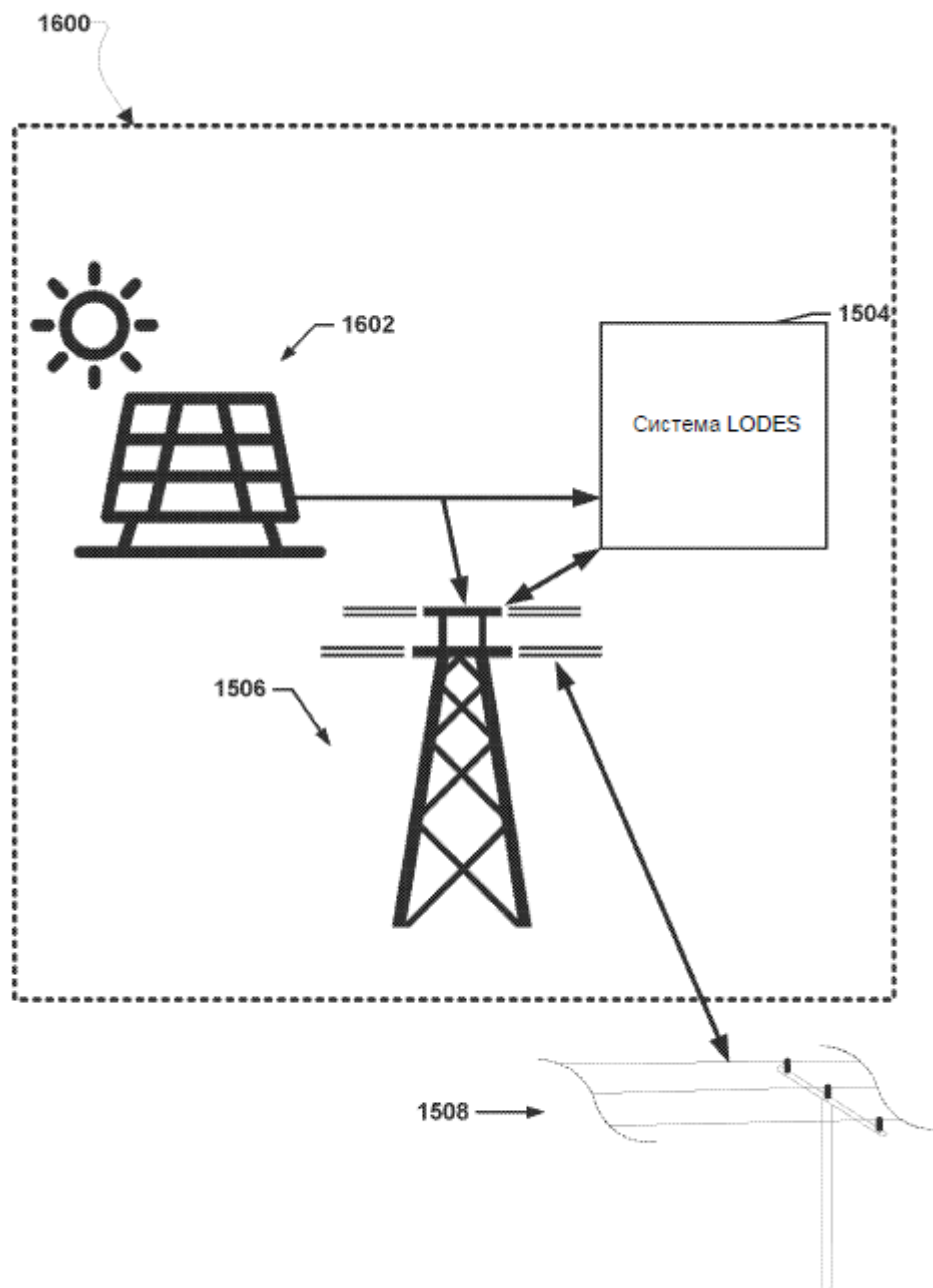


Fig. 16

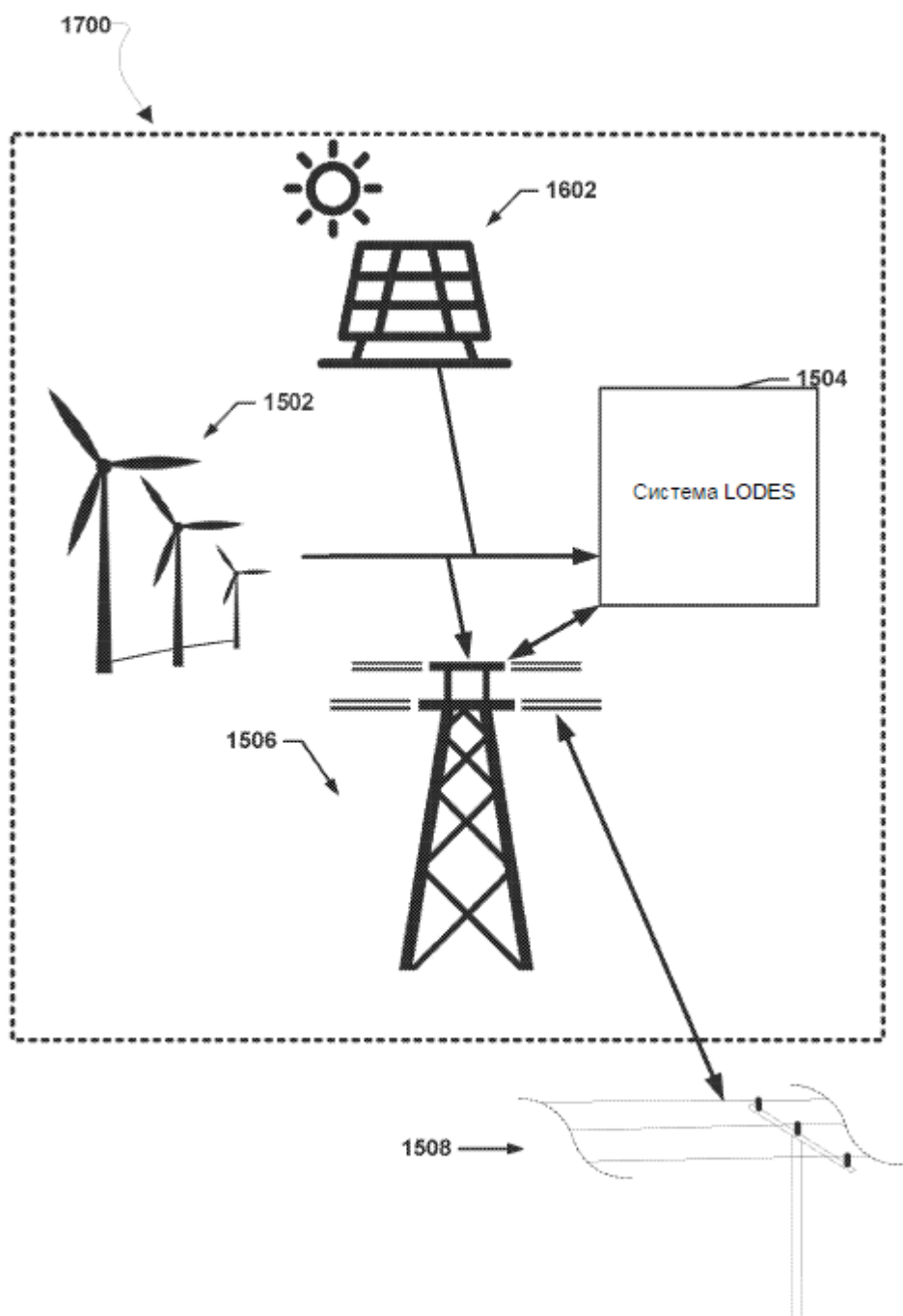


Fig. 17

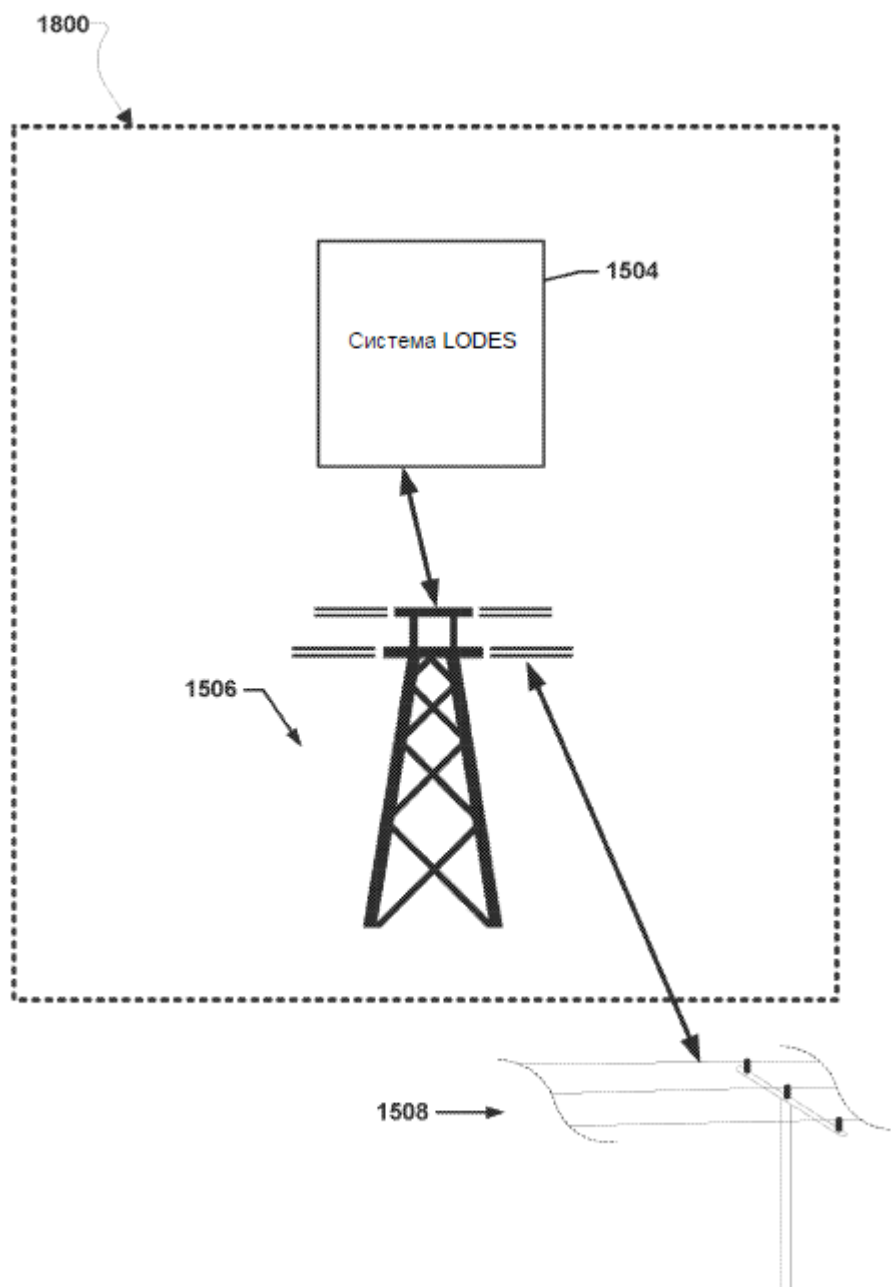


Fig. 18

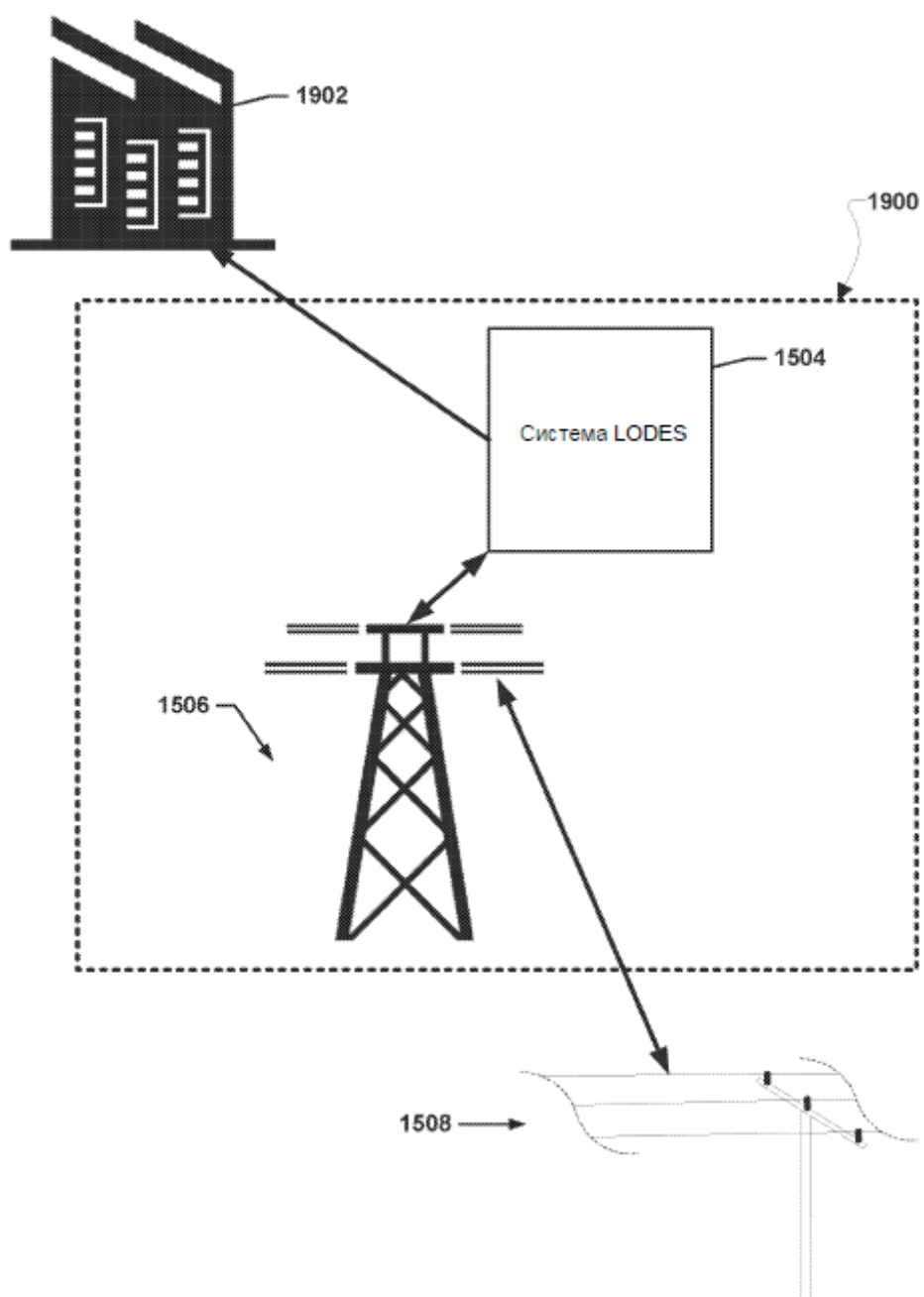


Fig. 19

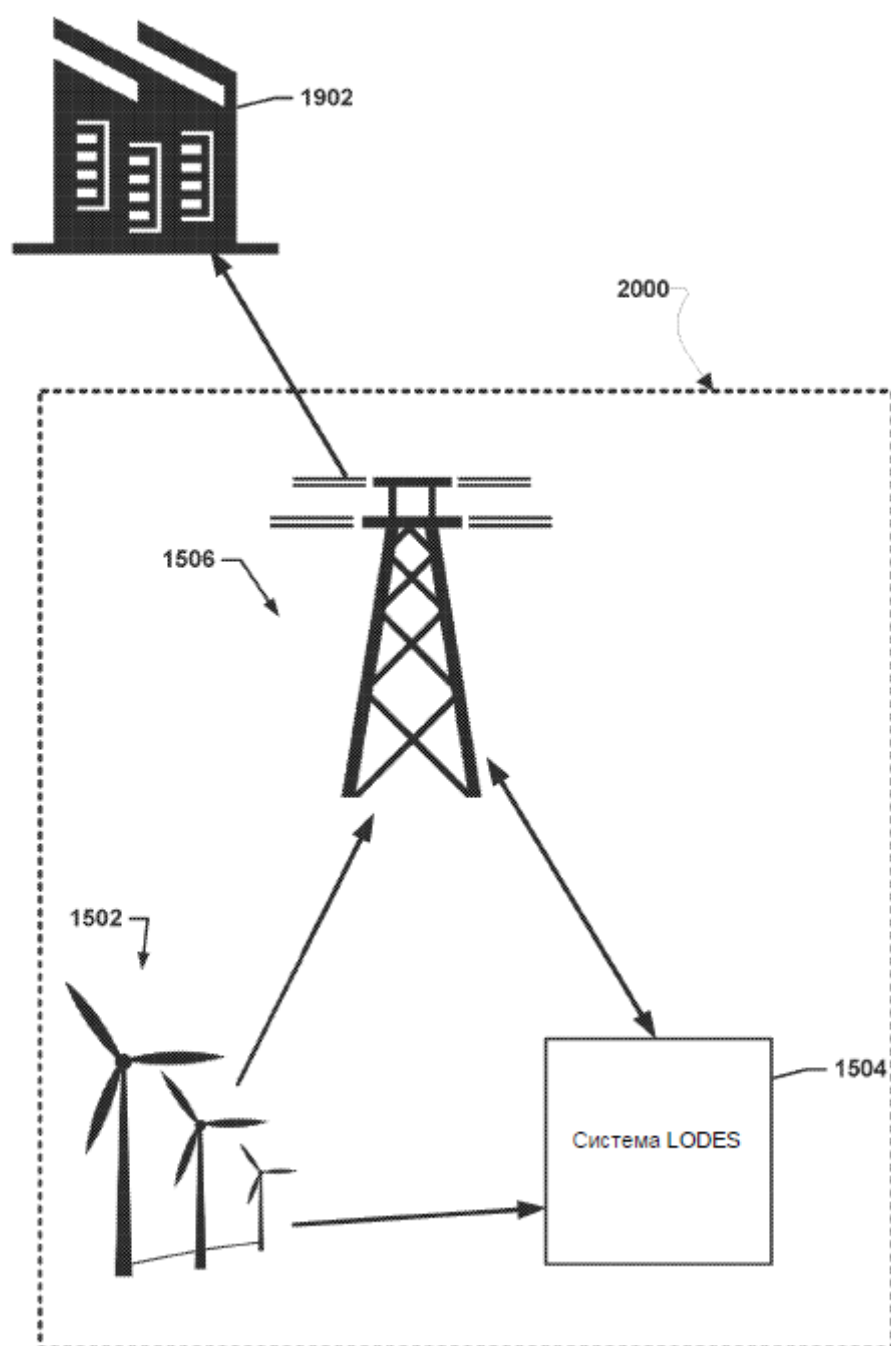


Fig. 20

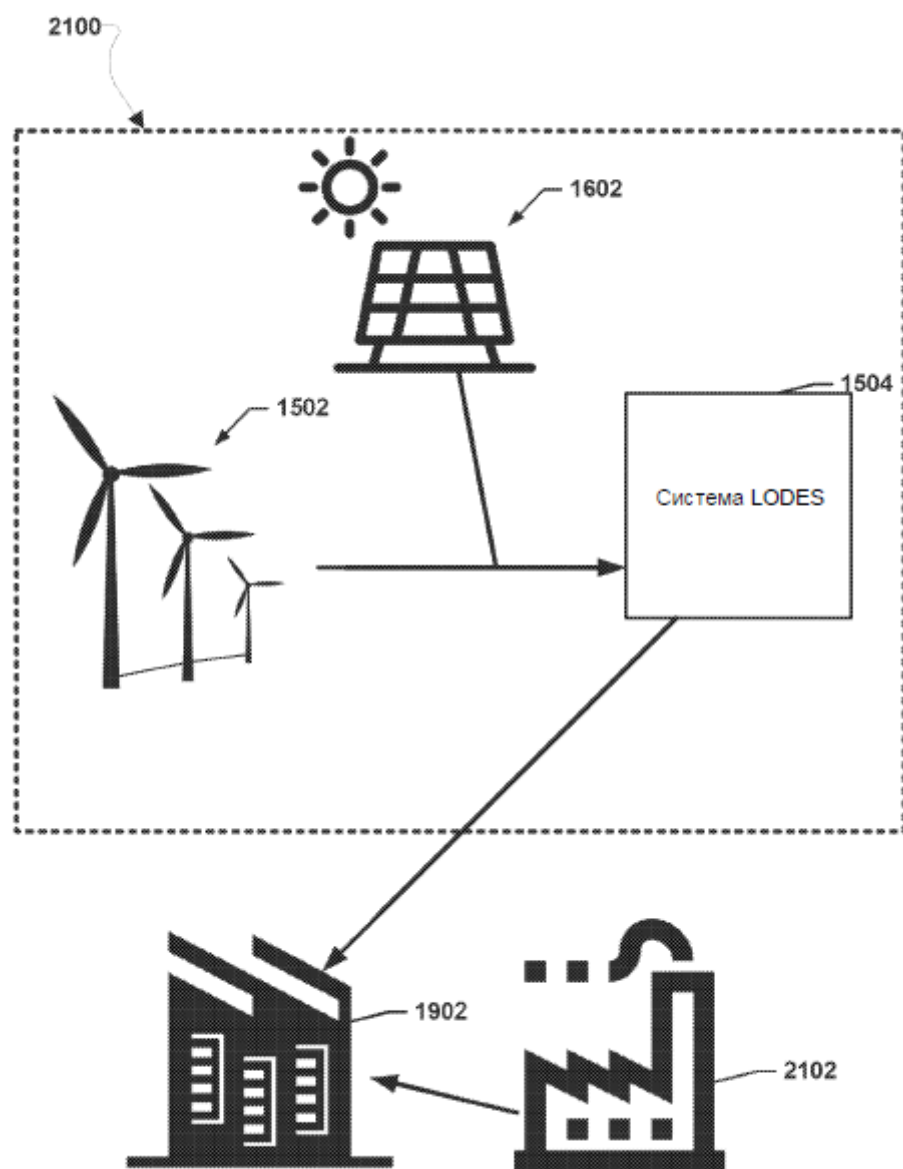


Fig. 21

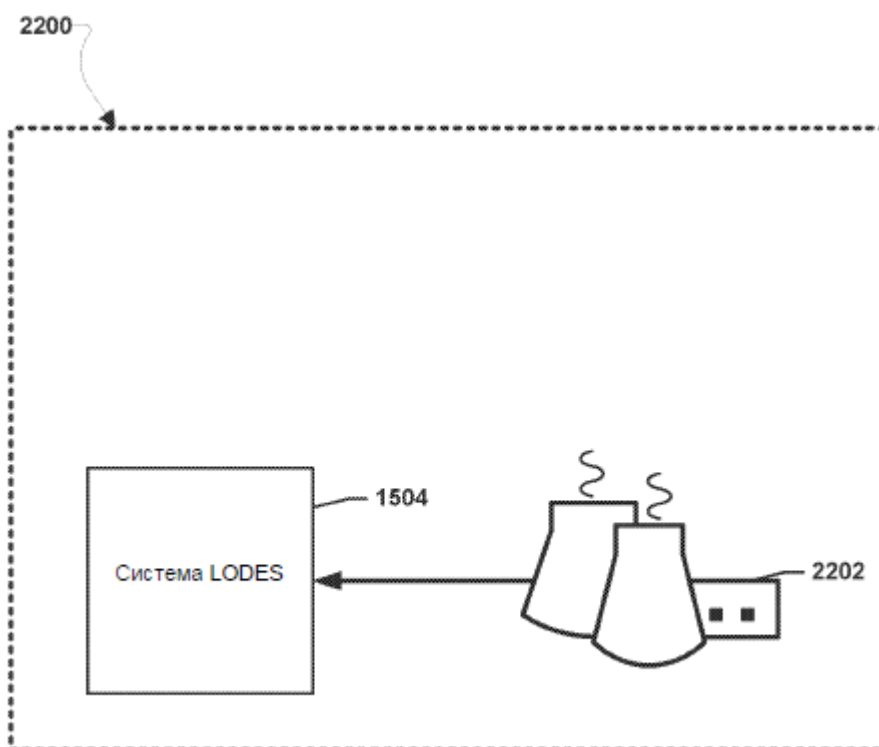


Fig. 22

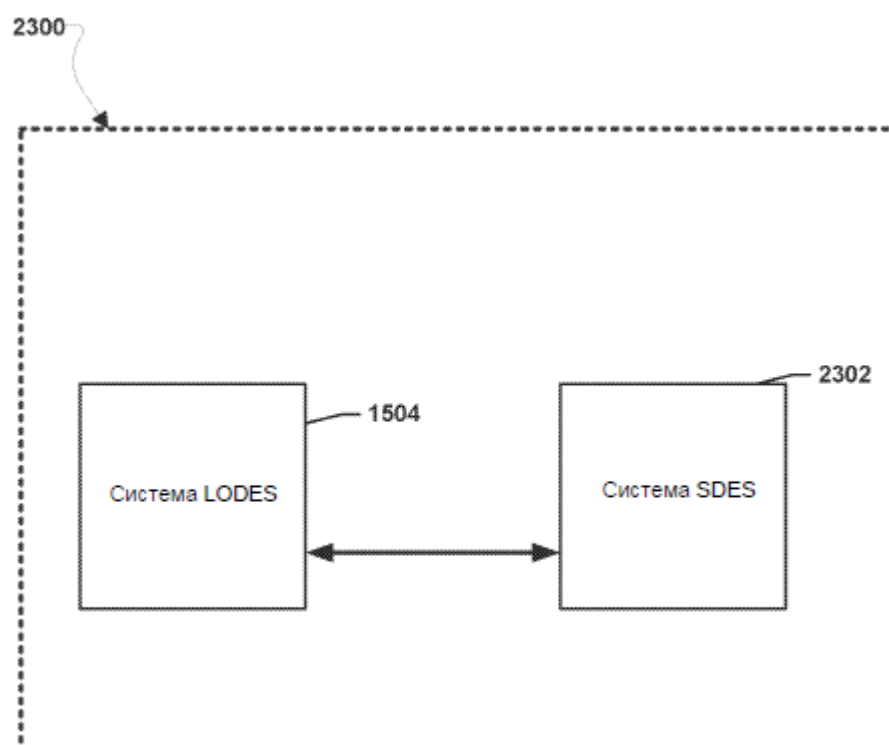


Fig. 23