

Корисна модель належить до технології електрохімічного отримання водню та може використовуватися в галузі енергетики для гарантованого забезпечення воднем сучасних енергетичних систем, зокрема у системах на основі відновлювальних джерел енергії – сонця, вітру, хвиль, приливів – для застосування в промисловості, комунальному господарстві та паливно-енергетичному комплексі.

Електрохімічне отримання водню є ключовою технологією для виробництва чистого водню, який може використовуватися як екологічно чисте паливо або сировина для промисловості. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від характеристик електродів, що використовуються в електролізері.

Відомо рідинно-проникний електрод, що має структуру з відкритими комірками та містить:

шар електроактивного матеріалу, нанесений на поверхню підкладки з відкритими комірками, яка виготовлена з матеріалу, відмінного від електроактивного матеріалу; або

проникний для рідини електрод, що має структуру з відкритими комірками та складається з електроактивного матеріалу [US20220006096 A1, МПК: H01V 4/86; H01M 8/1007; C25B 11/031, опубл.06.01.2022].

У цій конструкції електрода шар електроактивного матеріалу нанесено на поверхню підкладки з відкритими комірками (дротяна сітка, дротяне полотно, екран, металева піна тощо), яка може бути електропровідною або ні. Підкладки можуть складатися з металів, таких як мідь та мідні сплави, нікель та нікелеві сплави, залізо та залізні сплави, сталь, нержавіюча сталь, алюміній та алюмінієві сплави, цинк та цинкові сплави тощо. Підкладки можуть бути покриті за допомогою методів хімічного осадження (хімічне осадження з парової фази, занурення тощо), методів фізичного осадження (фізичне осадження з парової фази, розпилення тощо), методів електрохімічного осадження (гальванічне покриття, безструмове покриття тощо) для отримання тонкого або товстого шару електроактивного матеріалу. Матеріал може бути неактивним електрично після початкового покриття, але стає електроактивним після попередньої обробки (хімічної або фізичної) або застосування зовнішнього потенціалу, джерела енергії тощо.

Недоліки вказаного електрода, обумовлені його конструктивними особливостями, зокрема:

1. Утворення газових бульбашок та їх адгезія, що призводить до великого динамічного опору.

Під час електролізу на поверхні електродів відбувається виділення газів (водень або кисень), залежно від типу реакції. Ці гази утворюються у вигляді бульбашок. Поверхневі властивості електрода, такі як шорсткість, гідрофобність/гідрофільність та поверхневий натяг розчину, значно впливають на адгезію цих бульбашок до поверхні.

Коли бульбашки газу утворюються на поверхні електрода, вони можуть прилипати до неї через сили адгезії. Ці сили можуть бути досить значними, особливо на поверхнях з певною морфологією, наприклад, на підкладках з відкритими комірками, які можуть мати численні мікропори та нерівності. Ці нерівності можуть служити центрами нуклеації для бульбашок, а також пастками, що утримують бульбашки на місці.

Прилипання бульбашок до поверхні електрода створює фізичний бар'єр, який перешкоджає вільному доступу електроліту до активних центрів електрода. Це призводить до зменшення ефективної площі поверхні, доступної для електрохімічних реакцій. Крім того, бульбашки, що прилипли, можуть блокувати потік електроліту, що призводить до локальних змін концентрації реагентів та продуктів. Цей ефект відомий як "бульбашковий екран" або "газове блокування".

Динамічний опір, що виникає внаслідок прилипання бульбашок, є результатом кількох факторів. По-перше, бульбашки, що прилипли, збільшують опір перенесенню маси, оскільки вони перешкоджають конвективному та дифузійному транспорту іонів до поверхні електрода. По-друге, рух бульбашок, що відриваються від поверхні, створює турбулентність та гідродинамічні опори в електроліті. Якщо бульбашки погано відриваються від поверхні сітки, вони накопичуються, утворюючи шар газу, який ефективно ізолює частину електрода від електроліту. Це збільшує загальний динамічний опір системи, що вимагає більшої енергії для підтримки електрохімічної реакції. 2. Утворення газових бульбашок та їх адгезія, що призводить до великого електричного опору та збільшення перенапруги атомів водню.

Окрім динамічного опору, прилипання газових бульбашок до поверхні електрода також призводить до значного збільшення електричного опору. Газ є діелектриком, і шар газових бульбашок, що покриває поверхню електрода, діє як ізолятор. Це ефективно зменшує провідність між електродом та електролітом. Збільшення електричного опору внаслідок газового шару можна описати як додатковий омичний опір, який необхідно подолати для протікання струму.

Збільшення електричного опору безпосередньо впливає на перенапругу, особливо перенапругу виділення водню. Перенапруга (η) – це додаткова напруга, яка необхідна для протікання електрохімічної реакції зі значною швидкістю, понад рівноважний потенціал. Вона складається з кількох компонентів: омичної перенапруги, активаційної перенапруги та концентраційної перенапруги.

Збільшення перенапруги атомів водню або перенапруги виділення водню є критичним аспектом.

Висока перенапруга означає, що для виділення водню потрібна більша напруга, ніж теоретично необхідна. Це безпосередньо призводить до збільшення енергетичних витрат на електроліз. Якщо бульбашки погано відриваються від поверхні сітки, вони утворюють стабільний шар, який постійно підтримує високий електричний опір та, відповідно, високу перенапругу.

3. Збільшення споживання електричного струму та зростання втрат на джоулеве тепло.

Наслідком збільшення динамічного та електричного опору, а також зростання перенапруги є значне збільшення споживання електричного струму для проведення електролізу та зростання втрат на джоулеве тепло.

Зростання опору через газові бульбашки безпосередньо призводить до збільшення джоулевого тепла. Ці теплові втрати є небажаними, оскільки вони знижують енергетичну ефективність процесу електролізу. Надмірне виділення тепла може також призвести до підвищення температури електроліту, що може вплинути на стабільність електрода, електроліту та інших компонентів системи. У деяких випадках це може навіть призвести до руйнування матеріалів або зміни їхніх властивостей.

Відомий електрод для електролізера, що містить провідний матеріал, покритий нанопористим оксидом, при цьому:

- провідний матеріал вибрано з групи, що складається з пористого вуглецю, непористого вуглецю, пористого металу, непористого металу, пористого полімеру, непористого полімеру та їх комбінацій;
- пористий метал або непористий метал вибрано з групи, що складається з титану, алюмінію, нікелю, нержавіючої сталі, заліза та їх комбінацій;
- пористий полімер або непористий полімер вибрано з групи, що складається з поліаніліну, поліпіролу, політіофенів, поліетилендіокситіофену, полі(п-феніленвініленів)ів та їх комбінацій;
- провідний матеріал покритий від одного до п'яти шарів нанопористого оксиду;
- провідний матеріал частково покритий шарами нанопористого оксиду;
- нанопористий оксид вибрано з групи, що складається з діоксиду кремнію, оксиду цирконію, оксиду титану, оксиду алюмінію, оксиду марганцю, оксиду магнію, оксиду магнію-алюмінію, оксиду олова, оксиду свинцю, оксиду заліза та їх комбінацій;
- нанопористий оксид виготовлений зі стабільної золь-гель суспензії, де атом нанопористого оксиду вибрано з групи, що складається з берилію, магнію, кальцію, стронцію, барію, марганцю, радію, титану, цирконію, гафнію, цинку, кадмію, ртуті, бору, алюмінію, галію, індію, талію, вуглецю, кремнію, германію, олова, свинцю та їх комбінацій;
- нанопористий оксид має середній діаметр пор від приблизно 0,01 нм до приблизно 500 нм;
- нанопористий оксид має середню товщину від приблизно 0,01 нм до приблизно 50 нм;
- нанопористий оксид наноситься на провідний матеріал шляхом хімічного осадження з парової фази, занурення, електроосадження, імбібування, плазмового напилення, центрифугування, напилення, шлікерного лиття, напилення та їх комбінацій [US20120305407 A1, МПК: C25B 1/00; C25B 1/02; C25B 1/24; C25B 9/00; C25B 1/26, опубл.06.12.2012].

Ці матеріали можуть широко застосовуватися для зниження вартості електродного матеріалу та розробки альтернативних джерел енергії.

Електроди, що містять провідний матеріал, який покритий нанопористим оксидом, є предметом значного інтересу в галузі електрохімії, зокрема для застосування в електролізерах. Ці електроди розробляються для підвищення ефективності та стабільності електрохімічних процесів. Провідний матеріал може бути вибраний з широкого спектра, включаючи пористий вуглець, непористий вуглець, пористий метал, непористий метал, пористий полімер, непористий полімер та їх комбінації. Нанопористе оксидне покриття, як правило, призначене для збільшення площі поверхні, покращення каталітичної активності та захисту основного провідного матеріалу від корозії. Однак, незважаючи на потенційні переваги, такі електроди мають ряд суттєвих недоліків, які обмежують їх широке застосування.

Одним з ключових недоліків електродів, що використовують оксиди марганцю, магнію, магнію-алюмінію, олова, свинцю, заліза та їх комбінації як напилення, є їхня висока реакційна здатність з лужними розчинами, що призводить до швидкого зношування поверхні. У багатьох електролізерах, особливо тих, що працюють з водними розчинами, використовуються лужні електроліти (наприклад, гідроксид калію або гідроксид натрію) для підвищення провідності та ефективності процесу.

Хімічна стабільність оксидних матеріалів у лужних середовищах є критичним фактором для довговічності електрода. Багато перехідних металів та їх оксидів, хоча й можуть проявляти каталітичну активність, є термодинамічно нестабільними в сильно лужних умовах. Наприклад, оксиди марганцю можуть піддаватися розчиненню або перетворенню в інші фази в присутності гідроксид-іонів, особливо при підвищених температурах, які часто супроводжують електрохімічні процеси. Розчинення призводить до деградації нанопористої структури, зменшення активної площі поверхні та зниження каталітичної активності та ефективності електрода.

Швидке зношування поверхні не тільки зменшує термін служби електрода, але й може призвести до забруднення електроліту продуктами розчинення, що може негативно вплинути на роботу інших компонентів електролізера або на чистоту кінцевого продукту. Це вимагає частішої заміни електродів,

що збільшує експлуатаційні витрати та знижує економічну доцільність використання таких систем.

Другим суттєвим недоліком є те, що оксидні групи матеріалів, які використовуються для покриття, часто мають значний електричний опір. Це призводить до збільшення споживаного струму та значних енергетичних втрат під час роботи електролізера.

Збільшення напруги, необхідної для подолання внутрішнього опору електрода, безпосередньо призводить до збільшення енергетичних втрат. Енергетичні втрати, як правило, виділяються у вигляді тепла, що може призвести до небажаного нагрівання електролізера та зниження загальної ефективності перетворення енергії. Ефективність електролізера часто вимірюється за допомогою фарадеївської ефективності та енергетичної ефективності. Високий опір оксидного покриття знижує енергетичну ефективність, оскільки значна частина електричної енергії витрачається на подолання опору, а не на бажану електрохімічну реакцію.

Деякі оксиди, такі як оксиди металів-напівпровідників (наприклад, деякі оксиди олова або титану), можуть мати відносно низьку провідність порівняно з чистими металами або вуглецем. Навіть якщо нанопориста структура збільшує площу поверхні, вона не обов'язково покращує об'ємну провідність самого матеріалу покриття. Для забезпечення ефективного транспорту електронів через оксидне покриття необхідно, щоб воно було або дуже тонким, або мало високу електронну провідність. Якщо оксидне покриття є товстим або має низьку провідність, це створює значний опір, що негативно впливає на продуктивність електролізера. Третій недолік полягає у значній кількості шарів матеріалів, що використовуються для створення таких електродів, що веде до великих технологічних складнощів виготовлення та збільшення вартості. Створення нанопористих оксидних покриттів на провідних матеріалах часто вимагає багатостадійних процесів, які складно масштабувати та контролювати.

Кожен етап (контроль розміру пор, розподілу пор, товщини шару нанопористої структури) вимагає точного регулювання параметрів синтезу. Будь-яке відхилення може призвести до неоптимальних властивостей електрода. Багатшаровість, яка може бути необхідною для досягнення бажаної функціональності (наприклад, один шар для адгезії, інший для каталізу, третій для захисту), ще більше ускладнює процес.

Збільшення технологічних складнощів безпосередньо впливає на вартість виробництва. Високоточне обладнання, кваліфікований персонал, дорогі прекурсори та тривалі виробничі цикли – все це сприяє підвищенню кінцевої вартості електрода. Для комерційного застосування в електролізерах, особливо для великомасштабного виробництва водню, вартість електродів є критичним фактором. Якщо вартість електродів занадто висока, це робить технологію економічно невігідною порівняно з альтернативними методами. Крім того, проблеми з відтворюваністю та масштабованістю можуть виникнути при спробі перенести лабораторні методи синтезу на промисловий рівень. Забезпечення однорідності покриття на великих площах електродів є значним викликом.

Узагальнюючи, хоча електроди з нанопористим оксидним покриттям пропонують потенційні переваги, їхні недоліки – хімічна нестабільність у лужних середовищах, високий електричний опір та складність виготовлення – є значними перешкодами для широкого впровадження. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку більш стабільних, провідних та економічно ефективних оксидних матеріалів та методів їх нанесення.

Відомо електрод для виділення водню, що містить електропровідну підкладку та покриття, сформоване на поверхні зазначеної підкладки, покращення якого полягає в наступному:

- підкладка: нікель або нікелевий сплав;
- покриття: містить принаймні один оксид металу, вибраний з групи, що складається з оксиду нікелю (NiO) та оксиду кобальту (CoO), та принаймні один метал, вибраний з групи, що складається з нікелю та кобальту зі ступенем окиснення від 20 до 90 %. Ступінь окиснення визначається формулою

$$\frac{H_1}{H_1 + H_0} \times 100, \text{ де}$$

- H_0 – висота піку, що показує інтенсивність лінії рентгенівської дифракції найвищої інтенсивності металу, вибраного з групи, що складається з нікелю та кобальту, коли покриття аналізується за допомогою рентгенівської дифрактометрії;

- H_1 – висота піку, що показує інтенсивність лінії рентгенівської дифракції найвищої інтенсивності оксиду зазначеного металу; за умови, що покриття містить нікель, кобальт та їх оксиди;

- якщо покриття містить нікель та кобальт та їх оксиди, H_0 і H_1 обчислюються як середнє арифметичне відповідних піків;

- метод нанесення покриття: напилення розплаву антикорозійного порошкового матеріалу, що містить принаймні один елемент, вибраний з групи, що складається з нікелю, кобальту, оксиду нікелю та оксиду кобальту;

- зазначене напилення розплаву є плазмовим напиленням;

- порошковий матеріал: середній розмір частинок від 0,1 до 200 мкм та складається принаймні з одного елемента, вибраного з групи, що складається з нікелю та оксиду нікелю;

- товщина: ≥ 10 мкм;
- електрод: потенціал виділення водню вище, ніж у звичайного водневого електрода (-0,98 В); [US4496453 A1, МПК: C25B 11/04; C25B 11/02, опубл.29.01.1985].

Недоліками вищевказаного електрода є:

- швидке зношування шарів наплення через реакційну здатність нікелю та оксиду нікелю, а також оксиду кобальту з лужним середовищем;
- високий електричний опір оксидних груп, що призводить до підвищення споживаного струму та енергетичних втрат;
- екстракція кобальту в електроліт, що підвищує вартість та вимагає спеціальної утилізації забрудненого електроліту.

1. Проблема швидкого зношування поверхні електрода, що містить нікель, оксид нікелю та оксид кобальту, в лужному середовищі є критичною для тривалої стабільності та ефективності електрохімічних процесів. Лужні розчини, такі як гідроксид калію (KOH) або гідроксид натрію (NaOH), широко застосовуються в електролізерах для виробництва води. Однак це середовище є агресивним для багатьох металів та їх оксидів.

Нікель, хоча і є досить стійким до корозії в лужних розчинах замість інших металів, все ж піддається пасивації та подальшому розчиненню, особливо за високих температур та струмів. Пасивація нікелю в лужних розчинах відбувається за рахунок утворення оксидних та гідроксидних плівок на його поверхні. Ці плівки, хоча й захищають метал від подальшої корозії, але можуть бути нестабільними та піддаватися деградації.

Оксид нікелю (NiO) та оксид кобальту (CoO) є напівпровідниками матеріалів, які можуть взаємодіяти з лужним електролітом. В умовах електролізу, особливо при високих потенціалах, ці оксиди можуть піддаватися хімічним та електрохімічним перетворенням. Наприклад, NiO може перетворюватися на вищі оксиди нікелю, які можуть бути менш стабільними або мати іншу морфологію, що причиняють деградацію покриття. Аналогічно, оксиди кобальту також можуть виявити перетворення, що впливає на їхню адгезію та цілість.

Висока реакційна здатність таких матеріалів з лугом може привести до явищ:

- розчинення оксидних шарів: оксиди металів можуть вільно розчинятися в лужних розчинах, особливо за наявності комплексних агентів або при високому рН. Це відбувається до поступового виведення покриття та оголення підкладки;
- механічна деградація: утворення та руйнування оксидних плівок, а також виділення газоподібної води на поверхні електрода, може створити механічні напруження, що завдають шкоди покриттю або утворенню тріщин;
- зміна морфології поверхні: постійні хімічні та електрохімічні перетворення можуть змінити мікроструктуру поверхні електрода, що впливає на його каталітичну активність та стабільність.

2. Друга проблема виникає у високому електричному опорі оксидних груп, що призводить до підвищення споживаного струму та енергетичних втрат. Ефективність електрохімічного процесу, такого як виділення води, інакше залежить від омичних втрат у системі.

Оксид нікелю (NiO) та оксид кобальту (CoO) є відомими напівпровідниками з низькою електропровідністю через метали. Електропровідність цих оксидів залежить від їх стехіометрії, дефектної структури та температури. Наприклад, NiO є р-типу напівпровідником, а його провідність може бути значно нижчою, ніж у металевого нікелю. Коли струм проходить через покриття, що містить ці оксиди, значна частина енергії може розсіюватися у вигляді тепла через омичний опір і для мінімізації цих втрат необхідно забезпечити оптимальну електропровідність покриття.

3. Третя проблема застосування видобутку кобальту в об'ємі електроліту, що призвело до значного подорожчання та застосування спеціальних технологій утилізації забрудненого кобальту електролітом. Кобальт є цінним та токсичним металом, і його отримання в електроліті створює ряд екологічних та економічних проблем.

Кобальт та його оксиди, що входять до складу покриття, можуть розчинятися в лужному електроліті.

Наслідки екстракції кобальту в електроліті є значними:

- забруднення електроліту: наявність іонів кобальту в електроліті може вплинути на його властивості, знизити ефективність процесу та негативно привести до утворення небажаних побічних продуктів;
- економічні втрати: втрата кобальту з електрода означає втрату цінного матеріалу, що збільшує експлуатаційні витрати;
- екологічні проблеми: кобальт є важким металом та бути токсичним для навколишнього середовища. Забруднений кобальтом електроліт вимагає спеціальних та дорогих методів утилізації, щоб запобігти його потраплянню в екосистему. Це може включати процеси осадження, іонного обміну або електрохімічного видалення кобальту з розчину;
- зниження терміну служби електрода: постійна втрата кобальту з покриттям поверхні до його деградації та скорочення терміну служби електрода, що вимагає частішої заміни.

Цей електрод вибраний як найближчий аналог.

Спільними суттєвими ознаками найближчого аналогу та електрода за корисною моделлю є наявність електропровідної підкладки і багат шарове покриття.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення конструкції електрода для електролізера шляхом підвищення його корозійної стійкості, каталітичної активності і електропровідності, а також збільшення терміну експлуатації та зниження його вартості.

Поставлена задача вирішується тим, що в електроді, який містить підкладку і багат шарове пористе покриття, нанесене на неї, згідно з корисною моделлю, як багат шарове покриття використані шари титану, срібла, заліза і нікелю, нанесені на підкладку послідовно магнетронним напыленням.

Матеріалом підкладки є аустенітна нержавіюча сталь марки AISI 316L.

Сумарна товщина багат шарового покриття становить 8-12 мкм.

Шар титану включає два шари завтовшки 0,8-1,2 мкм кожен.

Шар срібла включає два шари завтовшки 0,8-1,2 мкм кожен.

Шар заліза включає два шари завтовшки 0,8-1,2 мкм кожен.

Шар нікелю включає чотири шари завтовшки 0,8-1,2 мкм кожен.

Електрод виконаний у вигляді круга.

Електрод також може бути виконаний еліпсоїдної форми з розташуванням більшої осі по вертикалі.

Перший шар, нанесений на нержавіючу сталь, – титан. Титан є перехідним металом, який відомий своєю високою корозійною стійкістю, особливо в окисних середовищах, завдяки утворенню пасивуючого шару оксиду.

В електроді шар титану виконує кілька важливих функцій:

1. Покращення адгезії: Титан використовується як проміжний шар для покращення адгезії між різними матеріалами. Він може утворювати міцні зв'язки як з нержавіючою сталлю, так і з наступними шарами металів.

2. Бар'єрний шар: Шар титану запобігає дифузії атомів з підкладки (нержавіючої сталі) до наступних активних шарів, що може негативно вплинути на їх каталітичні властивості.

3. Збільшення електропровідності: хоча нержавіюча сталь є провідником, титан може сприяти покращенню загальної електропровідності електрода.

Наступний шар – срібло. Срібло є благородним металом з винятково високою електропровідністю та теплопровідністю. Хоча срібло не є першочерговим каталізатором для реакції виділення водню, його включення в структуру має кілька цілей:

1. Збільшення електропровідності: висока електропровідність срібла може значно знизити омичний опір електрода, що приведе до зменшення втрат енергії та підвищення ефективності електролізера.

2. Модифікація морфології поверхні: нанесення срібла може впливати на морфологію наступних шарів, створюючи більш розвинену поверхню, що є бажаним для каталітичної активності.

3. Потенційний синергетичний ефект: у деяких випадках срібло може проявляти синергетичний ефект з іншими металами, покращуючи їх каталітичні властивості або стабільність.

Шар заліза є наступним компонентом. Залізо, як і нікель, є перехідним металом, який може проявляти каталітичну активність у реакціях електрохімічного отримання водню, особливо в лужних середовищах. В електроді шар заліза виконує кілька важливих функцій:

1. Каталітична активність: Залізо може бути як активним центром для реакції виділення водню, особливо в поєднанні з нікелем. Сплави заліза та нікелю відомі своєю каталітичною активністю.

2. Модифікація електронної структури: Взаємодія заліза з нікелем може привести до зміни електронної структури поверхні, що оптимізує адсорбцію проміжних продуктів для реакції виділення водню та знижує енергію активації реакції.

3. Збільшення площі поверхні: Нанесення заліза може сприяти формуванню пористої або шорсткої поверхні, що збільшує ефективну площу контакту з електролітом і, відповідно, кількість активних центрів.

Останній шар – нікель. Нікель є одним з найпоширеніших і найефективніших неблагородних металів-каталізаторів для реакції виділення водню, особливо в лужних розчинах, і має наступні переваги:

1. Висока електрокаталітична активність для реакції виділення водню: Нікель має відносно низьке перенапруження для реакції виділення водню, що означає, що для досягнення певної швидкості реакції потрібно менше енергії. Це робить його ідеальним матеріалом для катодів в електролізерах.

2. Корозійна стійкість: Нікель демонструє хорошу корозійну стійкість у лужних середовищах, що є важливим для довготривалої роботи електрода.

3. Синергетичний ефект із залізом: Комбінація нікелю та заліза (NiFe) демонструє синергетичний ефект, де каталітична активність біметалічного сплаву або оксиду перевершує активність окремих компонентів. Це може бути пов'язано з оптимізацією енергії зв'язування проміжних продуктів реакції, таких як адсорбований водень.

Таким чином, представлена конструкція дозволяє виготовити електрод для електролізера, за

допомогою якого можна отримати водень з мінімальними витратами електроенергії, з усуненням нераціональних витрат енергії та забезпеченням прискорення процесів електролізу.

Електрод для електролізера електрохімічного отримання водню, що складається з аустенітної нержавіючої сталі з послідовно нанесеними магнетронним напиленням шарами титану, срібла, заліза та нікелю, є добре продуманою конструкцією. Нержавіюча сталь забезпечує механічну міцність та корозійну стійкість підкладки. Титан покращує адгезію та діє як бар'єрний шар. Срібло підвищує електропровідність. Залізо та нікель, особливо в комбінації, є активними електрокаталізаторами для реакції виділення водню, особливо в лужних середовищах. Магнетронне напилення дозволяє створювати такі складні багат шарові структури з високим ступенем контролю над їх властивостями, що є ключовим для розробки вискооефективних та довговічних електродів для водневої енергетики.

Корисна модель пояснюється рисунками:

на фіг. 1 показана схематично конструкція електрода для електролізера;

на фіг. 2 – електрод для електролізера, переріз А-А фіг. 1;

на фіг. 3 – частина повздовжнього перерізу А-А електрода.

Перелік позначень на кресленнях:

1 – електрод;

2 – шар титану;

3 – шар срібла;

4 – шар заліза;

5 – шар нікелю.

Електрод для електролізера включає сталеву підкладку 1, шар титану 2, шар срібла 3, шар заліза 4 і шар нікелю 5. Матеріалом сталеві підкладки є аустенітна нержавіюча сталь марки AISI 316L.

Виготовлення електрода здійснюють наступним чином:

1. Проводять попереднє механічне очищення, полірування та хімічне очищення підкладки з аустенітної нержавіючої сталі. Підкладка виконана в формі кола, діаметром 60 см і товщиною 1 мм.

2. Підкладку поміщають у спеціальну вакуумну камеру, проводять відкачування повітря до глибокого вакууму і здійснюють магнетронне напилення.

Магнетронне напилення (також відоме як магнетронне розпилення) є фізичним методом осадження з газової фази, який широко використовується для нанесення тонких плівок з контрольованими властивостями. Принцип роботи магнетронного напилення полягає в бомбардуванні мішені (матеріалу, який потрібно нанести) іонами інертного газу (зазвичай аргону), що спричиняє вибивання атомів з мішені. Ці атоми потім конденсуються на підкладці, утворюючи тонку плівку. Використання магнітного поля (магнетрона) дозволяє утримувати електрони поблизу мішені, збільшуючи ефективність іонізації та швидкість напилення.

Оптимальна товщина шарів вибрана методом динамічного моделювання з оптимальних умов параметрів електролізера, ефективності генерації водню з мінімальними втратами енергії.

Як сталеву підкладку електрода використано нержавіючу аустенітну сталь марки AISI 316L з хімічним складом, наведеним в Таблиці 1.

Таблиця 1

Компонент	Мас. %
Fe	60-70
C	не більше 0,08
Cr	16-18
Ni	10-14
Mn	не більше 2
Mo	2,0-3,0
Si	не більше 0,75
P	не більше 0,045
S	не більше 0,03
N	0,10

Фізичні властивості нержавіючої аустенітної сталі наведені в Таблиці 2.

Таблиця 2

Твердість за Брінелем	НВ 165
Міцність	480-600 МПа
Корозійна стійкість	висока
Межі плинності	170-320 МПа

*AISI 316L - марка аустенітної нержавіючої сталі на базі AISI 304, покращена додаванням 2-3 % молібдену, завдяки чому сталь стає особливо стійкою до корозії, високих температур та агресивних середовищ.

Аналоги - 08 × 16Н11М3, 10 × 17Н13М2.

Різновиди сімейства сталі марки AISI 316 включають:

- AISI 316 – використовується у харчовій та хімічній промисловості, для виготовлення обладнання для нафтопереробки, в атомній промисловості;

- AISI 316L – має знижений вміст вуглецю, застосовується в целюлозно-паперовій промисловості, у середовищах у присутності галогенів, для медичних імплантатів, а також у багатьох середовищах показує стійкість до міжкристалічної корозії;

- AISI 316F – автоматна сталь, застосовується для виробництва деталей на потокових лініях. При цьому кількість молібдену в цьому підтипі нижча, а вимоги до вмісту сірки та фосфору не такі жорсткі;

- AISI 316N – містить до 0,16 % азоту (порівняно з 0,10 % N у AISI 316), що надає цьому варіанту ще більш високу стійкість до точкової та щільної корозії. Матеріал застосовується при виготовленні інструментів та пристроїв для роботи з хімічними реактивами.

Додавання молібдену підвищує стійкість сталі в агресивних середовищах до впливу кислот і галогенів, включаючи хлор, підвищує стійкість до солей морської води, і покращує опір піттингової корозії, вона не абсолютно стійка до корозії, але перевершує за цим параметром багато поширених нержавіючих речовин. Через широку доступність цієї сталі вона також часто використовується при виготовленні біжутерії, а також при виробництві пірсингу та інших прикрас.

Багатошарова структура, використана для електрода, має кілька переваг:

1. Оптимізація функціональності: Кожен шар виконує специфічну функцію (адгезія, бар'єр, провідність, каталіз), що дозволяє оптимізувати загальні характеристики електрода.

2. Синергетичні ефекти: Взаємодія між різними металами (наприклад, Fe та Ni) може призвести до синергетичних ефектів, покращуючи каталітичну активність та стабільність.

3. Контроль процесу: Магнетронне напилення дозволяє точно контролювати товщину та склад кожного шару, а також характеристики взаємодій між ними, що є критичним для продуктивності.

4. Зменшення використання дорогих матеріалів: Активні каталітичні шари (наприклад, Ni) можуть бути відносно тонкими, що дозволяє зменшити загальну кількість дорогіших або стратегічно важливих матеріалів, зберігаючи при цьому високу ефективність.

Наведені вище приклади не обмежують корисну модель, а наведені виключно для ілюстрації можливості її здійснення.

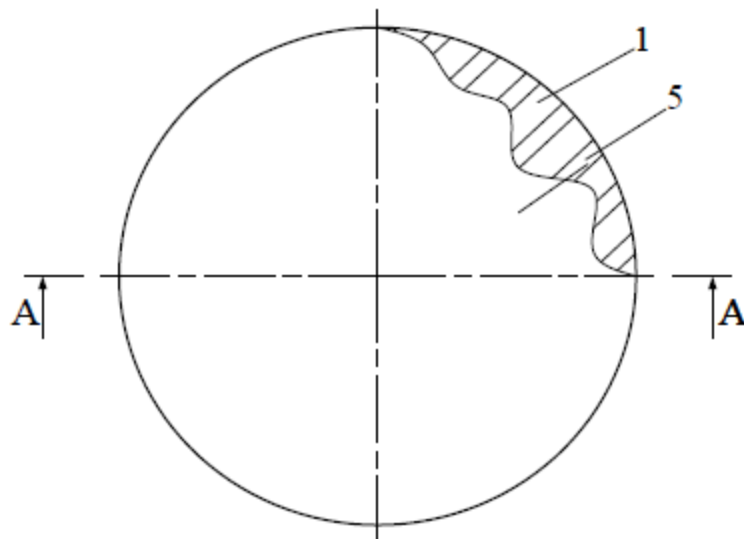


Fig. 1

A-A



Fig. 2

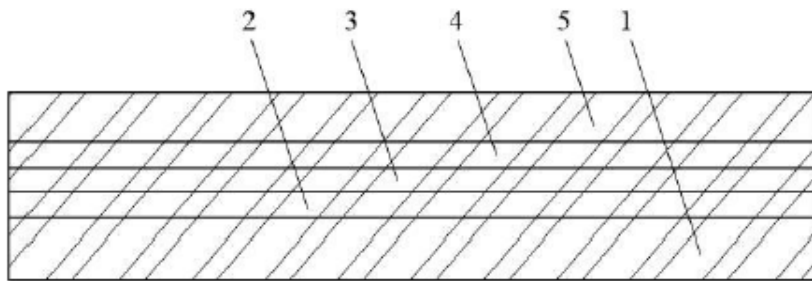


Fig. 3