

УДК 669.017:541.13

DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.67.107

## НАПРЯМ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ФАЗОУТВОРЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ КРІЗЬ СТАДІЮ ПЕРЕОХОЛОДЖЕНОГО РІДКОГО СТАНУ

ГІРІН О. Б.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
КОРОЛЯНЧУК Д. Г.<sup>2</sup>, *асист.*,  
ШЕМБЕЛЬ О. М.<sup>3</sup>, *д. х. н., проф.*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [girin@ua.fm](mailto:girin@ua.fm)

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>3</sup> Науково-дослідна лабораторія хімічних джерел струму, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-33-97, e-mail: [shembel@onil.dp.ua](mailto:shembel@onil.dp.ua)

**Анотація.** *Мета дослідження* – визначити напрям практичного використання в енергетиці відкритого явища електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану. *Методика.* Запропоновано методи растрової електронної мікроскопії та імпедансної спектроскопії. *Результати.* Досліджено морфологію поверхні та електричні властивості металевих (мідної та нікелевої) фольг, одержаних звичайним методом електроосадження і методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосадуваного металу. Встановлено ефект зниження перехідного електричного опору на межі струмопідвід / електродний матеріал у разі застосування як струмопідвода мідної або нікелевої фольги з розгалуженою морфологією поверхні. Визначено напрям практичного використання устанавленого явища для виробництва хімічних джерел струму. *Наукова новизна.* Виявлено взаємозв'язок морфології поверхні та електричних властивостей металевих фольг. *Практична значимість.* Одержані результати відкривають перспективу виробництва хімічних джерел струму з підвищеною потужністю та стабільністю.

*Ключові слова:* електрохімічне фазоутворення; морфологія поверхні; електрична властивість; електроосаджена фольга; хімічне джерело струму

## НАПРАВЛЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФАЗООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ЧЕРЕЗ СТАДИЮ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

ГИРИН О. Б.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
КОРОЛЯНЧУК Д. Г.<sup>2</sup>, *ассист.*,  
ШЕМБЕЛЬ Е. М.<sup>3</sup>, *д. х. н., проф.*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [girin@ua.fm](mailto:girin@ua.fm)

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>3</sup> Научно-исследовательская лаборатория химических источников тока, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-33-97, e-mail: [shembel@onil.dp.ua](mailto:shembel@onil.dp.ua)

**Аннотация.** *Цель исследования* – определить направление практического использования в энергетике открытого явления электрохимического фазообразования металлов и сплавов через стадию переохлажденного жидкого состояния. *Методика.* Используются методы растровой электронной микроскопии и импедансной спектроскопии. *Результаты.* Исследованы морфология поверхности и электрические свойства металлических (медной и никелевой) фольг, полученных обычным методом электроосаждения и методом стимулированного зародышеобразования при затвердевании переохлажденной жидкой фазы электроосаждаемого металла. Установлен эффект снижения переходного электрического сопротивления на границе токоподвод / электродный материал при применении в качестве токоподвода медной или никелевой фольги с разветвленной морфологией поверхности. Определено направление практического использования

установленого явлення при виробництві хімічних джерел струму. **Научная новизна.** Виявлена взаємозв'язок морфології поверхні та електричних властивостей металічної фольги. **Практическая значимость.** Полученные результаты открывают перспективу производства химических источников тока с повышенной мощностью и стабильностью.

**Ключевые слова:** електрохімічне фазоутворення; морфологія поверхні; електричне властивість; електроосаджена фольга; хімічний джерел струму

## DIRECTION OF PRACTICAL USE IN THE POWER ENGINEERING OF THE PHENOMENON OF ELECTROCHEMICAL PHASE FORMATION IN METALS AND ALLOYS VIA A SUPERCOOLED LIQUID STATE STAGE

GIRIN O.B.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KOROLYANCHUK D.G.<sup>2</sup>, *Ass.*,  
SHEMBEL E.M.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Chem.), Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment "Ukrainian State University of Chemical Technology", Gagarin Ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [girin@ua.fm](mailto:girin@ua.fm)

<sup>2</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment "Ukrainian State University of Chemical Technology", Gagarin Ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>3</sup> Scientific-Research Laboratory of Chemical Power Sources, State Higher Education Establishment "Ukrainian State University of Chemical Technology", Gagarin Ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-33-97, e-mail: [shembel@onil.dp.ua](mailto:shembel@onil.dp.ua)

**Abstract. Purpose.** The direction of practical use in power engineering of the discovered phenomenon of electrochemical phase formation in metals and alloys via a supercooled liquid state stage is required to determine. **Methodology.** The methods of scanning electron microscopy and impedance spectroscopy were used. **Findings.** The surface morphology and electrical properties of metallic (copper and nickel) foils obtained by the usual method of electrodeposition and the method of stimulated nucleation during solidification of a supercooled liquid phase of the metal being electrodeposited are studied. The effect of reducing the transient electrical resistance at the current lead / electrode interface has been established when using copper or nickel foil with a branched surface morphology as a current lead. The direction of practical use of the established phenomenon in the production of chemical sources of current is determined. **Originality.** The relationship between the surface morphology and the electrical properties of the metallic foil is revealed. **Practical value.** The obtained results open the prospect of manufacturing chemical current sources having increased power and stability.

**Keywords:** electrochemical phase formation; surface morphology; electrical property; electrodeposited foil; chemical current source

### Вступ

На основі узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень нещодавно виявлено, що електрохімічне фазоутворення металів та сплавів відбувається через стадію переохолодженого рідкого стану [1; 2]. Суть установленого явища полягає у тому, що під час електрохімічного осадження металу або сплаву у водному середовищі на твердий катод відбувається утворення сильно переохолодженої металеві рідини у вигляді безлічі рідких кластерів атомів, що виділяються лавиноподібно в різних місцях поблизу катода або зростаючого осаду, і надшвидке її затвердіння за температури осадження у вигляді кристалічної, аморфної або/та квазікристалічної фази.

Виявлене явище зумовлене дуже швидким (вибуховим) характером виділення металу чи сплаву внаслідок ланцюгової реакції електрохімічного утворення атомів і переходом кластерів атомів або їх об'єднань із рідкого стану в більш стабільний твердий [1]. В подальшому були опубліковані численні праці (найостанніші з них [3–5]), в яких

експериментально доведено існування вищезазначеного явища.

### Постановка проблеми

Виходячи із концепції електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану, уявляли доцільним визначити напрями використання установленого явища в різних галузях техніки для підвищення якості металопродукції шляхом поліпшення властивостей одержуваних електрохімічних матеріалів (покриттів, плівок, фольг тощо). Так, якщо цілеспрямовано керувати структурою або текстурою електроосаджуваного металу/сплаву через вплив на металеву рідину, яка утворюється в процесі електрокристалізації, різними електрохімічними, хімічними, механічними чи фізичними чинниками, можна одержувати нові типи покриттів, зокрема, структурно-композиційні або текстурно-композиційні покриття, які мають унікальні властивості.

Також можна одержувати плівки чи фольги з поліпшеною дрібнокристалічною структурою або розгалуженою морфологією поверхні залежно від

поставленого завдання. В результаті можна одержати електрохімічні матеріали із заздалегідь заданими фізико-механічними чи хімічними властивостями.

Для практичного використання цього явища необхідно насамперед визначити напрями його застосування в базових галузях техніки, таких як металургія, енергетика та ракетно-космічна техніка. У праці [6] запропоновано напрям практичного використання виявленого явища в металургії, зокрема, для виробництва труб. Так, завдяки управлінню текстурою та морфологією поверхні цинкових покриттів, електроосаджуваних на внутрішню поверхню труб, через вплив силою тертя незначної величини на металеву рідину, що тверділа в процесі осадження, були знайдені можливості значно підвищити властивості покриттів.

Зокрема, в результаті дослідження взаємозв'язків корозійна стійкість / текстура і відбивна здатність / морфологія поверхні цинкових електрохімічних покриттів на трубах була збільшена корозійна стійкість покриттів у три рази, а їх відбивна здатність приблизно удвічі, що в цілому підвищило якість оцинкованих труб.

**Мета дослідження** – визначити напрям практичного використання явища електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану в енергетиці, зокрема, для виробництва хімічних джерел струму.

Актуальність визначення цього напрямку зумовлена тим, що наразі поліпшення робочих характеристик хімічних джерел струму проводиться на основі удосконалення їх конструкцій, розроблення складу активних речовин, застосування для заряду струму різної полярності тощо [7–11]. В той же час зовсім не використовуються для поліпшення робочих характеристик хімічних джерел струму матеріалознавчі аспекти одержання металеві фольги, яка застосовується як струмопідвід.

### Ідея

Відомо, що в хімічних джерелах струму вельми важним параметром постає величина контактного електричного опору між металевим струмопідводом і електродним матеріалом [12]. Ця величина електроопору залежить від площі омичного контакту, яка визначається мікрорельєфом поверхні металеві фольги, що використовується як струмопідвід. При цьому потужність хімічного джерела струму зворотно пропорційна електроопору на межі металевий струмопідвід / електродний матеріал.

Ідея визначення напрямку полягала в тому, що створення розгалуженої морфології поверхні електроосадженої металеві фольги, котра використовується як струмопідвід, забезпечить низький електричний опір на межі струмопідвід / електродний матеріал. Очікується, що в результаті стимульованого зародкоутворення у процесі затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваного металу швидкість утворення

зародків буде значно перевищувати швидкість їх росту, що викличе значне розгалуження морфології поверхні одержуваної фольги.

Застосування металеві фольги з дуже розгалуженою морфологією поверхні як струмопідвід у виробництві хімічних джерел струму дозволить поліпшити їх робочі характеристики, зокрема, їх потужність.

Тому, якщо мідну або нікелеву фольгу, яку використовують як струмопідвід, одержувати не звичайним методом електроосадження (як це зазвичай робиться), а методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваного металу, можна отримати морфологію поверхні фольги з дуже розвинутою розгалуженістю.

Важливе те, що морфологічні особливості фольги, одержаної запропонованим методом, притаманні не тільки її поверхневим шарам, як за електрохімічне модифікування поверхні фольги (яке використовується останнім часом), а й усім її внутрішнім шарам. Отже, використання такої фольги для виготовлення літєвих хімічних джерел струму забезпечить не тільки їх високу потужність, а й стабільність параметрів у процесі тривалої експлуатації.

Таким чином, розроблення вищезазначеного напрямку використання устанавленого явища в енергетиці дасть можливість розробити прогресивні технології виготовлення високоенергоємних літєвих хімічних джерел струму з поліпшеними робочими характеристиками.

### Матеріали та методики

Металеву (мідну або нікелеву) фольгу одержували як звичайним методом електроосадження, так і методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваного металу. Останній метод розроблено із використанням явища електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану. Суттєво те, що цей метод не вимагає істотних капітальних витрат.

Фольгу товщиною 70 мкм отримували в сірчаноокислих електролітах перемішуванням на титановій основі з подальшим відокремленням. Температура розчинів складала 20 °С, густина струму – 5,0 А/дм<sup>2</sup> (для одержання мідної фольги) та 2,0 А/дм<sup>2</sup> (для одержання нікелевої фольги).

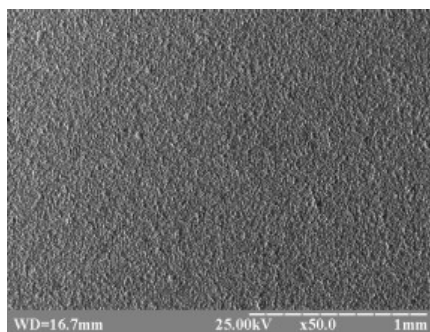
Для порівняння аналізу морфології поверхні та електричних властивостей металеві фольги застосовували методи растрової електронної мікроскопії та імпедансної спектроскопії. Морфологію поверхні фольги вивчали з використанням растрового електронного мікроскопа РЕМ-106И, що працює в режимі отримання зображення у вторинних електронах. Аналіз перехідного електроопору на межі розділу металевий

струмопідвід / літєвий електрод виконували на аналітичному радіометрі Voltalab PGZ301.

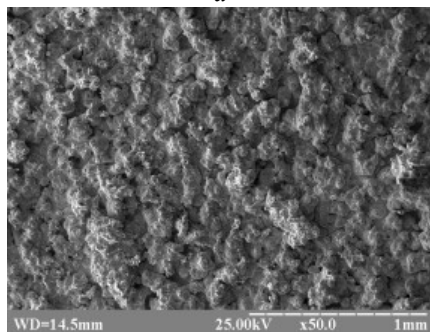
### Результати

Для комплексного оцінювання ступеня розгалуженості поверхні фольги застосовували SEM зображення, що демонстрували морфологічні особливості як значної площі фольги, так і декількох агрегатів зерен або навіть окремого зеренного агрегату.

Аналіз SEM зображень, показаних на рисунку 1, дає підставу стверджувати про принципову морфологічну відмінність поверхні мідної фольги, осадженої звичайним методом, порівняно з мідною фольгою, отриманою запропонованим методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваної міді. На відміну від незначних поверхневих утворень, якими характеризувався морфологія поверхні фольги, отриманої звичайним методом (рис. 1а), морфологія поверхні фольги, що отримана запропонованим методом, була оформлена розгалуженими зеренними агрегатами середнім розміром 0,2...0,3 мм (рис. 1б).



а



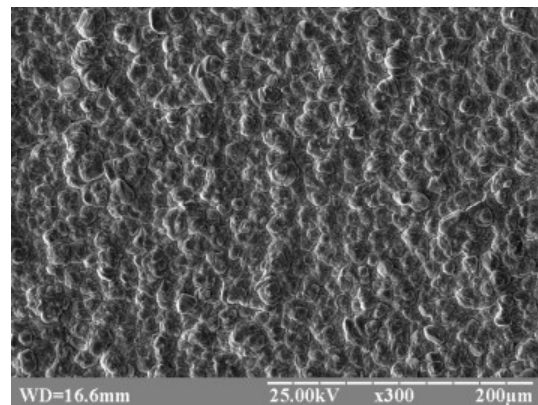
б (b)

Рис. 1. SEM зображення мідних фольг, одержаних звичайним методом електроосадження (а) і методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази міді (б), що демонструють відмінності в морфології поверхні значної ділянки,  $\times 50$  / Fig. 1. SEM images of copper foils obtained by the usual method of electrodeposition (a) and the method of stimulated nucleation during solidification of a supercooled liquid phase of copper (b), demonstrating differences in the surface morphology of a significant area,  $\times 50$

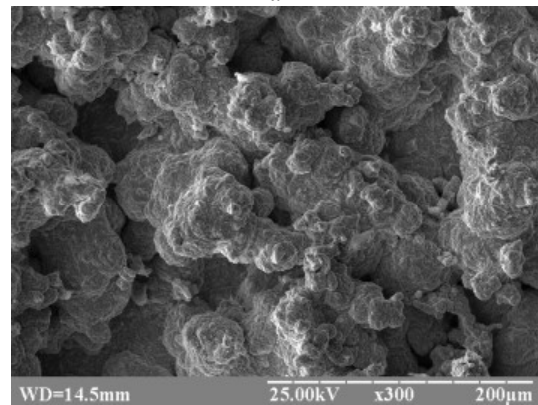
SEM зображення мідної фольги в межах декількох агрегатів зерен (рис. 2) свідчить про розгалуження значною мірою зеренних агрегатів, сформованих із застосуванням запропонованого методу (рис. 2б), порівняно з агрегатами зерен фольги, осадженої звичайним методом (рис. 2а).

Підтвердженням значного розгалуження морфології поверхні фольги, отриманої з допомогою запропонованого методу, може слугувати наявність вторинного рельєфу на поверхні окремих зеренних агрегатів (рис. 3б), на відміну від більш згладженого рельєфу окремих агрегатів зерен фольги, осадженої звичайним методом (рис. 3а).

Вищевказані морфологічні особливості принципово відрізняють поверхневу будову мідної фольги, отриманої запропонованим методом, від будови мідної фольги, одержаної звичайним методом електроосадження.



а



б (b)

Рис. 2. SEM зображення мідних фольг, одержаних звичайним методом електроосадження (а) і методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваної міді (б), що ілюструють відмінності в морфології поверхні в межах декількох агрегатів зерен,  $\times 300$  / Fig. 2. SEM images of copper foils obtained by the usual method of electrodeposition (a) and the method of stimulated nucleation during solidification of a supercooled liquid phase of copper being electrodeposited (b), illustrating differences in the surface morphology within several aggregates of grains,  $\times 300$

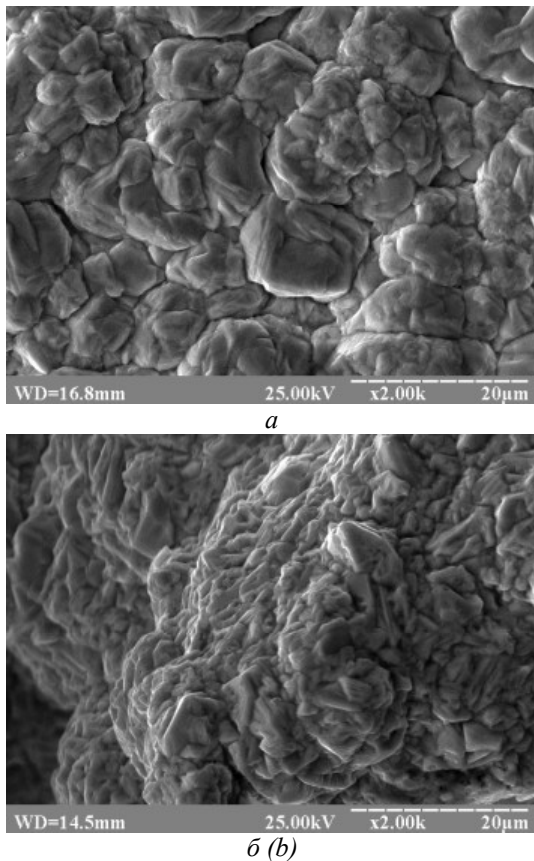


Рис. 3. SEM зображення мідних фольг, одержаних звичайним методом електроосадження (а) і методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваної міді (б), що показують відмінності в морфології поверхні в межах окремого зерненого агрегату,  $\times 2\ 000$  / Fig. 3. SEM images of copper foils obtained by the usual method of electrodeposition (a) and the method of stimulated nucleation during solidification of a supercooled liquid phase of copper being electrodeposited (b), showing differences in the surface morphology within a separate grain aggregate,  $\times 2\ 000$

Аналогічний результат одержано і порівнювальним аналізом морфології поверхні нікелевих фольг, отриманих двома методами. Так, SEM зображення нікелевої фольги, одержаної методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваного нікелю, продемонстрували дуже розгалужену морфологію поверхні як значної площі фольги, так і декількох агрегатів зерен та окремого зерненого агрегату.

Імпедансні спектри літєвих електродів із мідними струмовими підводами показали, що діаметр півкола годографа склав 120 Ом для електродів на мідній фользі, отриманій звичайним методом, і лише 106 Ом для електродів на мідній фользі, одержаній запропонованим методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння

переохолодженої рідкої фази електроосаджуваної міді (рис. 4).

Результати аналогічних вимірювань для електродів із нікелевими струмовими підводами свідчили, що діаметр півкола годографа склав 140 Ом і 130 Ом відповідно для електродів на звичайній нікелевій фользі і на нікелевій фользі, одержаній запропонованим методом (рис. 4.).

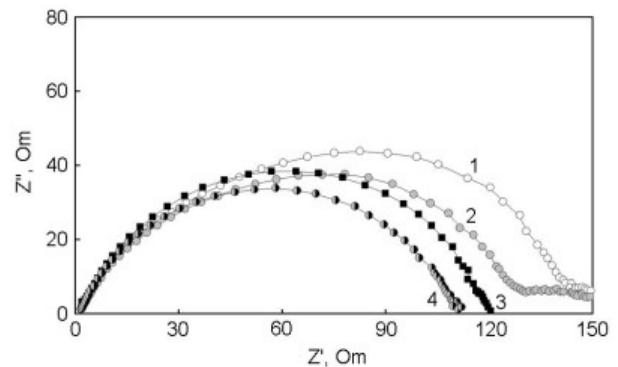


Рис. 4. Імпедансні спектри літєвих електродів на нікелевій (1, 2) та мідній (3, 4) фольгах, одержаних звичайним методом електроосадження (1, 3) та методом стимульованого зародкоутворення під час затвердіння переохолодженої рідкої фази електроосаджуваного металу (2, 4) / Fig. 4. Impedance spectra of lithium electrodes on nickel (1, 2) and copper (3, 4) foils obtained by the usual method of electrodeposition (1, 3) and the method of stimulated nucleation during solidification of supercooled liquid phase of metal being electrodeposited (2, 4)

Таким чином, виявлено взаємозв'язок морфології поверхні та електричних властивостей металеві фольги. Дослідження цього взаємозв'язку дозволило встановити ефект зниження перехідного електричного опору на межі струмопідвід / електродний матеріал у разі застосування як струмопідвода мідної або нікелевої фольги з розгалуженою морфологією поверхні.

Для практичної реалізації визначеного напрямку доцільно виконати в подальшому прикладні дослідження з розроблення оптимального варіанта виготовлення фольги з розгалуженою морфологією поверхні, яка б забезпечувала найнижчі значення перехідного електроопору на межі струмопідвід / електродний матеріал.

Наведені експериментальні результати, отримані під час визначення напрямку практичного використання в енергетиці явища електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану, стануть у подальшому науковим підґрунтям для розроблення прогресивних технологій виробництва літєвих високоенергоємних хімічних джерел струму з підвищеною потужністю та стабільністю.

**Висновки**

1. Виявлено взаємозв'язок морфології поверхні та електричних властивостей металеві фольги.
2. Установлено ефект зниження перехідного електричного опору на межі струмопідвід / електродний матеріал під час застосування як струмопідвода мідної або нікелевої фольги з розгалуженою морфологією поверхні.

3. Визначено напрям практичного використання установленого явища в енергетиці, зокрема, у виробництві хімічних джерел струму, що відкриває перспективу виготовлення літєвих високоенергоємних хімічних джерел струму з підвищеною потужністю та стабільністю.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Girin O. B. Phenomenon of precipitation of metal being electrodeposited, occurring via formation of an undercooled liquid metal phase and its subsequent solidification. Part 1. Experimental detection and theoretical grounding / O. B. Girin // *Materials Development and Processing* / Eds. J. V. Wood, L. Schultz, D. M. Herlach. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag Gmbh, 2000. – Vol. 8. – Pp. 183–188. – Режим доступу : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527607277.ch30/summary>
2. Girin O. B. Phenomenon of precipitation of metal being electrodeposited, occurring via formation of an undercooled liquid metal phase and its subsequent solidification. Part 2. Experimental verification / O. B. Girin // *Materials Development and Processing* / Eds. J. V. Wood, L. Schultz, D. M. Herlach. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag Gmbh, 2000. – Vol. 8. – Pp. 189–194. – Режим доступу : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527607277.ch31/summary>
3. Girin O. B. Further evidence of phase formation through a liquid state stage in metals being electrodeposited: Part 1 / O. B. Girin // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2017. – Vol. 53, № 2. – Pp. 137–143. – Режим доступу : <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375517020041>
4. Girin O. B. Further evidence of phase formation through a liquid state stage in metals being electrodeposited: Part 2 / O. B. Girin // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2017. – Vol. 53, № 3. – Pp. 233–239. – Режим доступу : <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375517030048>
5. Girin O. B. Further evidence of phase formation through a liquid state stage in metals being electrodeposited: Part 3 / O. B. Girin // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2017. – Vol. 53, № 4. – Pp. 339–344. – Режим доступу : <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375517040056>
6. Girin O. B. Understanding the corrosion resistance and reflectivity of electrodeposited zinc coatings obtained on pipes via a combined characteristic of their texture and surface morphology / O. B. Girin, S. I. Zhdanov // *Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2017 (MS&T'17): proceedings*. – Red Hook (USA), 2017. – Vol. 1. – Pp. 1078–1082. – Режим доступу : [https://www.matscitechproceedings.org/gp/gp\\_multiconferencesite\\_tms/mst17/Data/pdfs/284-115915.pdf](https://www.matscitechproceedings.org/gp/gp_multiconferencesite_tms/mst17/Data/pdfs/284-115915.pdf)
7. Коровин Н. В. Химические источники тока. Современное состояние / Н. В. Коровин // *Электрохимическая энергетика*. – 2003. – Т. 3, № 4. – С. 163–168. – Режим доступу : <https://www.sgu.ru/sites/default/files/journal/izvestia/pdf/2013/12/27/20030401.pdf>
8. Zhang S. S. Liquid electrolyte lithium/sulfur battery: fundamental chemistry, problems, and solutions / S. S. Zhang // *Journal of Power Sources*. – 2013. – Vol. 231, № 1. – P. 153–162. – Режим доступу : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312019568>
9. Soloveichik G. L. Flow batteries: Current status and trends / G. L. Soloveichik // *Chemical Reviews*. – 2015. – Vol. 115, № 20. – Pp. 11533–11558. – Режим доступу : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr500720t>
10. Ahn Y. Altering anode thickness to improve power production in microbial fuel cells with different electrode distances / Y. Ahn, B. E. Logan // *Energy Fuels*. – 2013. – Vol. 27, № 1. – Pp. 271–276. – Режим доступу : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef3015553>
11. Turney D. E. Rechargeable zinc alkaline anodes for long-cycle energy storage / D. E. Turney [et al.] // *Chemistry of Materials*. – 2017. – Vol. 29, № 11. – Pp. 4819–4832. – Режим доступу : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.chemmater.7b00754>
12. Скундин А. М. Современное состояние и перспективы развития литиевых аккумуляторов / А. М. Скундин, О. Н. Ефимов, О. В. Ярмоленко // *Успехи химии*. – 2002. – Т. 71, № 4. – С. 329–346. – Режим доступу : [http://www.uspkhim.ru/php/paper\\_rus.phtml?journal\\_id=rc&paper\\_id=706](http://www.uspkhim.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=rc&paper_id=706)

**REFERENCES**

1. Girin O.B. *Phenomenon of precipitation of metal being electrodeposited, occurring via formation of an undercooled liquid metal phase and its subsequent solidification. Part 1. Experimental detection and theoretical grounding*. In *Materials Development and Processing* (eds J.V. Wood, L. Schultz and D.M. Herlach). Weinheim : WILEY-VCH Verlag Gmbh, 2000, vol. 8, pp. 183–188. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527607277.ch30/summary>
2. Girin O.B. *Phenomenon of precipitation of metal being electrodeposited, occurring via formation of an undercooled liquid metal phase and its subsequent solidification. Part 2. Experimental verification*. In *Materials Development and Processing* (eds J.V. Wood, L. Schultz and D.M. Herlach). Weinheim: WILEY-VCH Verlag Gmbh, 2000, vol. 8, pp. 189–194. Available at : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527607277.ch31/summary>
3. Girin O.B. *Further evidence of phase formation through a liquid state stage in metals being electrodeposited. Part 1. Surf. Eng. Appl. Elect.* 2017, vol. 53, no. 2, pp. 137–143. Available at : <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375517020041>
4. Girin O.B. *Further evidence of phase formation through a liquid state stage in metals being electrodeposited: Part 2. Surf. Eng. Appl. Elect.* 2017, vol. 53, no. 3, pp. 233–239. Available at : <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375517030048>
5. Girin O.B. *Further evidence of phase formation through a liquid state stage in metals being electrodeposited: Part 3. Surf. Eng. Appl. Elect.* 2017, vol. 53, no. 4, pp. 339–344. Available at : <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375517040056>

6. Girin O.B. and Zhdanov S.I. *Understanding the corrosion resistance and reflectivity of electrodeposited zinc coatings obtained on pipes via a combined characteristic of their texture and surface morphology*. In *Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2017 (MS&T'17): proceedings*. Red Hook (USA), 2017, vol. 1, pp. 1078–1082. Available at : [https://www.matscitechproceedings.org/gp/gp\\_multiconferencesite\\_tms/mst17/Data/pdfs/284-115915.pdf](https://www.matscitechproceedings.org/gp/gp_multiconferencesite_tms/mst17/Data/pdfs/284-115915.pdf)
7. Korovin N.V. *Khimicheskie istochniki toka. Sovremennoye sostoyaniye* [Chemical sources of current. Current state]. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical power engineering]. 2003, vol. 3, no. 4, pp. 163–168. (in Russian). Available at : <https://www.sgu.ru/sites/default/files/journal/izvestia/pdf/2013/12/27/20030401.pdf>
8. Zhang S.S. *Liquid electrolyte lithium/sulfur battery: fundamental chemistry, problems, and solutions*. *J. Power Sources*. 2013, vol. 231, no. 1, pp. 153–162. Available at : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312019568>
9. Soloveichik G.L. *Flow batteries: Current status and trends*. *Chem. Rev.* 2015, vol. 115, no. 20, pp. 11533–11558. Available at : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr500720t>
10. Ahn Y. and Logan B.E. *Altering anode thickness to improve power production in microbial fuel cells with different electrode distances*. *Energy Fuels*. 2013, vol. 27, no. 1, pp. 271–276. Available at : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef3015553>
11. Turney D.E., Gallaway J.W., Yadav G.G., Ramirez R., Nyce M., Banerjee S., Chen-Wiegart Y.K., Wang J., D'Ambrose M.J., Kolhekar S., Huang J. and Wei X. *Rechargeable zinc alkaline anodes for long-cycle energy storage*. *Chem. Mater.* 2017, vol. 29, no. 11, pp. 4819–4832. Available at : <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.chemmater.7b00754>
12. Skundin A.M., Yefimov O.N. and Yarmolenko O.V. *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya litiyevykh akkumulyatorov* [Current state and prospects of development of lithium batteries]. *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry]. 2002, vol. 71, no. 4, pp. 329–346. (in Russian). Available at : [http://www.uspkhim.ru/php/paper\\_rus.phtml?journal\\_id=rc&paper\\_id=706](http://www.uspkhim.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=rc&paper_id=706)

*Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Б. В. Виноградовим (Україна), д-ром. техн. наук, проф. І. М. Кузяєвим (Україна)*

Надійшла в редакцію 17.03.2018

Прийнята до друку 25.03.2018