

ПЕРСПЕКТИВИ ФУНДАЦІЇ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНОЇ ТЕОРІЇ РОСТУ КРИСТАЛІВ ПРИ ЕЛЕКТРОКРИСТАЛІЗАЦІЇ

Вступ

На основі стислого аналізу логічної послідовності розвитку Феноменологічної теорії росту кристалів в розплавах / розчинах та з урахуванням компактного огляду основних напрямків та результатів досліджень електрохімічного осадження кристалічних, нанокристалічних та аморфних металів та сплавів сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень для фундації нового наукового напрямку – Феноменологічної теорії росту кристалів при електрокристалізації.

На основі розуміння термодинамічної еквівалентності переохолодження в пірометалургії та перенапруження в електроосадженні запропоновано нарис програми досліджень, результатом яких стане розробка Феноменологічної теорії росту кристалів та аморфних фаз в процесах електрокристалізації / електроосадження

Розроблення Феноменологічної теорії росту кристалів при електрокристалізації забезпечить прогнозування та планомірну розробку нових технологій функціональних матеріалів методами електроосадження.

Феноменологічна теорія росту кристалів базується на результатах експериментальних досліджень фізико-хімічних ефектів, що складають системну сутність цього явища та які вдається беззаперечно пояснити на основі термодинаміки рівноважного стану та термодинаміки незворотних процесів. В результаті формується система уявлень про це явище, яка складає надійний фундамент для розвитку загальної теорії фазових перетворень, математичного моделювання фазових перетворень, створення технологій нових функціональних матеріалів.

Для переліку розділів, що мають входити в новий науковий напрямок – Феноменологічну теорію росту кристалів при електрокристалізації, корисно коротко проаналізувати історію розвитку Теорії росту кристалів при кристалізації з розплаву / розчину.

Середина ХХ століття відзначилася інтенсивним розвитком теорії росту кристалів як в газовій, так і в рідкій фазах. З'явилися фундаментальні роботи по елементарним процесам росту кристалів [1], по стабільності плоского фронту росту кристалів [2, 3], по тепловим та концентраційним аспектам одно- та багатофазної кристалізації [4, 5], по феноменології евтектичної кристалізації [6–9]. Пізніше фундаментальні результати цих робіт разом з власними результатами одного з авторів були використані при опрацюванні основ феноменологічної теорії евтектичної кристалізації [10]. З появою трансмісійної електронної дифракційної мікроскопії успішно розвивається феноменологічна теорія дислокацій [11–13], на базі якої постає дислокаційна теорія росту кристалів з високою ентропією плавлення. З'явився і прогресує новий розділ загальної теорії росту кристалів – теорія росту нанокристалів.

На цій теоретичній базі не тільки оптимізувалася технологія процесів пірометалургії, але й створювались основи теорії й технології нових процесів, пов'язаних з великою щільністю енергії, великими швидкостями охолодження, з технологічним використанням утворення і розпаду метастабільних фаз та станів [14, 15].

На відміну від пірометалургії друга гілка металургії – електрометалургія – зосередила свої зусилля на вивченні електрохімічного аспекту процесу осадження, і, зокрема, осадження кристалічної твердої фази - електрокристалізації. Вивчалися питання впливу поляризації (перенапруги) на зародження центрів кристалізації, на еволюцію структури фронту росту твердої фази (аморфна – кристалічна), на вихід по струму. Було розроблено теорію подвійного електричного шару (двойного электрического слоя – рос.).

Привертає увагу теорія мікропотоків речовини та електричного струму у дендритному середовищі фронту електрокристалізації [16]. Ця робота відкриває перспективи для започаткування термодинаміки незворотних процесів при електрокристалізації (по аналогії з пірометалургією, див. [17], с. 96–209).

Велика увага приділялась впливу домішок в електролітах на зміну структури та властивостей електроосадженої речовини. Основною метою небагато чисельних металографічних досліджень було вивчення закономірностей формування кристалографічної текстури осадженої речовини.

Ця особливість спрямованості металографічних досліджень електрокристалізованого осаду напевно була обумовлена тією обставиною, що осад, за виключенням антикорозійних та інших покриттів, в ті роки не був кінцевим продуктом, а призначався для переплавки. Тому найважливішою характеристикою цього напівфабрикату була чистота по домішкам, у тому числі – гетерофазність та газонасиченість.

Інтенсивний розвиток порошкової металургії і, зокрема, процесів з використанням мікро- та нанопорошків поставив питання по розгортанню досліджень по ідентифікації елементів мікро- та наноструктури, в тому числі - зародків електрокристалізації та продуктів початкових стадій росту кристалів, особливо в умовах високої щільності струму. Ця задача обмовлена двома факторами: 1) малими радіусами кривизни поверхні дендритів, що утворюються, і спричиненим цією особливістю мікропопографії фронту великим томсонівським відхиленням інтенсивних параметрів термодинамічної рівноваги в порівнянні з такими для плоскої міжфазної границі і 2) збільшенням локальної щільності току на кінчиках дендритних гілок.

Разом з тим знайомство з сучасною науковою літературою по електрокристалізації свідчить про значні труднощі в ідентифікації та класифікації важливих мікроструктурних елементів електроосадженої твердої речовини, таких, як кристалічний зародок, чарунок (ячейка – рос.) фронту кристалізації як область монокристалічного зерна на фронті, яка формує поверхню фронту подібну до бруківки, та дендритне зерно, яке виросло з одного центру кристалізації – рис. 1. Детальний аналіз генезису та морфології цих структурних елементів надано в [10].

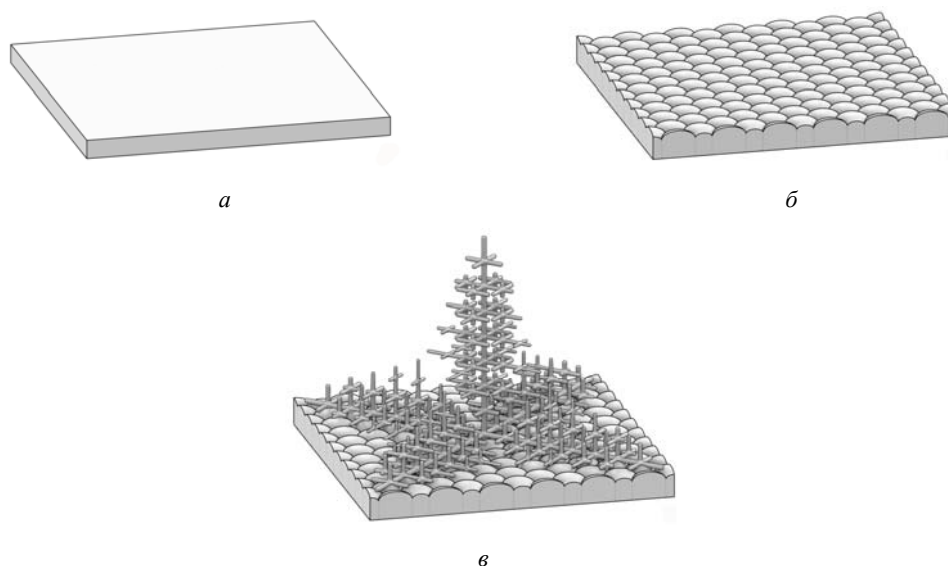


Рис. 1. Послідовність зміни мікротопографії фронту кристалізації під впливом зростання концентрації домішків з $k < 1$:
a – плоско огранована форма; *б* – утворення чарункової форми; *в* – перехід чарункової форми у дендритну

Відомо, що експериментальне вивчення цих структурних елементів в продуктах пірометалургії дало можливість розвинути основи феноменологічної теорії одно- та багатофазної кристалізації. І це при тому, що реальна мікротопографія фронту кристалізації в пірометалургії завжди недоступна для прямого спостереження. Але унікальна інформативність аналізу фронту росту кристалів заохочує дослідників розробляти та використовувати методи декантації фронту. Між тим усі вони пов'язані з ударним навантаженням частково закристалізованого зливку і частковим порушенням фронту, що спричиняє певну втрату мікроелементів структури. Крім того, плівка розплаву, що прилипла до фронту, може частково вуалювати дрібні деталі поверхні розділу рідкої та твердих фаз та додатково утруднити аналіз.

Альтернативою декантації став гартувально-мікроскопічний аналіз, розроблений під керівництвом К. П. Буніна [7, 10]. Але ця методика пов'язана з необхідністю аналізу мікроструктури чисельних (іноді десятків) перерізів однієї і тієї ділянки мікрошліфа, отриманих шляхом переполіровок з контрольованою товщиною шару, що було видалено. В результаті будується 3D модель поверхні об'єкту дослідження [10, 17]. Отримана інформація також дозволяє вивчати генезис структурних складових даного мікрооб'єкту.

Прикладом успішного розв'язання багаторічної проблеми може слугувати вирішення дилеми про природу евтектики, а саме, чи є евтектичне зерно «механічною сумішшю» дрібних кристалів евтектичних фаз, чи це дендритний бікристаліт з гілками евтектичних фаз, що взаємно проросли одна в іншій. Важливість вибору адекватної 3D моделі евтектичного зерна мала не тільки академічний, але й технологічний інтерес, оскільки необхідно було розробити методику управління процесом структуроутворення в перебігу евтектичної кристалізації, а саме: 1) керуванням мультиплікованим зародженням, ростом та виклинюванням ізольованих частинок евтектичних фаз на фронті кристалізації в варіанті «механічної суміші» [18, 19] або 2) управління кінетикою кооперативного росту дендритів евтектичних фаз в двофазному бікристаліті – в варіанті бікристаліту, який було обгрунтовано в [10] шляхом побудови адекватних 3D моделей евтектичних колоній в різних системах з різною кристалохімічною природою евтектичних фаз.

Фронт електрокристалізації в рідких електролітах володіє дуже важливою особливістю – він постійно є відкритим для дослідника, що в принципі дозволяє дослідити структуроутворення *in situ* за умови використання певного оптичного приладу, наприклад приладу Elipovist, який є електролітичною коміркою з довгофокусним об'єктивом.

Більш простою та надійною є дослідження фронту електрокристалізації в растровому електронному мікроскопі. Він має значно більшу глибину різкості порівняно зі світловим мікроскопом, більшу роздільну властивість та збільшення. Якщо вивчати зміну мікротопографії фронту на різних етапах електрокристалізації в контрольованих умовах експерименту (структура вихідної підкладки – ріст плоского кристалу – перехід до чарункової субструктури фронту – початок росту дендритів на чарунковій підкладці – розвинена дендритна структура) можна отримати не тільки адекватну модель кінетики процесу, але й надійну інформацію про причину - наслідкові зв'язки.

Таким чином методичною основою розробки феноменологічної теорії електрокристалізації є вивчення еволюції макро-, мікро- та тонкої структури осадків (як поверхні, так і внутрішніх об'ємів), отриманих в планових експериментах при контрольованій зміні одного або декількох інтенсивних термодинамічних параметрів стану системи.

Як свідчить навіть неповний огляд літератури по проблемі, в цьому напрямку проводиться інтенсивна робота. Публікуються монографії, в яких викладаються як загальні, так й конкретні проблеми теорії та технології.

В фундаментальній роботі [20] викладаються основи фізикохімії поверхні металів та сплавів стосовно електрохімічних процесів отримання та обробки металічних матеріалів. З позицій сучасних досягнень фізикохімії поверхні розглянуто електрохімічну термодинаміку металів та сплавів, кінетику катодних та анодних процесів.

Підготовлено низку навчальних посібників, що викладають сучасний стан електрохімії з врахуванням різних аспектів теорії та технології [21, 22].

Виявляються причинно-наслідкові зв'язки в конкретних системах. В роботі [23] знайдено, що збільшення щільності струму спричиняє стрибкоподібне зменшення мікротвердості осаду сплавів металів групи Fe з W та збільшення концентрації W. При цьому кристалічна структура втрачається і відбувається аморфізація осаду.

В роботі [24] за допомогою скануючого електронного мікроскопу провели 3D реконструкцію топографії фронту електрокристалізації гальванічних покриттів Fe-Mo та Fe-Co-Mo. Збільшення щільності катодного струму в бінарних сплавах спричиняє збагачення осаду молібденом й не впливає на мікрорельєф його поверхні. В тернарних покриттях відбувається конкурентне відновлення заліза й кобальту у сплаві, причому вміст Mo зі збільшенням щільності струму зростає, а рельєф поверхні з дрібнокристалічною голкоподібною структурою змінюється мікроглобулярною. Рентгенодифракційний аналіз показав, що всі сплави мали аморфну атомну структуру.

Проводяться дослідження багатокомпонентних композитних покриттів з метою розробки електродних матеріалів для водневої технології [25, 26], каталізаторів [26–28], між якими привертає увагу використання низьких перенапруг [27] з метою контролю мікрорельєфу фронту електрокристалізації.

В експериментальних роботах все більшу увагу приділяють дослідженню мікро- та наноструктури осаду [29, 30], а також умов їх аморфізації [31] з метою оптимізації їх хімічних та службових властивостей продуктів електроосадження.

Збільшується кількість робіт по дослідженню впливу змінного струму різної частоти, амплитуди, асиметричності [32], а також імпульсного [33] та струму, що змінюється за різними законами. Цим забезпечуються режими «осадження-розчинення» у випадку змінного струму та «осадження – пауза» у випадку однополярних імпульсів. Ця методика видається унікальною з точки зору пірометалургії, де миттєва зупинка кристалізації й навіть перехід до розчинення принципово є неможливим через теплову інерційність системи (зрозуміло за виключенням гартування з напіврідкого стану). Тому інформація про мікро- й тонку структуру фронту та тіла осаду є надзвичайно важливою при розробці теорії елементарних процесів росту електроосаджених кристалів. Між тим у багатьох випадках висновок про мікроструктуру зупиняється на загальній характеристиці поверхні: кристалічна, наноструктура, аморфна. При цьому не розділяється розмір дендритного кристалу та його дендритної гілки першого порядку, що спричиняє вірогідність помилки в декількох порядках; не враховується зв'язок кристалографічної текстури осаду з кристалохімічними особливостями даної фази, а саме, зі ступенем гетеродесмічності системи міжатомних зв'язків в напрямку росту та пов'язану з цим ретикулярну щільність пакування атомів й анізотропію швидкостей росту у різних напрямках. Між тим це важливо враховувати при прогнозуванні виникнення стовпчастої структури осаду, типу огранування поверхні кристалів та пов'язаний з нею механізм росту (огранований кристал – тангенціальний ріст, округла поверхня – нормальний ріст). При утворенні аморфної структури можливі варіанти її атомного пакування, які відрізняються параметрами ближнього порядку – координаційними числами та радіусами координаційних сфер. Їх можна визначати за методикою рентгенодифракційного аналізу розплавів [34].

Планування стратегії експериментальних досліджень спрощує та обсаєдина, що вже є добре опрацьовані основи феноменологічної теорії кристалізації розплавів. Враховуючи, що термодинамічним еквівалентом переохолодження в пірометалургії є перенапруження (поляризація) в електроосадженні, можна для початку поставити серію експериментів по виявленню впливу перенапруження на еволюцію мікроструктурних елементів фронту електрокристалізації чистих металів та напівметалів, а саме: плоский фронт, чарунковий і нарешті дендритний фронт кристалізації. Перш за все це дозволить виявити вплив ступеню гетеродесмічності міжатомних зв'язків та перенапруження на реалізацію типу елементарних процесів росту (нормальний або тангенціальний). Ті ж дослідження на металічних сплавах з коефіцієнтами розподілення домішкового компоненту $k < 1$ ($k = c_S/c_L$, де c_S та c_L – рівноважна розчинність компоненту B в твердій та рідкій фазах відповідно) зразу ж дозволять визначити вплив «концентраційного» перенапруження (за аналогією з концентраційним (constitutional) переохолодженням), спричиненого впливом другого компоненту сплаву як домішкового. Тут важливо добре володіти знанням як діаграм фазових рівноваг, так і структурних ознак, властивих різним мікроструктурним елементам фронту.

Потім можна за такою ж методикою дослідити вплив технологічних домішків, наприклад, ПАВ та органічних добавок в електроліті.

Третя задача полягає у встановленні особливостей структури та фазового складу продуктів електрокристалізації, що обумовлені типом діаграми фазових рівноваг: з твердим розчином, евтектичною, перитектичною, синтектичною, екстектичною рівновагами, або з проміжною фазою. Це дасть важливу для електрохіміків інформацію щодо стабільних та метастабільних фазових рівноваг в відповідних системах за

температурою технологічних процесів електроосадження. Це відкриває можливість прогнозування фазового складу сплава, що проектується отримувати електрокристалізацією, а також сплавів для подальшої переплавки, тонких покриттів, а також об'ємних виробів зі складною гетерофазною мікроструктурою типу антифрикційних сплавів, зносостійких сплавів, сплавів з заданими службовими властивостями, наприклад, електро- та теплопровідністю, високою твердістю, магнітними властивостями, для генерації, накопичення та зберігання електроенергії, катализаторів, сорбентів, матеріалів водневої енергетики.

Дуже цікавою та інтересною проблемою є дослідження закономірностей отримання аморфних електроосаджених металів та сплавів. Вони можуть слугувати ідеальним вихідним матеріалом для отримання нанокристалічних спечених продуктів з жорстким контролем величини зерна, що отримується в перебігу керованої твердофазної кристалізації.

Грунтуючись на викладеному, можна намітити наступні етапи створення феноменологічної теорії росту кристалів при електрокристалізації.

Вивчення закономірностей зародження кристалів металів, напівметалів, ковалентних та проміжних фаз з різним ступенем гетеродесмічності міжатомних зв'язків.

Вивчення закономірностей автономного росту кристалів металів, напівметалів, ковалентних фаз та проміжних фаз з різним ступенем гетеродесмічності міжатомних зв'язків.

Вивчення закономірностей росту кристалів фаз в бінарних системах з різним типом діаграм фазових рівноваг.

Вивчення закономірностей розвитку вторинних процесів (твердофазна кристалізація аморфної речовини, рекристалізація, виділення надлишкових фаз з пересичених твердих розчинів, грануляція дендритних гілок, коалесценція) в високотемпературних системах.

Вивчення закономірностей фазових перетворень по п. 1–4 в органічних електролітах. Очікуваний практичний результат – створення метал-органічних функціональних композицій для приладів генерації та збереження енергії.

На всіх етапах: виявлення загальних закономірностей впливу інтенсивних термодинамічних параметрів на фазові рівноваги, рушійну силу, атомний механізм росту та мікроскопічну кінетику електрокристалізації та електроосадження аморфних фазових складових. Очікуваний практичний результат – створення термодинаміки незворотних катодних та анодних процесів.

Наведений нарис програми добре узгоджується з реальною логикою еволюції феноменологічної теорії зародження та росту кристалічних фаз при затвердінні розплаву та в перебігу подальших вторинних процесів.

Враховуючи значний інтелектуальний ресурс вищих навчальних закладів України та доступність приладів для експериментальних методів дослідження, а також академічну мобільність, таку велику програму можна реалізувати при розумному розподілі тем студентських дослідницьких, курсових та дипломних робіт, кандидатських та докторських дисертацій в межах відповідних цільових програм.

Автори висловлюють вдячність магістрові архітектури Мазуру В. О. за візуалізацію мікроструктурних моделей фронту кристалізації [35].

Список літератури

1. Burton. The growth of crystals and the equilibrium structure of their surface / Burton, N. Cabrera, F.C. Frank. Phil. Trans. Royal Soc., London.- Ser. A. – 1951. – P. 243–299.
2. Джексон К. А. Механизм роста кристаллов. Жидкие металлы и их затвердевание / Джексон К. А. – М. : Металлургия. – 1962. – С. 200–214.
3. Маллинз В. Устойчивость плоской поверхности раздела фаз при кристаллизации разбавленного бинарного сплава / В. Маллинз, Р. Секерка // Проблемы роста кристаллов. – М. : Мир, 1968. – С. 106–126.
4. Тиллер В. А. Многофазная кристаллизация. Жидкие металлы и их затвердевание / Тиллер В. А. – М. : Металлургиздат. – 1962. – С. 305–354.
5. Чалмерс Б. Теория затвердевания / Пер. с англ. – М. : Металлургия, 1968. – 228 с.
6. Chadwick G.A. Eutectic alloy solidification. Journal of metal / Chadwick G.A. – 1962. – 14. – P. 703–721.
7. Бунин К. П. Введение в металлографию / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка. – М. : Металлургиздат. – 1954. – 192 с.
8. Hillert M. The structure of white cast iron / M. Hillert, M. Steinhauser. Jernkontorets annaler. – 1960. – Vol. 144.– №7.– P. 520–559.
9. Hunt J. D. Binary eutectic solidification / K.A. Jackson. Transaction of the Metallurgical Society of AIME. – 1966.– Vol. 236.– N 6.– P. 843–852.
10. Таран Ю. Н. Структура эвтектических сплавов / Таран Ю. Н., Мазур В. И. – М. : Металлургия, 1978. – 312 с.
11. Фридель Ж. Дислокации / Фридель Ж. – М. : Мир.– 1967. – 643 с.
12. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении / Утевский Л. М. – М. : Металлургия, 1973. – 584 с.
13. Hirsch P. V. Electron microscopy of thin crystals / P .V. Hirsch, A. Hovie, M. J. Whelan. London : Butterworth, 1965.– 549 p.
14. Салли И. В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения / Салли И. В. – К. : Наукова думка. – 1972. – 136 с.

15. Мирошниченко И. С. Формирование структуры сплавов при сверхбольших скоростях охлаждения / Мирошниченко И. С. // Механизм и кинетика кристаллизации. – Минск : Наука и техника, 1964. – С. 146–156.
16. Барабошкин А. Н. Электродные процессы в расплавах с частичной электронной проводимостью. Расплавы / Барабошкин А. Н. – 1993. – Вып. 4. – С. 38–49.
17. Мазур В. И. Введение в теорию сплавов / В. И. Мазур, А. В. Мазур. – Днепропетровск : Лира ЛТД, 2009. – 264 с.
18. Гречный Я. В. О кристаллизации двойных сплавов эвтектического типа / Гречный Я. В. // Доклады АН СССР. – 1952. – Т. 86. – № 5. – С. 977–980.
19. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев ; 7-е изд., пер. и доп. – М. : Альянсб 2011. – 643 с.
20. Андреев Ю. Я. Электрохимия металлов и сплавов / Андреев Ю. Я. ; 2-е изд. пер. и доп. – М. : Изд. Высшее обр. и наука, 2016. – 326 с.
21. Березин Н. Б. Электроосаждение металлов из водных растворов комплексных соединений / Н. Б. Березин, Ж. В. Межевич. – Казань : Изд. КНИТУ, 2015. – 168 с.
22. Якименко Г. Я. Технічна електрохімія. Гальванічні виробництва / Г. Я. Якименко, В. М. Артеменко. – Харків : Вид. НТ ХПІ, 2006. – 272 с.
23. Silkin S. A. Electrodeposition of alloys of the iron group metals with tungsten from citrate and gluconate solutions / S. A. Silkin, A. V. Gotelyak, N. I. Tsynsaru // Surface engineering and Applied Electrochemistry. – 2017. – 53 (1). – P. 7–14.
24. Ведь М. В. Пути управления составом и морфологией гальванических покрытий Fe-Mo и Fe-Co-Mo / М. В. Ведь, И. Ю. Ермоленко, Н. Д. Сахненко // Электронная обработка металлов. – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 47–54.
25. Gang W. Electrochemical preparation and characteristics of Ni-Co-LaNi₅ composite coatings as electrode materials for hydrogen evolution / W. Gang, L. Ning, D. Song // Materials Chemistry and Physics. – 2004. – N 2. – P. 307–314.
26. Vencataraman H. Development of new tolerant ternary anode catalysts for proton exchange membrane Fuel cells / H. Vencataraman, R. Kunz, M. Fenton // Journal of the electrochemical Society. – 2003. – N 1503. – P. 178–284.
27. Hu X. Electrocatalytic hydrogen evolution at low overpotentials by cobalt macrocyclic glyoxime and tetraimine complexes / X. Hu, B.S. Brunshwig, J.C. Peters // Journal of the American Chemical Society. – 2007. – Vol. 129. – N 29. – P. 8988–8998.
28. Кузнецов В. В. Электрохимический синтез сплава никель-рений и его электрокаталитические свойства / В. В. Кузнецов, Ю. Д. Гамбург, В. В. Жуликов // Электроосаждение металлов и сплавов. – №4. – 2018. – С. 4–12. DOI: 10.47188/0869-5326_2018_26_4_4
29. Gomez E. Microstructure of soft magnetic Co-Mo alloy obtained by electrodeposition seed layer / Silicon substrate / E. Gomes, E. Pellicer, E. Walles // Electrochemistry Communications. – 2004. – Vol. 6. – P. 853–859.
30. The effect of electroposition conditions and post-annealing on nanostructure of Co-W coatings / N. Tsynsaru, H. Cesiulis, A. Budreika and etc. // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206. – P. 4262–4369.
31. Doten M. Electrodeposition of amorphous, nanocrystalline and polycrystalline Ni-Mo alloys from pyrophosphate baths / M. Doten, H. Cesiulis, Z. Stojek // Electrochimica Acta. – 2005. – Vol. 50. – P. 1405–1412.
32. Исследование гибридных материалов для электрохимической энергетики, полученных с применением переменного асимметричного тока / А. В. Храменкова, А. И. Изварин, О. А. Финаева, Е. А. Яценко // Электроосаждение металлов и сплавов. – № 2. – 2021. – С. 34–43. DOI: 10.47188/0869-5326_2021_29_2_34
33. О влиянии параметров электрического режима и условий массопереноса на толщину и хим. состав чередующихся слоев многослойных нанопроволок / С. С. Кругликов, Т. Г. Царькова. О. И. Воробьева и др. // Электроосаждение металлов и сплавов. – № 2. – 2020. – С. 65–73. DOI: 10.47188/0869-5326_2020_28_2_65
34. Романова А. В. Структура и свойства металлических расплавов. Металлы, электроны, решетка / Романова А. В. – К. : Наукова думка. – 1975. – С. 168–203.
35. <https://sketchfab.com/3d-model/dendritic-crystallization-front>

Одержано 06.12.2021

© Мазур В. І.¹, Пінчук С. Й.²

¹ Д-р техн. наук, професор Національного технічного університету України
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

² Д-р техн. наук, професор Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна

Mazur V., Pinchuk S. On the prospects for the founding of the phenomenological theory of crystal growth during electrocrystallization