

УДК 621.35+621.43

doi:10.20998/2413-4295.2021.03.13

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ КЕП ДЛЯ ЕКО- ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

М. Д. САХНЕНКО¹, Г. В. КАРАКУРКЧІ^{2*}, Т. О. НЕНАСТІНА³, І. Ю. ЄРМОЛЕНКО¹,
А. М. КОРОГОДСЬКА⁴

¹ кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, УКРАЇНА

³ кафедра технологій дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА

⁴ кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: anyutikukr@gmail.com

АНОТАЦІЯ На підставі аналізу особливостей формування КЕП показано, що їх одержання та застосування є одним із світових трендів функціональної гальванотехніки та дозволяє вирішити низку практичних задач, зокрема в галузі еко- та енерготехнологій. Осадження поліфункціональних КЕП кобальту з тугоплавкими металами здійснювали із цитратно-пірофосфатних електролітів у гальваностатичному та імпульсному режимах. Одержанні композиційні покриття володіють комплексом підвищених механічних та протикорозійних властивостей, каталітичною та фотокаталітичною активністю, що обумовлює перспективу застосування одержаних тонкоплівкових матеріалів у багатьох галузях промисловості. Показано, що процеси формування таких багатокомпонентних систем є вельми складними, окремим проблемним питанням, що потребує вирішення, є організація технологічного процесу КЕП адаптованого під виробничі потреби. Розроблена схема організації технологічного процесу на основі модульного підходу, що ґрунтується на результатах комплексних досліджень впливу кількісних характеристик робочих електролітів та режимів електролізу на склад та властивості синтезованих покриттів. Узагальнена схема технології КЕП відображає послідовність загальноприйнятих у гальванохімічних виробництвах процесів та операцій з можливістю застосування модульного принципу організації гальванічних ділянок і цехів. Варіативність технологічних схем передбачає гнучке керування складом і властивостями покриттів за рахунок зміни часових та енергетичних характеристик електроосадження при несуттєвому коригуванні кількісного та якісного складу електролітів. Розроблений модульний підхід в організації технологічного процесу може бути використаний як основа для інших електрохімічних технологій синтезу функціональних матеріалів.

Ключові слова: композиційне електрохімічне покриття; катодне осадження; технологічний процес; модульний підхід; функціональні властивості

FEATURES OF CEC TECHNOLOGY FOR ECO- AND ENERGY TECHNOLOGIES

М. САХНЕНКО¹, Г. КАРАКУРКЧІ², Т. НЕНАСТІНА³, І. ЄРМОЛЕНКО¹, А. КОРОГОДСЬКА⁴

¹ Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Military National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, UKRAINE

³ Department of Technologies of Road-Building Materials and Chemistry, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE

⁴ Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Based on the analysis of the peculiarities of CEC formation, it is shown that their production and application is one of the world trends in functional electroplating and allows to solve a number of practical problems, in particular in the field of eco- and energy technologies. The deposition of polyfunctional CECs of cobalt with refractory metals was carried out from citrate-pyrophosphate electrolytes in galvanostatic and pulsed modes. The obtained composite coatings have a complex of increased mechanical and anti-corrosion properties, catalytic and photocatalytic activity, which determines the prospects for the use of the obtained thin-film materials in many industries. It is shown that the processes of formation of such multicomponent systems are very complex, a separate problem that needs to be solved is the organization of the technological process of CEC adapted to production needs. The scheme of organization of technological process on the basis of the modular approach which is based on results of complex researches of influence of quantitative characteristics of working electrolytes and modes of electrolysis on structure and properties of the synthesized coverings is developed. The generalized scheme of CEC technology reflects the sequence of generally accepted processes and operations in electrochemical production with the possibility of applying the modular principle of organization of galvanic sites and shops. Variability of technological schemes provides flexible control of the composition and properties of coatings by changing the time and energy characteristics of electrodeposition with insignificant adjustment of the quantitative and qualitative composition of electrolytes. The developed modular approach in the organization of technological process can be used as a basis for other electrochemical technologies of synthesis of functional materials.

Keywords: composite electrochemical coating; cathodic deposition; technological process; modular approach; functional properties

Вступ

Одним із світових трендів функціональної гальванотехніки на даний час є створення композиційних електрохімічних покриттів (КЕП),

зокрема на основі металів підгрупи заліза [1,2]. Принцип одержання композиційних покриттів базується на процесі, в якому формування покриття здійснюється з електролітів-суспензій за рахунок

співосадження дисперсних частинок різної природи та розмірів сумісно з основними металами. За рахунок інкорпорації частинок другої фази до складу синтезованих покриттів значно підвищуються їх споживчі та експлуатаційні характеристики, також покриття можуть набувати нових властивостей, (протикорозійних, каталітичних, магнітних антифрикційних тощо). Саме це і обумовлює значне поширення та затребуваність КЕП у багатьох галузях промисловості [3,4]. В той же час, остаточно не вирішеним місцем технологій одержання покриттів цього типу все ще залишається забезпечення достатньої якості синтезованого матеріалу при використанні електролітів-суспензій з високою агрегативною стійкістю.

Вищенаведені аргументи складають підґрунтя перспектив розширення галузей застосування таких покриттів та розв'язання ряду науково-практичних завдань, серед яких можна відзначити створення нових і вдосконалення вже існуючих електрохімічних технологій зміцнення [5,6] та протикорозійного захисту [7,8] поверхонь виробів, одержання електрокаталітичних матеріалів [9,10], тощо.

До числа суттєвих переваг осадження КЕП відносять незначні матеріальні витрати на організацію та здійснення технологічного процесу; одержання композиційних систем з поліфункціональними властивостями; синтез покриттів з мінімально необхідним припуском на фінішну механічну обробку; сталість фізико-механічних властивостей та структури оброблюваного металу через відсутність додаткового термічного впливу [11]; можливість автоматизувати технологічний процес для обробки більшої кількості виробів. Перераховані фактори сукупно суттєво здешевшують собівартість технології одержання КЕП.

Одним із найзатребуваніших напрямів використання даних покриттів є еко- та енерготехнології, головною метою яких є задоволення потреб людини з використанням природних ресурсів за мінімальної шкоди навколишньому середовищу (рис. 1) [12]. Особливу значущість означених технологій віддзеркалює той факт, що вони забезпечують енергетичну безпеку держави та водночас зменшують ризики кліматичних збурень.

Екотехнологія об'єднує дві галузі: «техніку екології» та «екологію техніки», що обумовлюють необхідність розуміння структурної побудови і функціонування різноманітних екосистем і суспільства в цілому [12]. У сукупності поєднання цих складових сприяє зменшенню шкоди екосистемам, прийняттю екології як фундаментальної основи застосування нових технологій і забезпеченню збереження біорізноманіття та сталого розвитку. В той же час екотехнології дозволяють суттєво поліпшити економічні характеристики за умови заподіяння найменшої шкоди навколишньому середовищу. Це може досягатися здійсненням постійного контролю впливу на екосистеми;

підвищенням вимог до параметрів ефективності під час вибору та використання джерел енергії та матеріалів; розвитком та вдосконаленням процесів очищення.



Рис. 1 – Основні напрями еко- та енерготехнологій

Тому актуальним є розробка ресурсоощадних технологій одержання функціональних матеріалів, для потреб еко- та енерготехнологій.

Мета та задачі роботи

Метою роботи є обґрунтування технології поліфункціональних КЕП кобальту з тугоплавкими металами із цитратно-пірофосфатних електролітів для еко- та енерготехнологій.

Поставлена мета досягається вирішенням задач щодо визначення особливостей електроосадження композиційних покриттів із комплексних цитратно-пірофосфатних електролітів та обґрунтування узагальненої схеми технології їх одержання.

Матеріали і методи

Осадження КЕП проводили з розроблених цитратно-пірофосфатних електролітів у гальваностатичному та імпульсному режимах, на попередньо підготовлену поверхню Ст3 та міді М1 (табл.1).

Таблиця 1 – Склад робочих електролітів для осадження КЕП (pH 8,0-9,0)

Компоненти електроліту, г/дм ³	КЕП		
	Co-Mo-WO _x	Co-Mo-ZrO ₂	Co-W-ZrO ₂
CoSO ₄	26 – 58	26 – 58	26 – 80
Na ₂ WO ₄	20 – 55	–	16 – 33
Na ₂ MoO ₄	10 – 30	7 – 25	–
Zr(SO ₄) ₂	–	4 – 17	4 – 17
K ₄ P ₂ O ₇	70 – 220	35 – 70	35 – 70
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇	60 – 90	60 – 120	60 – 150
Na ₂ SO ₄	70 – 80	70 – 80	70 – 80

Характеристика режимів електроосадження покриттів наведена у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика режимів електроосадження КЕП

Покриття	Режим формування	Густина струму, А/дм ²
Co-Mo-WO _x	гальвано-	7,0 – 9,0
Co-Mo-ZrO ₂	статичний /	4,0 – 8,0
Co-W-ZrO ₂	імпульсний	4,0 – 8,0

Морфологію поверхні досліджували методом сканівної електронної мікроскопії на ZEISS EVO 40XVP. Розмір зерен та асоціатів, шорсткість та ступінь розвинення поверхні визначали методом атомносилової зондової мікроскопії за стандартних умов із застосуванням сканівного зондового мікроскопу NT-206. Елементний склад покриттів встановлювали методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії на спектрометрі INCA Energy 350. Структуру покриттів визначали методом рентгенівської дифрактометрії на ДРОН-3. Корозійну стійкість матеріалів досліджували з використанням методу поляризаційного опору за аналізом хронопотенціограм та вольтамперограм, а також спектрів електродного імпедансу на електрохімічному модулі Autolab-30 моделі PGSTAT301N Metrohm Autolab, оснащеному аналізатором частоти FRA-2, в інтервалі частот змінного струму 10^{-2} – 10^6 Гц. Каталітичну активність КЕП тестували в модельних реакціях окиснення низькомолекулярних спиртів та електролітичного виділення Н₂ та визначали обробкою даних ЛВА та ЦВА. Фотокаталітичні властивості КЕП вивчали у модельній реакції фотодеструкції азобарвника метилового жовтогогарячого МЖ під впливом ультрафіолетового випромінювання. Концентрацію МЖ визначали за допомогою фотоелектроколориметра КФК-2 вимірюванням оптичної густини забарвленого розчину. Фізико-механічні характеристики покриттів досліджували за показниками мікротвердості та адгезійної міцності під час металографічних досліджень.

Виклад основного матеріалу

Аналіз доступної науково-технічної інформації свідчить про те, що останнім часом спостерігається зростання зацікавленості зарубіжних та вітчизняних дослідників до електрохімічного синтезу багатокомпонентних сплавів [13,14] та КЕП на основі [15] металів підгрупи заліза з тугоплавкими металами, зокрема кобальту. Це обумовлено можливістю поєднання в таких функціональних матеріалах цілого комплексу унікальних властивостей, притаманних сплавотвірним компонентам, а в деяких випадках – нададитивного посилення експлуатаційних характеристик [16].

В той же час, такі електролітичні системи на даний час ще недостатньо досліджені. Більшість представлених результатів присвячено електроосадженню бінарних покриттів Co та Ni з W і Mo [17-20]. Проте інтерпретацію даних по встановленню механізмів електроосадження та прогнозування характеристик (якісний і кількісний склад, функціональні властивості) синтезованих КЕП ускладнюють такі фактори, як різноманітність іонних форм компонентів використовуваних електролітів, наявність ряду конкуруювальних реакцій під час встановлення іонних рівноваг в робочих електролітах, а також багатостадійність процесу електроосадження.

З урахуванням наявного масиву наукових даних [10,21], перспективними з практичної точки зору, слід вважати системи Co-Mo-W та Co-Mo(W)-Zr, а також КЕП на їх основі Co-Mo-WO_x, Co-Mo(W)-ZrO₂, оскільки такі покриття мають розширений спектр функціональних властивостей (корозійної тривкості, зносостійкості, каталітична магнітна активність), які реалізуються в тонких поверхневих шарах синтезованих матеріалів [22,23].

Проте процеси формування таких багатокомпонентних систем є вельми складними. Невизначеними залишаються й умови щодо прогнозування їх споживчих властивостей. Але розв'язання таких завдань має чітко визначену спрямованість на задоволення потреб промислового комплексу, зокрема в еко- та енерготехнологіях, у розробці сучасних тонкоплівкових матеріалів з поліфункціональними характеристиками.

Окремою невирішеною проблемою залишається організація технологічного процесу одержання означених функціональних матеріалів, що і визначило основний напрям даного дослідження.

Результати та їх обговорення

Основу для розробки технологій функціональних КЕП складають результати комплексних досліджень впливу кількісних характеристик робочих розчинів (табл. 1) і режимів електролізу (табл. 2) на склад та властивості покриттів, які наведені у попередніх роботах [11,24].

Встановлено, що синтезовані в зазначених умовах композиційні багатокомпонентні покриття мають у своїй металевій структурі (матриці) зміцнювальну фазу (оксиди тугоплавких компонентів), рівномірно розподілену у шарі КЕП. Це обумовлено тим, що вона формується безпосередньо під час перебігу електродного процесу, а не вводиться із електроліту. Також це сприяє підвищенню функціональних характеристик одержаних покриттів (мікротвердості, корозійної тривкості, каталітичної активності у гетерогенних окисно-відновних реакціях тощо) [25]. Функціональні властивості таких систем залежать від якісних та кількісних параметрів синтезованого КЕП (склад, фазова структура,

морфологія та шорсткість поверхні, розподіл компонентів у по товщині та поверхневих шарах).

У запропонований спосіб можна одержувати КЕП на основі кобальту з тугоплавкими металами із широкою сферою застосування.

Проте важливим чинником подальшого впровадження запропонованих технічних рішень є розроблення технологічних схем організації процесу одержання з метою адаптації технології під виробничі потреби.

Організацію технологічного процесу із формування КЕП можна надати наступною схемою (рис. 2). Організація технологічного процесу на основі модульного підходу полягає у послідовному поєднанні модулів, які включають в себе сукупність окремих технологічних операцій.



Рис. 2 – Узагальнена технологічна схема осадження КЕП

«Підготовчий модуль» включає операції по механічній підготовці та хімічній обробці поверхні матеріалу-носія. Механічна підготовка може включати абразивну обробку, шліфування та полірування поверхні до заданих показників шорсткості (за потребою), що зазначається в конструкторській документації. Хімічна обробка передбачає очищення та знежирення поверхні шляхом видалення залишків полірувальних сумішей, паст, жирових плям, мастил, інших змащувальних матеріалів, які здійснюють хімічним травленням у лужних розчинах відповідно до рекомендованих для обробки металу-носія.

Важливим при цьому є забезпечення достатньої кількості промивань, зокрема каскадних, з метою видалення залишків означених матеріалів та робочих розчинів. З урахуванням вимог до температури робочих розчинів та рекомендованого часу обробки, доцільно використання автоматизованих блоків управління та контролю за проведенням зазначених операцій. Відзначимо, що саме такі вимоги до організації технологічних процесів складають сенс сучасного світового тренду *smart*-технологій та Industry 4.0. Їх особливістю є повна автоматизація виробничих процесів із можливістю гнучкого керування в *online*-режимі за умови зміни внутрішніх або зовнішніх факторів. Керуючу та контролюючу функції при цьому виконує кіберфізична система, що є віртуальною копією об'єктів фізичного світу. Суттєвою перевагою застосування саме таких систем є можливість прийняття ними децентралізованих рішень залежно від умов функціонування, здатність до самоналагодження та самонавчання, а також до кооперації та взаємодії із аналогічними системами в *online*-режимі. Комунікаційний зв'язок між обслуговуючим персоналом та виробничими машинами забезпечують інтернет-технології. В той же час оптимізація собівартості виробництва забезпечується тим, що підприємства можуть виробляти продукцію індивідуально відповідно до вимог замовника.

«Електрохімічний модуль» передбачає безпосереднє формування КЕП на поверхні виробу відповідно до рекомендованих технологічних параметрів. Також до складу модулю введено окремий блок «Приготування робочого електроліту», що обумовлено необхідністю врахування перебігу реакцій іонного обміну (гідролізу, комплексотворення, полімеризації оксоаніонів) у використуваних розчинах [26].

При організації даного модуля також доцільно передбачити використання автоматизованого блоку управління процесом із контролем його основних параметрів (pH , t). Це забезпечить чітке дотримання встановлених технологічних режимів формування та високу якість цільового покриття. Контроль pH під час електроосадження здійснюється з використанням pH -метра зі скляним електродом. Вміст сплавотвірних металів у покритті визначається спектрофотометром з точністю вимірювання до 5%. За необхідністю електроліт в електролізері замінюється (до 2/3 робочого об'єму) при цьому здійснюється контроль та коригування pH . Відпрацьовані розчини електролітів піддаються електрохімічній обробці з метою вилучення цільових компонентів (Co, Mo, W, Zr). Промивні води необхідно направляти одразу в кисло-лужні стоки, оскільки спеціальні методи очистки для них не передбачені. Контроль зовнішнього вигляду КЕП проводять візуально. Покриття повинні бути рівномірними, матово-сірого кольору та повністю покривати поверхню. Міцність зчеплення КЕП з

матеріалом оброблюваного матеріалу перевіряється використанням методів нагріву, зламу та полірування. Контрольована поверхня після тестувань на мас містити відшарування або здуття покриття. Кількісними параметрами контролю є товщина покриттів, механічні показники (мікротвердість, швидкість абразивного зношування), хімічний та фазовий склад.

«Фінішний модуль» об'єднує проведення операцій каскадного промивання виробів (деталей) у ваннах із теплою та холодною водою для видалення залишків робочого електроліту, сушіння готової продукції та здійснення контролю якості сформованих покриттів. З метою зменшення виносу у стічні води хімікатів і забруднення навколишнього середовища після процесу нанесення покриттів доцільним є встановлення ванни уловлювання.

Запропонований підхід в організації технологічного процесу одержання КЕП дозволяє ефективно використати робочу площу підприємства з урахуванням наявних технологічних ділянок, скоротити час на монтаж, обслуговування, ремонт та модернізацію робочого обладнання, а також оптимізувати роботу персоналу щодо забезпечення технологічного процесу та контролю за ним. З урахуванням зазначених особливостей прогнозованим є зниження вартості готової продукції за рахунок зменшення витрат на запуск виробництва, обслуговування та модернізацію виробничих ліній при підвищенні безпеки працюючого персоналу.

Категорії приміщень та виробничих будівель визначаються відповідно до існуючих норм в залежності від кількості та вибухонебезпеки матеріалів та речовин, що в них розміщуються. Завантаженість робочих приміщень технологічним обладнанням, як правило, не повинна перевищувати 25%. Розміщення технологічного обладнання рекомендовано здійснювати таким чином, щоб забезпечити послідовність технологічних операцій та максимально зменшити кількість потоків вантажів, особливо тих, що рухаються у зворотних напрямках та можуть перетинатися. Рекомендовано обладнання майданчиків для складання виробів (деталей) біля робочих місць. При цьому заборонено складання продукції у проходах та коридорах.

Розроблені рекомендації сприятимуть ефективній реалізації технологічного процесу осадження КЕП кобальту з тугоплавкими металами.

Варіативність розроблених технологічних схем осадження КЕП передбачає гнучке керування складом і властивостями синтезованих функціональних матеріалів (Co-Mo-WO_x , Co-Mo-ZrO_2 і Co-W-ZrO_2) за умови зміни часових та енергетичних характеристик електроосадження при несуттєвому коригуванні кількісного та якісного складу електролітів [3]. Це надає можливість осаджувати КЕП як цілеспрямованого призначення, так і одержувати синергетичні матеріали з комплексною реалізацією у

поверхневих шарах підвищених фізико-механічних, фізико-хімічних та каталітичних властивостей.

Модульний підхід в організації технологічного процесу може бути використаний як основа для інших електрохімічних технологій синтезу функціональних матеріалів, зокрема плазмо-електролітичних гетерооксидних систем на вентиляльних металах [27].

Висновки

Визначені особливості технології електроосадження КЕП кобальту з тугоплавкими металами із цитратно-пірофосфатних електролітів. Показано, що одержані матеріали мають комплекс підвищених функціональних характеристик, що обумовлює перспективність їх застосування в еко- та енерготехнологіях. Розроблено рекомендації щодо організації технологічного процесу одержання зазначених матеріалів. Запропоновано об'єднати типові технологічні операції в окремі модулі залежно від етапу гальванохімічної обробки. Враховуючи складність процесів електроосадження КЕП кобальту з тугоплавкими металами рекомендовано ввести в технологічну схему окремий блок приготування робочого електроліту. Модульний підхід в організації технологічного процесу може бути використаний як основа для реалізації інших електрохімічних технологій синтезу функціональних матеріалів.

Список літератури

1. Tsyntsaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E. J. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2012. Vol. 48. No. 6. P. 491–520. doi:10.3103/S1068375512060038.
2. Sakhnenko N. D., Ved M. V., Hapon Yu. K., Nenastina T. A. Functional coatings of ternary alloys of cobalt with refractory metals. *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. Vol. 88. No. 12. P. 1941–1945. doi:10.1134/S1070427215012006X.
3. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved M. V. *Nanocomposite electrolytic coatings with defined functional properties*. Almaty: Kazakh University, 2020. 180 p.
4. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Prom. Mater. Proc. Appl. Electrochem.*: monogr. Kyiv: KNUTD, 2017. P. 214–223.
5. Каракуркчі Г. В., Ведь М. В., Єрмоленко І. Ю., Сахненко М. Д. *Електролітичні покриття сплавами заліза для зміцнення і захисту поверхні*. Х.: ФОП Панов, 2017. 200 с.
6. Tsyntsaru N., Dikusar A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobanova Zh., Sidel'nikova S., Belevskii S., Yapontseva Yu., Bersirova O., Kublanovskii V. Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on cobalt and iron superalloys. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. Vol. 48. No 7-8. P. 419–428. doi:10.1007/s11106-009-9150-7.
7. Ved M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Yermolenko I. Yu. Electroplating and functional properties of Fe-Mo and Fe-Mo-W coatings. *Iss. Chem. Chem. Technol.* 2014. No. 5-6 (98). P. 53–60.

8. Сахненко М., Ведь М., Каракуркчі Г., Єрмоленко І., Зюбанова С. Ресурсозаощаджувальна технологія відновлення зношених деталей. *Інтегровані технології та ресурсозбереження*. 2013. № 2. С. 9–13.
9. Grison C., Escande V., Biton J. *Ecocatalysis. A New Integrated Approach to Scientific Ecology*. Elsevier, 2015. 100 p.
10. Yarpontseva Y. S., Dikuser A. I., Kyblanovskii V.S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2014. No. 50. P. 330–336. doi:10.3103/S1068375514040139.
11. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Yermolenko I. Y., Nenastina T. A. Nanostructured Functional Coatings of Iron Family Metals with Refractory Elements. *Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications. NANO 2017*. 2018. Vol. 214. P. 3–34. doi:10.1007/978-3-319-92567-7_1.
12. Кричевский С. В. *Экологические аспекты новейшей истории техники (концепция и методика анализа в парадигме «зелёного» развития) : монография*. Санкт-Петербург : Свое издательство, 2018. 170 с.
13. Silkin S., Gotelyak A., Tsyntaru N., Dikuser A. Size effect of microhardness of nanocrystalline Co-W coatings produced from citrate and gluconate solutions. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2015. Vol. 51. P. 228–234. doi:10.3103/S106837551503014X.
14. Silva M., Kola A., Duarte K., Sun S., Podlaha E.J. Plating of NiW, NiMo and NiMoW with and without Fe: Induced codeposition mechanism. *National Association for Surface Finishing Annual Conference and Trade Show, SUR/FIN 2014*. 2014. Vol. 1. P. 575–596.
15. Yermolenko I. Yu., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Sachanova Y. I. Composition, Morphology, and Topography of Galvanic Coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo. *Nanosci. Res. Lett.* 2017. Vol. 12. P. 352. doi:10.1186/s11671-017-2128-3.
16. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Koziar M. Ternary cobalt-molybdenum-zirconium coatings for alternative energies. *Appl. Surf. Sci.* 2017. Vol. 421. Part A. P. 68–76. doi:10.1016/j.apsusc.2017.01.196.
17. Tanase S. I., Tanase D. P., Dobromira M., Georgescu V. Morphology, magnetic, magnetoresistance and optical properties of Co-Ni-Mo alloys thin films. *Appl. Surf. Sci.* 2011. Vol. 257. Is. 24. P. 10903–10909. doi:10.1016/j.apsusc.2011.07.139.
18. Sakita A.M.P., Passamani E.C., Kumar H., Cornejo D.R., Fugivara C.S., Noce R.D., Benedetti A.V. Influence of current density on crystalline structure and magnetic properties of electrodeposited Co-rich CoNiW alloys. *Mat. Chem. Phy.* 2013. Vol. 141. P. 576–581. doi:10.1016/j.matchemphys.2013.05.066.
19. Eliaz N., Gileadi E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals. *Mod. Asp. Electrochem.* 2008. Vol. 42. P. 191–301.
20. Sun S., Bairachna T., Podlaha E. J. Induced Codeposition Behavior of Electrodeposited NiMoW Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 2013. Vol. 160. No. 10. P. 434–440. doi:10.1007/978-0-387-49489-0_4.
21. Nenastina T.A., Ved' M.V., Sakhnenko N.D., Proskurina V.O. Effect of Electrolysis Conditions on the Composition and Microhardness of Ternary Cobalt Alloy Coatings. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2021. Vol. 57, No 1. P. 59–66. doi:10.3103/S1068375521010099.
22. Dearnly P. A. *Introduction to Surface Engineering*. Cambridge University Press, 2017. 325 p.
23. Chary V., Reddy K., Kishan G., Niemantsverdriet H., Mestl G. Structure and catalytic properties of molybdenum oxide catalysts supported on zirconia. *J. Catal.* 2004. Vol. 226. No 2. P. 283–291. doi:10.1016/j.jcat.2004.04.028.
24. Ненастіна Т. О., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Зюбанова С. І. Вплив морфології поверхні композиційних електролітичних покриттів Co-W-ZrO₂ на функціональні властивості сплавів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2020. № 2(4). С. 110–118. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.14.
25. Nguyen-Tri Ph., Nguyen T. A., Carriere P., Xuan C. N. Nanocomposite Coatings: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *Int. J. Corr.* Vol. 2018. Article ID 4749501. 19 p. doi:10.1155/2018/4749501.
26. Yermolenko I. Y., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Kolupaieva Z. I. Electrochemical behavior of Fe³⁺-WO₄²⁻-Cit³⁻ and Fe³⁺-MoO₄²⁻-WO₄²⁻-Cit³⁻ systems. *Iss. Chem. Chem. Technol.* 2017. No. 2 (98). P. 43–14.
27. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskiy I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys. *Adv. Mater. Sci. Engin.* 2019. Vol. 2019. Article ID 6381291, 13 p. doi:10.1155/2019/6381291.

References (transliterated)

1. Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E. J. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, Vol. 48, no. 6, pp. 491–520, doi:10.3103/S1068375512060038.
2. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Hapon Yu. K., Nenastina T. A. Functional coatings of ternary alloys of cobalt with refractory metals. *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. Vol. 88, no. 12. pp. 1941–1945. doi:10.1134/S1070427215012006X.
3. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved' M. V. *Nanocomposite electrolytic coatings with defined functional properties*. Almaty: Kazakh University, 2020. 180 p.
4. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Prom. Mater. Proc. Appl. Electrochem.*: monogr. Kyiv : KNUTD, 2017. pp. 214–223.
5. Karakurkchi H. V., Ved' M. V., Yermolenko I. Yu., Sakhnenko M. D. *Elektrolitychni pokryttya splavamy zaliza dlya zmitsnennya i zakhystu poverykhnii* [Електролітичні покриття сплавами заліза для зміцнення і захисту поверхні]. Kharkiv: FOP Panov, 2017. 200 p.
6. Tsyntaru N., Dikuser A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobanova Zh., Sidel'nikova S., Belevskii S., Yarpontseva Yu., Bersirova O., Kublanovskii V. Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on cobalt and iron superalloys. *Powder Metall. Met. Ceram.*, 2009, Vol. 48, no. 7-8, pp. 419–428, doi:10.1007/s11106-009-9150-7.
7. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Yermolenko I. Yu. Electroplating and functional properties of Fe-Mo and Fe-Mo-W coatings. *Iss. Chem. Chem. Technol.*, 2014, no. 5-6 (98), pp. 53–60.
8. Sakhnenko M., Ved' M., Karakurkchi H., Yermolenko I., Zybanova S. Resursozaoshchadzhuvalna tekhnolohiya vidnovlennya znoshenykh detaley [Resource-saving

- technology for restoration of worn parts]. *Intehrovani tekhnolohiyi ta resursozberezhennya*. 2013, no 2, pp. 9–13.
9. Grison C., Escande V., Biton J. *Ecocatalysis. A New Integrated Approach to Scientific Ecology*. Elsevier, 2015. 100 p.
 10. Yaponitseva Y. S., Dikusar A. I., Kyblanovskii V.S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2014. no. 50. pp. 330–336, doi:10.3103/S1068375514040139.
 11. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Yermolenko I. Y., Nenastina T. A. Nanostructured Functional Coatings of Iron Family Metals with Refractory Elements. *Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications. NANO 2017*, 2018. vol. 214, pp. 3–34, doi:10.1007/978-3-319-92567-7_1.
 12. Krichevskiy S. V. *Ekologicheskie aspekty noveyshey istorii tehniki (kontseptsiya i metodika analiza v paradigme «zelenogo» razvitiya) : monografiya [Ecological aspects of the recent history of technology (concept and methods of analysis in the paradigm of "green" development): monograph]* Sankt-Peterburg : Svoe izdatelstvo, 2018. 170 p.
 13. Silkin S., Gotelyak A., Tsyntsaru N., Dikusar A. Size effect of microhardness of nanocrystalline Co-Wcoatings produced from citrate and gluconate solutions. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2015. vol. 51, pp. 228–234. doi:10.3103/S106837551503014X.
 14. Silva M., Kola A., Duarte K., Sun S., Podlaha E.J. Plating of NiW, NiMo and NiMoW with and without Fe: Induced codeposition mechanism. *National Association for Surface Finishing Annual Conference and Trade Show, SUR/FIN 2014.*, 2014, Vol. 1, pp. 575–596.
 15. Yermolenko I. Yu., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Sachanova Y. I. Composition, Morphology, and Topography of Galvanic Coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo. *Nanosc. Res. Lett.*, 2017, Vol. 12, pp. 352, doi:10.1186/s11671-017-2128-3.
 16. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Koziar M. Ternary cobalt-molybdenum-zirconium coatings for alternative energies. *Appl. Surf. Sci.*, 2017. vol. 421, Part A, pp. 68–76. doi:10.1016/j.apsusc.2017.01.196.
 17. Tanase S. I., Tanase D. P., Dobromira M., Georgescu V. Morphology, magnetic, magnetoresistance and optical properties of Co-Ni-Mo alloys thin films. *Appl. Surf. Sci.* 2011. vol. 257. is. 24. pp. 10903–10909. doi:10.1016/j.apsusc.2011.07.139.
 18. Sakita A.M.P., Passamani E.C., Kumar H., Cornejo D.R., Fugivara C.S., Noce R.D., Benedetti A.V. Influence of current density on crystalline structure and magnetic properties of electrodeposited Co-rich CoNiW alloys. *Mat. Chem. Phys.* 2013. vol. 141. pp. 576–581. doi:10.1016/j.matchemphys.2013.05.066.
 19. Eliaz N., Gileadi E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals. *Mod. Asp. Electrochem.* 2008. vol. 42. pp. 191–301.
 20. Sun S., Bairachna T., Podlaha E. J. Induced Codeposition Behavior of Electrodeposited NiMoW Alloys. *J. Electrochem. Soc.*, 2013, Vol. 160, no. 10, pp. 434–440.
 21. Nenastina T.A., Ved' M.V., Sakhnenko N.D., Proskurina V.O. Effect of Electrolysis Conditions on the Composition and Microhardness of Ternary Cobalt Alloy Coatings. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2021. vol. 57, no 1. pp. 59–66. doi:10.3103/S1068375521010099.
 22. Dearnly P. A. *Introduction to Surface Engineering*. Cambridge University Press, 2017. 325 p.
 23. Chary V., Reddy K., Kishan G., Niemantsverdriet H., Mestl G. Structure and catalytic properties of molybdenum oxide catalysts supported on zirconia. *J. Catal.* 2004. vol. 226. no 2. pp. 283–291. doi:10.1016/j.jcat.2004.04.028.
 24. Nenastina T., Ved' M., Sakhnenko N., Zyubanova, S. Vplyv morfologiyi poverxni kompozytsijnyx elektrolitychny x pokryviv Co-W-ZrO₂ na funktsionalni vlasty vosti splaviv [Influence of surface morphology of composite electrolytic coatings Co-W-ZrO₂ on functional properties of alloys]. *Visnyk Nacional'nogo tekhnichnogo universytetu "XPI". Seriya: novi rishennya v suchasnyx tekhnologiyax.* 2020. no. 2(4), pp.110–118. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.14.
 25. Nguyen-Tri Ph., Nguyen T. A., Carriere P., Xuan C. N. Nanocomposite Coatings: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *Int. J. Corr. Vol.* 2018. Article ID 4749501. 19 p. doi:10.1155/2018/4749501.
 26. Yermolenko I. Y., Ved' M. V., Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Kolupaieva Z. I. Electrochemical behavior of Fe³⁺-WO₄²⁻-Cit³⁻ and Fe³⁺-MoO₄²⁻-WO₄²⁻-Cit³⁻ systems. *Iss. Chem. Chem. Technol.* 2017. no. 2 (98). pp. 43–14.
 27. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskiy I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys. *Adv. Mater. Sci. Engin.*, 2019. vol. 2019, Article ID 6381291, 13 p. doi:10.1155/2019/6381291.

Відомості про авторів (About authors)

Сакхненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Sakhnenko Mykola – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Каракуркчі Ганна Володимирівна – доктор технічних наук, старший дослідник, начальник науково-методичного відділу, Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

Karakurkchi Hanna – Doctor of Technical Sciences, Senior researcher, Head of the scientific and methodical department, National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1287-3859; anyutikukr@gmail.com.

Ненастіна Тетяна Олександрівна – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Харківський національний автомобільнодорожній університет, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6108-4023; e-mail: nenastina@ukr.net.

Nenastina Tetiana – Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, Department of technology of road-construction materials and chemistry, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6108-4023; e-mail: nenastina@ukr.net.

Єрмоленко Ірина Юрївна – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5496-9621; e-mail: kirilesha72@gmail.com.

Yermolenko Irina – Doctor of Technical Sciences, Senior researcher, Associated Professor, Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5496-9621; e-mail: kirilesha72@gmail.com.

Корогодська Алла Миколаївна – доктор технічних наук, доцент кафедри загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1534-2180; e-mail: all-korogodskaya@ukr.net.

Korohodska Alla – Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1534-2180; e-mail: all-korogodskaya@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сахненко М. Д., Каракуркчі Г. В., Ненастіна Т. О., Єрмоленко І. Ю., Корогодська А. М. Особливості технології КЕП для еко- та енерготехнологій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 3 (9). С. 89-96. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.13.

Please cite this article as:

Sakhnenko M., Karakurkchi H., Nenastina T., Yermolenko I., Korohodska A. Features of CEC technology for eco- and energy technologies. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 3 (9), pp. 89-96, doi:10.20998/2413-4295.2021.03.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сахненко Н. Д., Каракуркчи А. В., Ненастина Т. А., Ермоленко И. Ю., Корогодская А. Н. Особенности технологии КЭП для эко- и энерготехнологий. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 3 (9). С. 89-96. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.13.

АННОТАЦІЯ На основі аналізу особливостей формування КЕП показано, що їх отримання та застосування є одним із світових трендів функціональної гальванотехніки і дозволяють вирішити ряд практичних завдань, зокрема в області еко- та енерготехнологій. Осадження поліфункціональних КЕП кобальта з тугоплавкими металами здійснювали з цитратно-пирофосфатних електролітів в гальваностатическому та імпульсному режимах. Отримані композиційні покриття мають комплекс підвищених механічних та антикорозійних властивостей, каталітичної та фотокаталітичної активності, що обумовлює перспективу застосування отриманих тонкопленочних матеріалів в багатьох галузях промисловості. Показано, що процеси формування таких багатокомпонентних систем є достатньо складними, окремим проблемним питанням, що потребує рішення, є організація технологічного процесу КЕП, який адаптований під виробничі потреби. Розроблено схему організації технологічного процесу на основі модульного підходу, в основу якого покладено результати комплексних досліджень впливу кількісних характеристик робочих електролітів та режимів електролізу на склад та властивості синтезованих покриттів. Узагальнена схема технології КЕП відображає послідовність общеприйнятих в гальванохімічних виробництвах процесів та операцій з можливістю застосування модульного принципу організації гальванічних ділянок та цехів. Варіативність технологічних схем передбачає гнучке управління складом та властивостями покриттів за рахунок зміни часових та енергетичних характеристик електроосадження при несуттєвій корекції кількісного та якісного складу електролітів. Розроблений модульний підхід в організації технологічного процесу може бути використаний як основа для інших електрохімічних технологій синтезу функціональних матеріалів.

Ключевые слова: композиционное электрохимическое покрытие; катодное осаждение; технологический процесс; модульный подход; функциональные свойства

Надійшла (received) 03.09.2021