

Габ Ангеліна Іванівна, доцент, кандидат хімічних наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Шахнін Дмитро Борисович, доцент, кандидат хімічних наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Малишев Віктор Володимирович, професор, доктор технічних наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

Нестеренко Тетяна Миколаївна, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет

Румянцев Володислав Ростиславович, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет

Бережна Ольга Русланівна, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет

КОМПОЗИЦІЙНІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ: ОДЕРЖАННЯ, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ (ОГЛЯД)

Здійснено систематизацію літературних даних щодо одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю, структури та властивостей покриттів нікелю з частинками ультрадисперсних алмазів, фулерену, фторопласту, різних сполук металів. Найбільшого поширення серед композиційних електрохімічних покриттів (КЕП) набули покриття з нікелевою матрицею, які характеризуються високою твердістю та зносостійкістю, а також стійкістю в корозійних середовищах. В останні роки значну увагу приділяють нікелевим покриттям, що містять як дисперсну фазу ультрадисперсних алмазів (наноалмази; УДА), фулерен C_{60} і фторопласт (тефлон). Для осадження КЕП нікель-УДА Зазвичай використовують класичні сірчаноокислі електроліти. УДА позитивно впливають на якість нікель-алмазних покриттів. Коефіцієнти тертя, порівняно з нікелевими покриттями, зменшуються з 0,43 до 0,33, а мікротвердість зростає з 2,45 до 4,31 ГПа. Деталі, покриті КЕП-нікель-УДА, можуть служити в 20 разів довше ніж деталі з нікелевим покриттям. При осадженні алмазних шарів з нікелевим покриттям на різальних інструментах одержують рівномірні КЕП із вмістом частинок від 20000 до 25000 на $см^2$ поверхні. Входження наноалмазних частинок до нікелевої матриці призводить до зменшення розміру зерна, утворення дислокацій у вигляді клубків і сіток уздовж меж зерен. КЕП нікель-УДА має стовпчасту структуру. Збільшення мікротвердості за включенням бору в нікель-алмазні КЕП, можливо, пов'язане з переходом від стовпчастої до ланцюго-розширеної структури. Введення в сірчаноокислий електроліт нікелювання частинок фулерену C_{60} полегшує катодний процес осадження КЕП нікель-фулерен. Одержаний КЕП має шорстку поверхню, мікрорівності якої утворюються за зарощуванням дисперсних частинок металом.

Ключові слова: композиційні покриття, нікель, ультрадисперсний алмаз, фулерен, фторопласт, сполуки металів

Вступ. Створення композиційних електрохімічних покриттів (КЕП) є одним з важливих напрямів сучасної гальванотехніки. Принцип одержання КЕП засновано на тому, що разом з металами з електролітів-суспензій осаджуються дисперсні частинки різних розмірів і видів. Включаючись у покриття, дисперсні частинки істотно покращують їх експлуатаційні властивості (твердість, зносостійкість, корозійну стійкість) і додають їм нових якостей (антифрикційних, магнітних, каталітичних). Завдяки цьому КЕП широко використовують у машинобудуванні, приладобудуванні, за виготовленням медичних інструментів і хімічної апаратури.

Металевою матрицею КЕП зазвичай служать нікель, хром, мідь, залізо, цинк, олово, благородні метали, а також сплави, що осаджують без накладення зовнішнього струму (*Ni-P*, *Ni-B*). Яє дисперсну фазу в електроліті вводять тверді (іноді рідкі) частинки, розміри яких, як правило, не перевищують 3...5 мкм, але в окремих випадках становлять декілька десятків мікрметрів. Це можуть бути оксиди (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SiO_2), бінарні сполуки *d*-елементів (TiN , TiB_2 , ZrC , WC , Cr_2C_3 , MoS_2), порошки металів і неметалів (*Cr*, *Mo*, *W*, *Si*, графіт, алмаз), солі ($BaSO_4$, CaF_2), високомолекулярні сполуки (політетрафторетилен, капролактама) тощо. Останнім часом усе активніше досліджуються композиційні покриття з нанорозмірними частинками. Для інтенсифікації осадження КЕП застосовують різні методи: перемішування електроліту, горизонтальне розташування катода, використання концентрованих суспензій, нестационарні режими електролізу, ультразвук, накладення магнітного поля, попередню хімічну обробку дисперсної фази тощо.

Кінетика утворення КЕП включає такі стадії: доставку дисперсних частинок до катода, утримування їх на поверхні катода та зарощування частинок осаджуванним металом. Дисперсні частинки можуть доставлятися до катода за рахунок перемішування, броунівського руху, під дією гравітаційних сил, а також унаслідок адсорбції на їх поверхні катіонів осаджуваного металу. Частинки, утримуючись на катоді, ініціюють зародкоутворення в місцях контакту з його поверхнею, що стимулює зарощування цих частинок металом. Варіюючи умови електроосадження, можна забезпечувати такий мікрорельєф поверхні, коли на ній утримуються дисперсні частинки певного розміру. Це, в свою чергу, дає змогу формувати покриття із заданими властивостями.

В монографіях [1–2] узагальнено дослідження механізму й кінетики утворення КЕП, а також структури та властивостей покриттів. У огляді [3] систематизовано електроліти для електроосадження покриттів нікелю та його сплавів, композиційних покриттів на основі нікелю. Підкреслено важливість цих покриттів для вирішення питань підвищення зносо- та корозійної стійкості конструкційних матеріалів, перспективність застосування на макро- та нанорівнях. В огляді [4] систематизовано різні за складом електроліти для нанесення гальванічних нікелевих покриттів, розглянуто електроосадження композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю зі вмістом карбідів і боридів тугоплавких металів, наведено дані щодо властивостей цих покриттів. У огляді [5] систематизовано літературні дані щодо електроосадження композиційних електрохімічних покриттів *Ni-P* і *Ni-B*, розглянуто склади електролітів, запропоновано механізм електроосадження та галузі застосування покриттів. Порівняльні характеристики трибологічних властивостей КЕП *Ni-W-P*, *Ni-Cu-P*, *Ni-P-SiC*, *Ni-P-TiO₂*, *Ni-P-WC*, *Ni-P-Al₂O₃* наведено в огляді [6].

Найбільшого поширення серед КЕП набули покриття з нікелевою матрицею. Електроліти нікелювання не завжди мають високу розсіювальну здатність і закривають дефектні місця на покривальних поверхнях [7]. Осадження композиційних покриттів є одним з вирішень цієї проблеми. КЕП на основі нікелю характеризуються високою твердістю та зносостійкістю, стійкістю в корозійних середовищах і гарним зовнішнім виглядом. З нікелем легко співосаджуються дисперсні частинки різної природи. В останні роки значна увага приділяється нікелевим покриттям, що містять як дисперсну фазу ультрадисперсні алмази (наноалмази), фулерен C_{60} і фторопласт (тефлон).

Мета. Виконати систематизацію та надати практичні рекомендації щодо одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю, узагальнити дані щодо їх структури та властивостей з частинками ультрадисперсних алмазів, фулерену, фторопласту, різних сполук металів.

КЕП нікель-ультрадисперсний алмаз

Ультрадисперсні алмази (УДА) одержують методом детонаційного синтезу в примкнутому об'ємі [8]. Частинки УДА мають розміри порядку 4...6 нм, овальну або сферичну форму, де відсутній вихід на поверхню ріприльних кромки, вони мають розвинену поверхневу енергію. Структурно УДА є ядром (~4...5 нм) з кубічного алмазу, вміщеним в оболонку з перехідних рентгеноаморфних структур вуглецю товщиною 0,4...1,0 нм. Поверхневий шар УДА насичений різними, переважно кисневмісними функціональними групами, які визначають високу активність частинок і схильність їх до агрегації (коагуляції) в розчинах електролітів [8]. Тому заздалегідь УДА очищають від поверхневих домішок-коагулянтів при допомогою іонообмінних смол [9] або піддають ультразвуковій обробці електроліт, що містить дисперсію УДА [10].

Для осадження КЕП нікель-УДА, при звичай, використовують класичні сірчанокислі електроліти. Концентрація УДА в електроліті може досягати 30 г/л [12]. Експериментальні дані [8–11] свідчать про позитивний вплив УДА на якість нікель-алмазних покриттів. Автори досліджували фізико-механічні властивості нікелевих КЕП з трьома ультрадисперсними алмазними частинками різними при адсорбційно-структурними характеристиками (табл. 1). Дані характеристики варіюються залежно від умов одержання та хімічної обробки УДА. Композиційні покриття мають велюровий вигляд і колір від світло-сірого (тип 1) до сірого (тип 3). Вміст наноалмазних частинок в осадах коливається від 0,2 до 1,0 мас.% залежно від їх типу та концентрації в електроліті.

Таблиця 1 – Властивості різних типів ультрадисперсних алмазних частинок

Тип частинок	Властивості частинок			Колір частинок
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
1	98,5/1,5	323	0,3...0,6	сірий
2	95/5	287	2,1	темно-сірий
3	75/25	265	4,5	чорний

Примітка: *a* – співвідношення алмазної та неалмазної форм вуглецю, мас.%; *b* – питома поверхня, м²/г; *c* – адсорбція потенціалвизначальних іонів (Н⁺ і ОН⁻), мг-екв/г.

Найбільша кількість частинок включається в нікелеві покриття, які осаджуються з електроліту, що містить УДА типу 3 із концентрацією 20 г/л. Найкращі властивості також мають КЕП з частинками типу 3. Їх коефіцієнти тертя, порівняно з нікелевими покриттями, зменшуються з 0,43 до 0,33, а мікротвердість зростає з 2,45 до 4,31 ГПа. Слід призначити, що дані різних авторів щодо властивостей КЕП нікель-УДА відрізняються. Так, у роботі [10] показано, що при вмістом УДА в електроліті 20 г/л мікротвердість КЕП досягає 5,49 ГПа, а їх зносостійкість збільшується в 5,8 разів. Такі покриття осаджували при катодній густині струму $i_k = 1$ А/дм². Проте при збільшенні i_k до 5 А/дм² мікротвердість і зносостійкість КЕП значно зростають при менших концентраціях УДА (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив вмісту УДА в електроліті на мікротвердість і зносостійкість нікелевих покриттів при різній густині катодного струму [8; 11]

Густина струму, А/дм ²	9,8	14,7	49,0	5,0
Вміст УДА, г/л	Мікротвердість Н, МПа			Зносостійкість, відн. од.
0	2460	2810	3020	1,0
0,5	2950	3060	3240	1,8
1	3140	3250	3470	2,3
2	3520	3730	3710	3,8
5	3630	4000	4630	5,7
10	3870	4580	5720	6,4

Покриття одержують дрібнозернистими, щільними і малопористими. Згідно з даними [9], деталі, покриті КЕП-нікель-УДА, можуть служити в 20 разів довше при деталі з чисто нікелевим покриттям. Нікель-алмазні КЕП пристосовують також для здійснення точкових контактів на дуже малих поверхнях. У цьому разі частинки алмазу, включені в нікелеве покриття, начебто впресовуються на контактній зоні [12]. При осадженні алмазних шарів з нікелевим покриттям на ріприльних інструментах одержують рівномірні КЕП із вмістом частинок від 20000 до 25000 на см² поверхні [13]. Такого ефекту не вдається досягти при використанні алмазного синтетичного мікропорошку (АСМ) як дисперсної фази КЕП. Концентрація 5...100 г/л АСМ призводить до деполяризації, а при великій концентрації – до пасивації катода. В результаті виникають технологічні ускладнення під час осадження нікель-алмазних КЕП, що призводить до нерівномірного розподілу дисперсних частинок в осадах і погіршення характеристик покриття. Зокрема, значення мікротвердості, виміряні в різних точках одного зразка, можуть відрізнятись в 4...5 разів.

У роботах [14–15] показано ефективність модифікування бором нікель-алмазних осадів. Як боровмісне додавання в електроліт вводили декагідрокарбонат натрію $Na_3B_{10}H_{10}$. Мікротвердість КЕП $Ni-B$ -УДА зростає зі збільшенням вмісту бору в покритті. Такий ефект спостерігається при концентрації УДА 5 г/л. При вищій концентрації УДА (10...20 г/л) мікротвердість знижується до 2,7...3,7 ГПа, що ймовірно, пов'язане з деякою нерівномірністю включення наноалмазів у покриття [14].

Фізико-хімічні властивості КЕП зумовлені їх структурою [1, 3–6]. Структурні дослідження останніх років показали, що входження наноалмазних частинок в нікелеву матрицю призводить до зменшення розміру зерна, утворення дислокацій у вигляді клубків і сіток уздовж меж зерен. Металографічне дослідження поперечного перерізу шліфу покриттів виявило, що КЕП нікель-УДА має стовпчасту структуру. Відбувається агрегація достатньо великих частинок у вертикальному напрямі, на поперечному перерізі поверхні осаду нікель-бор-УДА разом з великими частинками спостерігається багато дрібних частинок, які створюють примкнуті ланцюжки, розподілені при всім об'ємі покриття. Збільшення мікротвердості при включенні бору в нікель-алмазні КЕП, можливо, пов'язане зі змінюванням морфології осадів – переходом від стовпчастої до ланцюго-розширеної структури.

В роботі [16] наведено результати досліджень електроосадження композиційних електрохімічних покриттів $Ni-P$ -полікристалічний алмаз, вивчено вплив складу електролітів, умов здійснення електролізу, вмісту фосфору та розміру частинок алмазу на зносостійкі властивості покриттів. Доведено значне підвищення зносостійких властивостей покриттів зі вмістом 9–10% (мас.) алмазу.

КЕП нікель-фулерен C_{60}

Фулерен C_{60} , що має примкнуту оболонку при ненасиченості зв'язків, здатний легко й оборотно приймати електрони. Проте молекули фулеренів є гідрофобними й розчинними лише в неполярних розчинниках. Тому було розроблено метод одержання стійких водних дисперсій C_{60} без домішок органічного розчинника. Для одержання КЕП суспензію фулерену підливають до сірчанокислового електроліту нікелювання [17–18].

Поляризаційні криві осадження нікелю та КЕП $Ni-C_{60}$ показують, що введення в електроліт частинок фулерену полегшує катодний процес. КЕП виділяється при менш негативних значеннях E , чим чистіше нікелеве покриття у всій вивченій області потенціалів [18]. Фулерен C_{60} , будучи акцептором електронів у розчині електроліту, схильний до набуття негативного заряду. Це, в свою чергу, повинно сприяти адсорбції на ньому катіонів нікелю, отже зрештою, дисперсні частинки, рухаючись до катода, вбудовуються в кристалічну ґратку осаду.

На відміну від нікелю, КЕП має шорстку поверхню, мікровиступи якої утворюються під час приросування дисперсних частинок металом. Шорсткість зростає з товщиною покриття. Отже, частинки фулерену, вбудовуючись в осад, визначають його подальше зростання. Аналіз КЕП $Ni-C_{60}$ методом вторинно-іонної мас-спектрометрії показав наявність у них вуглецю і зв'язків $C-H$ [17–18]. Очевидно, в процесі електроосадження частинки фулерену гідруються катодним воднем, який співосаджується.

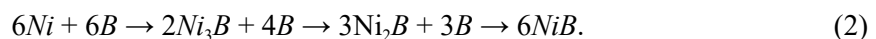
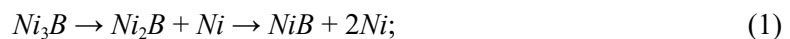
З анодних потенціодинамічних кривих (ПДК) $Ni-C_{60}$ видно, що дисперсні частинки фулерену трохи підвищують потенціал і відповідно зменшують струм активного анодного розчинення композиційних покриттів [17–18]. Потенціали початку пасивації нікелю та $Ni-C_{60}$ є близькими. Характерною особливістю анодної ПДК КЕП $Ni-C_{60}$ є істотне розширення пасивної області. У дальній анодній області потенціалів дисперсні частинки фулерену в покритті чинять найбільший вплив на хід ПДК (потенціали перепасивації покриттів істотно відрізняються). Коефіцієнт тертя ковзання КЕП $Ni-C_{60}$, порівняно з чистими нікелевими осадами, зменшується з 0,34 до 0,10.

КЕП нікель-фторопласт

Композиційні покриття нікель-фторопласт (політетрафторетилен), так само як і інші КЕП на основі нікелю, можна одержувати із сульфатно-хлоридних електролітів [19–20]. Проте формування КЕП даного типу з електроліту Уотса є ускладненим. Молекула політетрафторетилену (ПТФЕ) має форму спіралі, що створює циліндр із щільною зовнішньою оболонкою з електронегативних атомів фтору. Тому частинки ПТФЕ є гідрофобними та схильними до коагуляції в об'ємі сульфатних розчинів при дією Ван-дер-Ваальсових сил притягання. Цю проблему частково можна вирішити з використанням комплексних електролітів, наприклад, сульфаматних або ацетатних, де адсорбційно-сольватний шар на частинках ПТФЕ блокує процес агрегації. Якщо осаження КЕП Ni -ПТФЕ вести із сульфаматного електроліту, то в покриття включається до 20% дисперсної фази, а якщо з сульфатного – то лише 4...8% [21]. У процесі осаження КЕП з ацетатних розчинів у приелектродному шарі відбувається електрокоагуляція частинок фторопласту, зумовлена виникненням дисперсійних сил між частинками. Ця агрегація залежить від рН приелектродного шару, складу електроліту й режиму електролізу. Для підвищення стійкості ПТФЕ в приелектродному шарі при осаженнях КЕП в ацетатні електроліти вводять неіоногенні поверхнево-активні речовини (ПАР). Максимальну агрегативну стійкість частинок ПТФЕ (діаметр 0,3...0,5 мкм), стабілізованих ПАР, досягають при рН ~ 5. Це зумовлено тим, що в електролітах з рН 5 в ацетатних комплексах зв'язано більше 90% нікелю.

Тому для осаження КЕП Ni -фторопласт запропоновано ацетатний електроліт [21] складу (моль/л): $NiCl_2 \cdot 6H_2O - 0,05$; $Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O - 0,6$; $CH_3COOH - 0,2$. Покриття, що одержано з даного електроліту, характеризуються рівномірним розподілом частинок ПТФЕ, вони мають на 25...30% вищу корозійну стійкість, а їх трибологічні характеристики поліпшуються в 2...3 рази порівняно з чистими нікелевими покриттями.

Покриття нікель-фторопласт можуть бути модифікованими бором [22]. Автори проаналізували синергетичний ефект зносостійкості та антифрикційних властивостей КЕП $Ni-B$ -фторопласт. Після термообробки в покриттях виявляються фази твердої компоненти Ni , Ni_3B , Ni_2B і фаза змащувальної компоненти – фторопласт. Після виходу на стаціонарний режим при умов сухого тертя в поверхневих шарах КЕП виявляється фаза $Ni B$. Ймовірні процеси хімічного модифікування можна подати таким чином:



Відповідно до моделі «концентраційної хвилі» для даних покриттів були розраховані швидкість лінійного зносу та коефіцієнти тертя. Одержані результати задовільно узгоджуються з експериментальними (табл. 3).

Таблиця 3 – Фізико-механічні характеристики нікелевмісних покриттів

Покриття	Швидкість лінійного зношування, мкм/ГОД		Коефіцієнт тертя	
	$\langle I_L \rangle^{розр.}$	$\langle I_L \rangle^{експ.}$	$\langle f \rangle^{розр.}$	$\langle f \rangle^{експ.}$
<i>Ni-B</i>	1,100	1,100	0,250	0,250
<i>Ni-B</i> -фторопласт	0,767	0,740	0,218	0,210

Інші КЕП на основі нікелю

Великий інтерес дослідників викликають функціональні властивості композиційних покриттів. Такі властивості КЕП, як твердість, електричний опір і стійкість проти корозійної дії залежать від стану міжкристалітних меж між зернами дисперсної фази і металевою матрицею [23]. Високу корозійну стійкість мають неорієнтовані наноконпозиційні нікелеві покриття з частинками корунду [24]. Частинки Al_2O_3 , входячи в нікелеву матрицю, екранують її поверхню і при рахунок цього гальмують корозію. В роботі [25] досліджено електроосадження композиційних електрохімічних покриттів $Ni-ZrO_2$, $Ni-Al_2O_3$, $Ni-ZrO_2-Al_2O_3$ із сульфатних електролітів на сталеві матеріали, умов проведення електролізу, розміру частинок ZrO_2 та Al_2O_3 на процес електроосадження та властивості покриттів. Оптимальними є наступні умови: рН = 4,7...4,8, вміст частинок ZrO_2 та Al_2O_3 в електроліті – 15...20 г/л, температура розчину – 358 К.

Вплив наночастинок Al_2O_3 на властивості КЕП $Ni-P$ досліджено в [26]. Відмічено, що вміст відновлювального агенту (гіпофосфіту натрію) визначає швидкість осадження покриттів та їх товщину.

Аналогічний ефект спостерігається при використанні SiC як дисперсної фази. У [27; 28] показано, що нікелеві покриття мають дуже високі зносостійкість і твердість, якщо в них входять нанорозмірні частинки. Пристосування імпульсного струму при осадженні КЕП нікель – нанорозмірний SiC дозволяє підвищити швидкість вбудовування дисперсних частинок у покриття і знизити їх внутрішню напругу [29]. При допомогою попередньої обробки SiC в HF , а SiO_2 – в HNO_3 можна значно підвищити входження цих частинок в нікелеве покриття, осаджуване з сульфатного електроліту [30]. Механізм входження SiC в частинки нікелю а, отже, і швидкість вбудовування, при низькій густині струму визначається адсорбцією, а при високій густині струму – транспортом частинок іншої фази [31]. У присутності частинок SiC в електроліті збільшується вихід нікелю при струмом [29], проте, ступінь текстурування КЕП нікель – SiC становить 15...90% від характерної для чистих нікелевих покриттів. Імовірно, що при осадженні КЕП на катоді адсорбуються не лише катіони нікелю та частинки карбиду кремнію, але і водень [32]. Аналіз структури нікель – SiC покриттів свідчить, що об'ємний вміст дисперсної фази при товщиною осаду нерівномірний і змінюється від 37% у нижніх шарах до 14% у верхніх. Проте, пристосування КЕП нікель – SiC підвищує ресурс роботи циліндрів двигунів внутрішнього згорання при допустимим зносом в 2...2,5 рази. Твердість нікель – SiC покриттів зростає при збільшенні температури електроліту [33].

В роботі [34] описано електроосадження КЕП $Ni-P$ та $Ni-P-SiC$ на алюмінієві сплави. Показано, що наявність наночастинок SiC значно підвищує мікротвердість $Ni-P$ матриці.

В роботах [35–36] наведено електрохімічний метод формування КЕП і фольги на основі нікелю, армованих нанорозмірним оксидом алюмінію, з сульфатного електроліту. Запропоновано механізм формування композитів і математичну модель, яка відображає зв'язок між вмістом зміцнювальної фази в КЕП та концентрацією гідрозолу Al_2O_3 в електроліті. При допомозі сканувальної електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу встановлено вплив наночастинок Al_2O_3 на морфологію та розмір зерна композитів. Методом атомної силової мікроскопії визначено топографію КЕП і фольги та доведено формування рівномірно глобулярної структури при введенні Al_2O_3 . Інкorporація нанорозмірних частинок оксиду алюмінію до матриці основного металу сприяє зменшенню розмірів зерен і поліпшенню механічних властивостей композитів: мікротвердість і межа міцності композитів збільшуються в 1,5...2 разів та спостерігається значне зростання межі текучості порівняно з нікелевим покриттям. Корозійна стійкість КЕП зростає внаслідок включення в нього частинок оксиду алюмінію. При глибинним показником корозії $Ni-Al_2O_3$ можна віднести до групи досить стійких матеріалів. Автори відмічають, що захисне покриття $Ni-Al_2O_3$ може бути пристосовано в таких галузях промисловості, як приладо- та машинобудування, виробництво підшипників, при виготовленні металорізального інструменту, прес-форм, а також для відновлення зношених деталей.

Для зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості КЕП $Ni-SiC$ й $Ni-Al_2O_3$ в електроліт може бути додатково введена дисперсна фаза дисульфиду молібдену. При співосажденні нікелю з MoS_2 одержують покриття, які самозмащуються [1; 2]. Вміст дисульфиду молібдену в композиційних покриттях, осаждених з фторборатного електроліту, досягає 35,5 %, але із зростанням рН і температури електроліту ця кількість знижується [37]. Ефект сухого мастила виявляється також при включенні в нікелеві покриття графіту [2] та нітриду бору [38], причому використання останнього є найефективнішим.

КЕП на основі нікелю з дисперсною фазою з оксиду та нітриду кремнію у всіх випадках є зносостійкішими, ніж чисті нікелеві покриття. У процесі осаждення КЕП вищезгаданих типів дисперсні частинки рівномірніше вбудовуються в металеву матрицю при циркуляції електроліту в осередку [39]. Включення в осад дисперсної фази хрому або кремнію зменшує інтенсивність зносу нікелевих покриттів у 2...4 рази. Найбільшу зносостійкість має КЕП $Ni-Si$, що пройшли дифузійний відпал і містять виділення нової твердої фази Ni_3Si . Дані роботи [40] підтверджують, що КЕП $Ni-Si$ мають високу зносостійкість і твердість.

Одержання корозійностійких КЕП $Ni-P-SiO_2$ описано в роботі [41]. Електроліз здійснювали в гіпофосфатному електроліті із вмістом наночастинок SiO_2 7 г/л при рН $4,6 \pm 0,2$ і температури 363 ± 2 К. Швидкість осаждення SiO_2 нанокomпозитних покриттів становить 10...12 мкм/год. Вміст фосфору в покритті – до 8 мас.%, наночастинок SiO_2 – до 2 мас.%. Електрохімічні дослідження підтвердили значне підвищення стійкості $Ni-P$ покриттів з наночастинками SiO_2 в атмосфері, яка містить солі.

Для підвищення зносостійкості нікелевих покриттів пропонують вводити в електроліт ультрадисперсний конденсат складу, мас. %: карбід 2...5; графіт 1...15; некристалічний вуглець 3...50; алмаз (залишок). Автори роботи [42] показали, що електролітичні осади $Ni-P-ZrO_2$ мають підвищену твердість і зносостійкість. У свою чергу, входження дисперсних частинок ZrO_2 в аморфні $Ni-B$ -вольфрамові покриття істотно збільшує їх жароміцність. Вони витримують температуру до 1123 К без окиснення [43].

У роботах [44; 45] запропоновано метод одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі міді та нікелю, модифікованих оксидом цирконію. Покриття осаждували з електролітів-суспензій на основі сульфатних електролітів міднення та нікелювання з додаванням порошку оксиду цирконію як дисперсної фази. Визначено

мікроструктурні та механічні характеристики одержаних композитів $Cu-ZrO_2$ та $Ni-ZrO_2$, а саме мікротвердість та релаксаційну стійкість, які безпосередньо пов'язані з умовами електроосадження. Показано підвищення фізико-механічних властивостей матеріалів зі зростанням вмісту оксиду цирконію в електроліті.

Роботи [46; 47] присвячено нікель-полімерним КЕП. Згідно з даними [46], поліфенілметилен краще захищає нікелеві покриття від корозії, ніж полівінілхлорид при меншому вмісті в електроліті частинок дисперсної фази. Для збільшення корозійної стійкості нікелевих осадів в електроліт вводять ліофільну зольфторовмісну полімерну суспензію. Якщо в сульфатний електроліт нікелювання додати ϵ -капролактат, що інгібує катодну реакцію, то на катоді формується нікель-полімерне покриття [47], яке має вищу електропровідність, ніж чистий нікель.

Висновки. Систематизовано експериментальні дані щодо одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю, наведено дані щодо їх структури та властивостей.

Бібліографічний перелік

1. Антропов Л.И., Лебединский Ю.Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. Киев : Техника, 1986. 200 с.
2. Сайфуллин Р.С. Физикохимия неорганических полимерных и композиционных материалов. Москва : Химия, 1990. 240 с.
3. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 571. P. 183–204.
4. Lotto C.A. Electroless Nickel Plating – A Review. *Silicon*. 2016. Vol. 8, Iss. 2. P. 177–186.
5. Hari Krishnan K., John S., Srinivasan K.N., Praveen J., Ganesan M., Kavimani P.M. An overall aspect of electroless Ni-P depositions – A review article. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006. Vol. 37. P. 1917–1926.
6. Sahoo P., Kalyan Das S. Tribology of electroless nickel coatings. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, Iss. 4. P. 1760–1775.
7. Rudy S.S. Finisher's Think Tank – Aluminum: The Lightweight Industry Heavyweight. *Plating and Surface Finishing*. 2003. Vol. 90, Iss. 9. P. 34–46.
8. Долматов В.Ю. Детонационные нанодиазиды: синтез, строение, свойства и применение. *Успехи химии*. 2007. Т. 76, № 4. С. 375–397.
9. Чухаева С.И., Детков П.Я., Ткаченко А.П., Торопов А.Д. Физико-химические свойства фракций, выделенных из ультрадисперсных алмазов. *Сверхтвердые материалы*. 1998. № 4. С. 29–36.
10. Торопов А.Д., Детков П.Я., Чухаева С.И. Получение и свойства композиционных никелевых покрытий с ультрадисперсными алмазами. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 1999. Т. 7, № 3. С. 14–19.
11. Долматов В.Ю., Буркат Г.К. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза как основа нового класса композиционных металл-алмазных гальванических покрытий. *Сверхтвердые материалы*. 2000. № 1. С. 84–95.
12. Jelinek T.W. Fortschritte in der Galvanotechnik. Eine Auswertung der internationalen Fachliteratur 2003–2004. *Galvanotechnik*. 2005. Bd. 96, N. 1. S. 42–71.
13. Lee E.C., Choi J.W. A study on the mechanism of formation of electrodeposited Ni-diamond coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 148, Iss. 2–3. P. 234–240.
14. Ягодкина Л.М., Логинова И.Д., Савочкина И.Е. О композиционных электрохимических покрытиях никель-алмаз, модифицированных бором. *Журнал прикладной химии*. 1998. Т. 71, № 4. С. 618–620.
15. Новоторцева И.Г., Гаевская Т.В. О свойствах композиционных покрытий на основе никеля. *Журнал прикладной химии*. 1999. Т. 72, № 5. С. 789–791.
16. Reddy V.V.N., Ramanoorthy B., Kesavan Nair P. A study on the wear resistance of electroless Ni-P/Diamond composite coatings. *Wear*. 2000. Vol. 239, Iss. 1. P. 111–116.
17. Целуйкин В.Н., Толстова И.В., Соловьева Н.Д., Гуныкин И.Ф. Свойства композиционных покрытий никель-фуллерен C_{60} . *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2006. Т. 14, № 1. С. 28–31.
18. Целуйкин В.Н., Соловьева Н.Д., Гуныкин И.Ф. Электроосаждение композиционных покрытий никель-фуллерен C_{60} . *Защита металлов*. 2007. Т. 43, № 4. С. 418–420.
19. Саксин Е.В., Шевырев А.А., Шкуранков А.В., Бобровский Л.К., Романюк А.В. Исследование свойств и структуры металлофторопластовых композиционных покрытий. *Журнал прикладной химии*. 1995. Т. 68, № 11. С. 1822–1826.

20. Девятирикова С.В., Хитрин С.В., Фукс С.Л. Исследование маточных растворов производства фторопласта для получения композиционных покрытий. *Журнал прикладной химии*. 2003. Т. 76, № 4. С. 690–692.
21. Тетерина Н.М., Халдеев Г.В. Осаждение никель-тефлоновых композиционных покрытий из сульфатных электролитов. *Защита металлов*. 2000. Т. 36, № 5. С. 515–519.
22. Иванов В.В., Иванов А.В., Балакай В.И., Арзуманов А.В. Анализ синергического эффекта в композиционных электролитических покрытиях никель-бор-фторопласт. *Журнал прикладной химии*. 2006. Т. 79, № 4. С. 619–621.
23. Aust K.T., Palumbo G., Erb U. Intercrystalline defects and some properties of electrodeposited nanocrystalline nickel and its alloys. *Zeitschrift für Metallkunde*. 2003. Bd. 94, N. 10. S. 1066–1072.
24. Szczygiel B., Kolodziej M. Composite Ni/Al₂O₃ coatings and their corrosion resistance. *Electrochimica Acta*. 2005. Vol. 50, Iss. 20. P. 4188–4195.
25. Fan L., Wang Q., Yang P., Chen H., Hong H., Zhang W., Ren J. Preparation of nickel coatings on ZTA particles by electroless plating. *Ceramics International*. 2018. Vol. 44, Iss. 10. P. 11013–11021.
26. Karthikeyan S., Ramamoorthy B. Effect of reducing agent and nano Al₂O₃ particles on the properties of electroless Ni-P coating. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 307. P. 654–660.
27. Maurin G., Lavanant A. Electrodeposition of nickel/silicon carbide composite coatings on a rotating disc electrode. *J. Applied Electrochem.* 1995. Vol. 25. P. 1113–1121.
28. Staia M.H., Conzono A., Cruz M.R. Wear behaviour of Silicon Carbide/Electroless Nickel Composite Coatings at High Temperature. *Surface Engineering*. 2002. Vol. 18, Iss. 4. P. 265–269.
29. Burzynska L., Rudnik E., Koza J. Electrodeposition and heat treatment of nickel/silicon carbide composites. *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202, Iss. 12. P. 2545–2556.
30. Grosjean A., Rezrazi M., Bercot P. Some morphological characteristics of the incorporation of silicon carbide (SiC) particles into electroless nickel deposits. *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 130, Iss. 2–3. P. 252–256.
31. Benea L., Bonora P.L., Borello A. Preparation and investigation of nanostructured SiC-nickel layers by electrodeposition. *Solid State Ionics*. 2002. Vol. 151, Iss. 1–4. P. 89–95.
32. Gawne D.T., Ma U. Structure and wear of electroless nickel coatings. *Materials Science and Technology*. 1987. Vol. 3, Iss. 3. P. 228–238.
33. Sahoo P., Das S.K. Tribology of electroless nickel coatings – A review. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, Iss. 4. P. 1760–1775.
34. Franco M., Sha W., Malinov S., Rajendran R. Phase composition, microstructure and microhardness of electroless nickel composite coating co-deposited with SiC on cast aluminium LM24 alloy substrate. *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 235. P. 755–763.
35. Sakhnenko N.D., Ovcharenko O.A., Ved M.V. Electrochemical synthesis of nickel-based composite materials modified with nanosized aluminium oxide. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. Vol. 88. P. 267–271.
36. Сахненко М.Д., Ведь М.В., Овчаренко О.О. Фізико-механічні властивості композиційних електрохімічних покриттів і фольг на основі нікелю, армованих Al₂O₃. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2017. Т. 53, № 3. С. 76–85.
37. Bapu R.G.N.K. Characteristics of Ni-BN Electrocomposites. *Plating & Surface Finishing*. 1995. Vol. 93. P. 70–73.
38. Pushpavanam M., Natarajan S. R. Nickel-boron nitride electrocomposites. *Metal Finishing*. 1995. Vol. 93, Iss. 6. P. 97–99.
39. Jelinek T.W. Fortschritte in der Galvanotechnik. Eine Auswertung der internationalen Fachliteratur 2001–2002. *Galvanotechnik*. 2003. Bd. 94, No. 1. S. 46–74.
40. Popczyk M., Budniok A., Lagiewka E. Structure and corrosion resistance of nickel coatings containing tungsten and silicon powders. *Materials Characterisation*. 2007. Vol. 58, Iss. 4. P. 371–375.
41. Rabizadeh T., Allahkaram S.R. Corrosion resistance enhancement of Ni-P electroless coatings by incorporation of nano-SiO₂ particles. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, Iss. 1. P. 133–138.
42. Wielage B., Podlesak H., Steinhäuser S., Nickelmann D. Galvanische Nickel- und Nickeldispersions-schichten: Vergleichende elektronenmikroskopische Untersuchungen. *Metalloberfläche*. 1998. Bd. 52, No. 5. S. 386–389.
43. Liqun Z., Qunpeng Z., Jianhua L. Amorphous nickel-tungsten-boron composite electrodeposits with zirconium oxide particles. *Metal Finishing*. 2001. Vol. 99, No. 7. P. 28–30.
44. Сахненко М.Д., Ведь М.В., Овчаренко О.О., Проскуріна В.О., Ненастіна Т.О. Властивості композиційних електрохімічних покриттів, модифікованих діоксидом цирконію. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2018. Т. 18(1294). С. 80–84.

45. Sakhnenko M.D., Ved M.V., Ovcharenko O.O. Physicochemical properties of composite electrochemical coatings and foils based on nickel and reinforced with Al_2O_3 . *Materials Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 3. P. 374–384.

46. Экилик Г.П., Стариченок О.С. Ингибирующие композиционные покрытия на основе никеля. *Защита металлов*. 1990. Т. 26, № 6. С. 1016–1019.

47. Скибина Л.М., Кузнецов В.В., Сухоленцев Е.А. Влияние концентрации ϵ -капролактама на электроосаждение никель-полимерных покрытий. *Прищита металлов*. 2001. Т. 37. № 2. С. 182–185.

References

1. Antropov L.I., Lebedinskiy Yu.N. Kompozitsionnyye elektrohimicheskiye pokrytiya i materialy [Composite electrochemical coatings and materials]. Kiev : Tekhnika, 1986. 200 p.

2. Sayfullin R.S. Fizikohimiya neorganicheskikh polimernykh i kompozitsionnykh materialov [Physicochemistry of inorganic polymer and composite materials] Moscow : Khimiya, 1990. 240 p.

3. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 571. P. 183–204.

4. Lotto C.A. Electroless Nickel Plating – A Review. *Silicon*. 2016. Vol. 8, Iss. 2. P. 177–186.

5. Hari Krishnan K., John S., Srinivasan K.N., Praveen J., Ganesan M., Kavimani P. M. An overall aspect of electroless Ni-P depositions – A review article. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006. Vol. 37. P. 1917–1926.

6. Sahoo P., Kylyandas S. Tribology of electroless nickel coatings. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, Iss. 4. P. 1760–1775.

7. Rudy S.S. Finisher's Think Tank – Aluminum: The Lightweight Industry Heavyweight. *Plating and Surface Finishing*. 2003. Vol. 90, Iss. 9. P. 34–46.

8. Dolmatov V.Yu. Detonatsionnye nanoalmazy: sintez, stroenie, svoystva i primeneniye [Detonation nanodiamonds: synthesis, structure, properties, and application]. *Uspekhi khimii*. 2007. Vol. 76, No. 4. P. 375–397.

9. Chuhayeva S.I., Detkov P.Ya., Tkachenko A.P., Toropov A.D. Fiziko-himicheskiye svoystva fraktsiy, vydelennykh iz ultra-dispersnykhalmazov [Physicochemical properties of fractions isolated from ultrafine diamonds]. *Sverhtverdyye materialy*. 1998. No. 4. P. 29–36.

10. Toropov A.D., Detkov P.Ya., Chuhayeva S.I. Polucheniye i svoystva kompozitsionnykh nikelovykh pokrytiy s ultradispersnyimialmazami [Obtaining and properties of composite nickel coatings with ultradispersed diamonds]. *Galvanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1999. T. 7, No. 3. P. 14–19.

11. Dolmatov V.Yu., Burkat G.K. Ultradispersnyye almazy detonatsionnogo sinteza kak osnova novogo klassa kompozitsionnykh metall-almaznykh galvanicheskikh pokrytiy [Ultrafine Diamonds of Detonation Synthesis as the Basis for a New Class of Composite Metal-Diamond Electroplated Coatings]. *Sverhtverdyye materialy*. 2000. No 1. P. 84–95.

12. Jelinek T.W. Fortschritte in der Galvanotechnik. Eine Auswertung der internationalen Fachliteratur 2003–2004. *Galvanotechnik*. 2005. Bd. 96, No. 1. S. 42–71.

13. Lee E.C., Choi J.W. A study on the mechanism of formation of electrodeposited Ni-diamond coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 148, Iss. 2–3. P. 234–240.

14. Yagodkina L.M., Loginova I.D., Savochkina I.Ye. O kompozitsionnykh elektrohimicheskikh pokrytyakh nikel-almaz, modifitsirovannykh borom [About composite electrochemical nickel-diamond coatings modified with boron]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 1998. Vol. 71, No. 4. P. 618–620.

15. Novotortseva I.G., Gayevskaya T.V. O svoystvakh kompozitsionnykh pokrytiy na osnove nikelya [About the properties of nickel-based composite coatings]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 1999. Vol. 72. No. 5. P. 789–791.

16. Reddy V.V.N., Ramanoorthy B., Kesavan P. Nair. A study on the wear resistance of electroless Ni-P/Diamond composite coatings. *Wear*. 2000. Vol. 239. Iss. 1. P. 111–116.

17. Tseluykin V.N., Tolstova I.V., Solovyeva N.D., Gunkin I.F. Svoystva kompozitsionnykh pokrytiy nikel-fulleren C_{60} [Properties of composite nickel-fullerene C_{60} coatings]. *Galvanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2006. Vol. 14, No. 1. P. 28–31.

18. Tseluykin V.N., Solovyeva N.D., Gunkin I.F. Elektroosazhdeniye kompozitsionnykh pokrytiy nikel-fulleren C_{60} . *Zashchita metallov*. 2007. Vol. 43. No. 4. P. 418–420.

19. Saksin Ye.V., Shevryev A.A., Shkurankov A.V., Bobrovskiy L.K., Romanyuk A.V. Issledovaniye svoystv i struktury metalloftoroplastovykh kompozitsionnykh pokrytiy [Study of the properties and structure of metal-fluoroplast composite coatings]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 1995. Vol. 68. No. 11. P. 1822–1826.

20. Devyatirikova S.V., Hitrin S.L., Fuks S.L. Issledovaniye matochnykh rastvorov proizvodstva fluoroplasta dlya polucheniya kompozitsionnykh pokrytiy [Study of mother liquors of fluoroplast production for obtaining composite coatings]. *Zhurnal prikladnoy himii*. 2003. Vol. 76. No. 4. P. 690–692.
21. Teterina N.M., Haldeyev G.V. Osazhdeniye nikel-teflonovykh kompozitsionnykh pokrytiy iz sulfatnykh elektrolitov [Deposition of nickel-teflon composite coatings from sulfate electrolytes]. *Zashchita metallov*. 2000. Vol. 36. No. 5. P. 515–519.
22. Ivanov V.V., Ivanov, A.V., Balakay V.I., Arzumanov A.V. Analiz sinergicheskogo effekta v kompozitsionnykh elektroliticheskikh pokrytyakh nikel-bor-floroplast [Analysis of the synergistic effect in composite electrolytic coatings nickel-boron-fluoroplast]. *Zhurnal prikladnoy himii*. 2006. Vol. 79. No. 4. P. 619–621.
23. Aust K.T., Palumbo G., Erb U. Intercrystalline defects and some properties of electrodeposited nanocrystalline nickel and its alloys. *Zeitschrift fur Metallkunde*. 2003. Bd. 94. No. 10. S. 1066–1072.
24. Szczygiel B., Kolodziej M. Composite Ni/Al₂O₃ coatings and their corrosion resistance. *Electrochimica Acta*. 2005. Vol. 50. Iss. 20. P. 4188–4195.
25. Fan L., Wang Q., Yang P., Chen H., Hong H., Zhang W., Ren J. Preparation of nickel coatings on ZTA particles by electroless plating. *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. Iss.10. P. 11013–11021.
26. Karthikeyan S., Ramamoorthy B. Effect of reducing agent and nano Al₂O₃ particles on the properties of electroless Ni-P coating. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 307. P. 654–660.
27. Maurin G., Lavanant A. Electrodeposition of nickel/silicon carbide composite coatings on a rotating disc electrode. *J. Applied Electrochem*. 1995. Vol. 25. P. 1113–1121.
28. Staia M.H., Conzono A., Cruz M.R. Wear behaviour of Silicon Carbide/Electroless Nickel Composite Coatings at High Temperature. *Surface Engineering*. 2002. Vol. 18. Iss. 4. P. 265–269.
29. Burzynska L., Rudnik E., Koza J. Electrodeposition and heat treatment of nickel/silicon carbide composites. *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202. Iss. 12. P. 2545–2556.
30. Grosjean A., Rezrazi M., Bercot P. Some morphological characteristics of the incorporation of silicon carbide (SiC) particles into electroless nickel deposits. *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 130. Iss. 2–3. P. 252–256.
31. Benea L., Bonora P. L., Borello A. Preparation and investigation of nanostructured SiC-nickel layers by electrodeposition. *Solid State Ionics*. 2002. Vol. 151, Iss. 1–4. P. 89–95.
32. Gawne D.T., Ma U. Structure and wear of electroless nickel coatings. *Materials Science and Technology*. 1987. Vol. 3. Iss. 3. P. 228–238.
33. Sahoo P., Das S.K. Tribology of electroless nickel coatings – A review. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. Iss. 4. P. 1760–1775.
34. Franco M., Sha W., Malinov S., Rajendran R. Phase composition, microstructure and microhardness of electroless nickel composite coating co-deposited with SiC on cast aluminium LM24 alloy substrate. *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 235. P. 755–763.
35. Sakhnenko N.D., Ovcharenko O.A., Ved M.V. Electrochemical synthesis of nickel-based composite materials modified with nanosized aluminium oxide. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. Vol. 88. P. 267–271.
36. Sakhnenko M.D., Ved M.V., Ovcharenko O.O. Fyzyko-mekhanichni vlastyivosti kompozytsiinykh elektrokhimichnykh pokryviv i folh na osnovi nikeliu, armovanykh Al₂O₃ [Physico-mechanical properties of composite electrochemical coatings and foils based on Nickel, reinforced by Al₂O₃]. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2017. Vol. 53. No. 3. P. 76–85.
37. Bapu R.G.N.K. Characteristics of Ni-BN Electrocomposites. *Plating & Surface Finishing*. 1995. Vol. 93. P. 70–73.
38. Pushpavanam M., Natarajan S.R. Nickel-boron nitride electrocomposites. *Metal Finishing*. 1995. Vol. 93, Iss. 6. P. 97–99.
39. Jelinek T.W. Fortschritte in der Galvanotechnik. Eine Auswertung der internationalen Fachliteratur 2001–2002. *Galvanotechnik*. 2003. Bd. 94. No. 1. S. 46–74.
40. Popczyk M., Budniok A., Lagiewka E. Structure and corrosion resistance of nickel coatings containing tungsten and silicon powders. *Materials Characterisation*. 2007. Vol. 58, Iss. 4. P. 371–375.
41. Rabizadeh T., Allahkaram S.R. Corrosion resistance enhancement of Ni-P electroless coatings by incorporation of nano-SiO₂ particles. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. Iss. 1. P. 133–138.
42. Wielage B., Podlesak H., Steinhäuser S., Nickelmann D. Galvanische Nickel- und Nickeldispersions-schichten: Vergleichende elektronenmikroskopische Untersuchungen. *Metalloberfläche*. 1998. Bd. 52. No. 5. S. 386–389.
43. Liqun Z., Qunpeng Z., Jianhua L. Amorphous nickel-tungsten-boron composite electrodeposits with zirconium oxide particles. *Metal Finishing*. 2001. Vol. 99. No. 7. P. 28–30.

44. Sakhnenko M.D., Ved M.V., Ovcharenko O.O., Proskurina V.O., Nenastina T.O. Vlastyvoli kompozytsiinykh elektrokhimichnykh pokryttiv, modyfikovanykh dyoksydom tsyrkoniiu [Properties of composite electrochemical coatings modified with zirconium dioxide]. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI» Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia*. 2018. Vol. 18(1294). P. 80–84.

45. Sakhnenko M.D., Ved M.V., Ovcharenko O.O. Physicochemical properties of composite electrochemical coatings and foils based on nickel and reinforced with Al_2O_3 . *Materials Science*. 2017. Vol. 53. Iss. 3. P. 374–384.

46. Ekilik G.P., Starichenok O.S. Ingibiruyushchiye kompozitsionnyye pokrytiya na osnove nikelya [Nickel-based Inhibitory Composite Coatings]. *Zashchita metallov*. 1990. Vol. 26. No. 6. P. 1016–1019.

47. Skibina L.M., Kuznetsov V.V., Suholentsev Ye.A. Vliyaniye kontsentratsii Σ -kaprolaktama na elektroosazhdeniye nikel-polimernykh pokrytiy [Effect of the concentration of Σ -caprolactam on the electrodeposition of nickel-polymer coatings]. *Zashchita metallov*. 2001. Vol. 37. No. 2. P. 182–185.

Gab Angelina, Associate Professor, Candidate of Chemical Sciences, Open International University of Human Development “Ukraine”

Shakhnin Dmytro, Associate Professor, Candidate of Chemical Sciences, Open International University of Human Development “Ukraine”

Malyshev Victor, Professor, Doctor of Technical Sciences, Open International University of Human Development “Ukraine”

Nesterenko Tetiana, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhia national university

Rumyantsev Volodyslav, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhia national university

Berezhna Olga, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhia national university

COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS BASED ON NICKEL: OBTAINING, STRUCTURE, PROPERTIES (REVIEW)

Nickel matrix coatings have become the most widespread among composite electrochemical coatings (CECs). Nickel-based CECs are characterized by high hardness and wear resistance, resistance to corrosion. Fine particles of different nature are easily codeposited with nickel. Considerable attention is paid to nickel coatings containing as a dispersed phase ultrafine diamonds (UFD), fullerene C_{60} and fluoroplastic (Teflon). Classical sulfuric acid electrolytes are used for the deposition of nickel-UFD CECs. Experimental data indicate a positive effect of UDA on the quality of nickel-diamond coatings. The coefficients of friction decrease from 0.43 to 0.33, and the microhardness increases from 2.45 to 4.31 GPa. Parts coated with CEC-nickel-UFD can last 20 times longer than parts with nickel coating. When depositing diamond layers with a nickel coating on cutting tools, uniform CECs with a particle content of from 20.000 to 25.000 per cm^2 of surface are obtained. Structural studies have shown that the entry of nanodiamond particles into the nickel matrix leads to a decrease in grain size, the formation of dislocations in the form of balls and grids along the grain boundaries. Metallographic study of the cross section of the coating section revealed that the CEC of nickel-UFD has a columnar structure. The increase in microhardness with the inclusion of boron in the nickel-diamond CEC may be associated with a change in the morphology of deposits – the transition from columnar to chain-expanded structure. The polarization curves of the deposition of nickel and CEC nickel – C_{60} show that the introduction of fullerene particles into the electrolyte facilitates the cathode process. CEC has a rough surface, the microprojections of which are formed during the overgrowth of dispersed particles of metal.

Keywords: composite coatings, nickel, superdispersed diamond, fullerene, teflon, connections of metals

Стаття надійшла: 07.10.2021 р.