

Габ Ангеліна Іванівна, доцент, кандидат хімічних наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», ORCID: 0000-0003-3162-7159

Малишев Віктор Володимирович, професор, доктор технічних наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», ORCID: 0000-0003-2756-3236

Шахнін Дмитро Борисович, доцент, кандидат хімічних наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», ORCID: 0000-0001-9657-8621

Куріс Юрій Володимирович, провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАНУ, ORCID: 0000-0001-7169-9187

Кириченко Олексій Геннадієвич, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3032-1919

Воденнікова Оксана Сергіївна, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-0496-5435

Воляр Роман Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3182-2536

КОМПОЗИЦІЙНІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ХРОМУ, МІДІ, ЦИНКУ, ЗАЛІЗА, ОЛОВА, БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ: ОДЕРЖАННЯ, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ (ОГЛЯД)

Здійснено систематизацію літературних даних щодо одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі хрому, міді, цинку, олова, благородних металів, структури та властивостей покриттів хрому з частинками наповнювачів різної природи. Одним із способів поліпшення фізико-механічних властивостей є одержання комплексних електрохімічних покриттів (КЕП). Вихід за струмом хрому в присутності ультрадисперсних алмазів (УДА) знижується як у стандартному, так і в саморегульованому електролітах хромування. Композиційні покриття хром-графіт можуть бути використані у виробках, які працюють за умов сухого тертя. Зносостійкість і твердість КЕП на основі хрому значно підвищується за введення в стандартний електроліт хромування дисперсних частинок кремнію або діоксиду титану. Основне зазначення КЕП на основі міді – надання металевим поверхням зносостійкості, жароміцності й антифрикційних властивостей. Для одержання КЕП на основі міді найчастіше використовують сульфатні електроліти. Введення в електроліт УДА не змінює природу та механізм електродного процесу. Мікротвердість покриттів, осаджених з електроліту з вмістом УДА зростає майже в півтора разів порівняно з осадами, одержаними з базового електроліту. Електролітичні залізні покриття використовують для відновлення деталей машин і механізмів. Композиційні покриття на основі цинку застосовують для захисту сталевих поверхонь від корозії з поліпшенням їх фізико-механічних властивостей. КЕП на основі срібла з електропровідними частинками осаджують на електричні контакти для поліпшення провідності.

Ключові слова: композиційні покриття, хром, ультрадисперсний алмаз, графіт, мідь, цинк, олово, залізо, благородні метали, сполуки металів.

Вступ. Електролітичні хромові покриття використовують для додання декоративного виду виробів, підвищення твердості та зносостійкості металевих поверхонь, а також для відновлення зношених деталей. В останніх двох випадках, як правило, доводиться наносити товсті шари хрому. Проте це пов'язано зі складнощами як економічного (висока вартість), так і технологічного (низький вихід за хрому струмом) характеру. Одним із способів зниження товщини хромових покриттів за поліпшення їх фізико-механічних властивостей є одержання композиційних електрохімічних покриттів (КЕП). Технології одержання

композиційних покриттів на основі хрому можуть бути використані в машинобудуванні, інструментальній галузі за виготовлення та експлуатації деталей, що працюють в умовах великих навантажень, за тертя, абразивному та корозійному впливі та кавітації [1–3].

Останнім часом увагу науковців усього світу завертають наноструктури. Оскільки поведінка окремих атомів та електронів наноструктур стає важливою, то на передній план виступають цікаві ефекти, що здатні фундаментально змінити властивості нанорозмірних порошкових матеріалів. Отже, наявність твердих нанорозмірних частинок у металевій матриці покриттів може значно покращити їх механічні та хімічні властивості, розширюючи можливості для їх використання [4; 5].

Заклади можливого використання КЕП з додаванням наноструктур:

– двигун і привід у комбінації з відповідними покриттями можуть забезпечити таку саму функціональну поведінку, як і за використання мінеральних мастил, що, в свою чергу, може мінімізувати викиди в навколишнє середовище та зменшити споживання пального;

– тверді, надійні та стійкі композиційні покриття можна використовувати в допоміжних галузях індустрії елементів з'єднання (пластикові та скляні шаблони, підшипники, заводи, прес-форми);

– покривання деталей машин текстильної промисловості – комерційно загальноприйнята практика, особливо, коли йдеться про прядильні операції, а використання зносостійких твердих частинок у композиційних покриттях значно збільшить тривалість використання окремих деталей машин.

Мета. Виконати систематизацію та надати практичні рекомендації щодо одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю, міді, заліза, цинку, олова, благородних металів, узагальнити дані щодо їх структури та властивостей з частинками наповнювачів різної природи.

Головна частина. КЕП на основі хрому КЕП хрому- ультрадисперсний алмаз. Значну кількість публікацій [6–11] присвячено спільному осадженню хрому з частинками ультрадисперсних алмазів (УДА). Згідно з даними роботи [7], вихід хрому за струмом у присутності УДА знижується як у стандартному, так і в саморегульованому електролітах хромування. До складу осадів входить лише 0,01...0,03% дисперсних частинок. Ймовірно, це пов'язано з утворенням за хромування з електролітів на основі сполук $Cr(VI)$ на катодній поверхні фазової плівки колоїдного типу, через яку ускладнено проникнення частинок. Мікротвердість КЕП Cr -УДА зменшується порівняно з чистими хромовими покриттями з 10,03 ГПа до 9,06 ГПа (стандартний електроліт) і з 9,68 ГПа до 9,50 ГПа (саморегульований електроліт) [7]. Проте, подальші дослідження свідчать про зворотне. В роботі [6] показано, що за одержання КЕП Cr -УДА з електроліту складу, г/л: $CrO_3 - 250; H_2SO_4 - 2.5; УДА - 2 \dots 20$ мікротвердість покриттів значно зростає, а коефіцієнти тертя та зношування зменшуються (табл. 1). Вміст УДА в покритті становить 0,3...1,0 мас. %. За результатами експериментів, виконаних у роботі [9], виявлено, що найвищу зносостійкість хромових КЕП досягають за вмістом УДА в електролітах на основі $Cr(VI)$ 15...20 г/л. Підвищення концентрації УДА до 50 г/л не позначається на цьому показникові. Покриття, одержане без додавання УДА, за 20 годин стирання втрачає 15% від своєї маси, а КЕП хром-УДА лише 2...3% маси.

Порівняльні дослідження [8] з осадження хромових покриттів з частинками УДА показали, що найкращу зносостійкість мають КЕП, одержані за температури 333 К з електроліту, що містить метансульфонову кислоту. Втрата маси зразків хром-УДА після стирання на абразивному диску (3000 обертів) становить 0,83...0,85 мг, тоді як покриття без УДА втрачають у масі 1,10...1,65 мг, залежно від складу електроліту. Найвищої мікротвердості осади хром-алмазні КЕП досягають за введення у стандартний електроліт хромування сумішевого додавання УДА і алмазного порошку АСМ.

Таблиця 1 – Вплив вмісту ультрадисперсних алмазів у електроліті на механічні характеристики покриттів

Покриття	Вміст УДА в електроліті, г/л	Знос покриттів, мкм	Коефіцієнт тертя	Мікротвердість, ГПа
<i>Cr</i>	0	20,2	0,15	5,98
<i>Cr-УДА</i>	2	8,9	0,14	6,96
	4	4,8	0,10	9,02
	10	2,9	0,09	14,51
	16	2,0	0,09	20,59
	20	5,3	0,13	18,63

Автори робіт [10,11] досліджували структуру та фізико-механічні властивості КЕП хром-УДА, осаджених з електролітів на основі *Cr(III)*. За введення частинок УДА в електроліт хромування в концентрації 20 г/л мікротвердість покриттів зростає від 9,81 ГПа (чистий хром) до 13,39 ГПа (КЕП). Збільшення вмісту УДА в розчині до 30 г/л призводить до зниження мікротвердості до 9,22 ГПа, що, ймовірно, пов'язано зі зростанням крихкості покриттів за включення більшої кількості дисперсних частинок. Оптимальний вміст дисперсної фази в КЕП *Cr-УДА*, коли спостерігають максимум мікротвердості та мінімум мікрокрихкості осадів [10], становить 10,5 об.% (5,6 мас.%) УДА. Оптимальна концентрація УДА в електролітах на основі *Cr(III)* становить 17 г/л.

З даних щодо структури хромових покриттів і КЕП *Cr-УДА* в осаді хрому чітко видно широкі відкриті тріщини, тоді як у КЕП спостерігають вузькі наскрізні тріщини [10]. Для покриттів *Cr-УДА* характерно включення великого числа дисперсних частинок різного розміру, які рівномірно розподілені в металевій матриці. Відомо [12], що частинки УДА схильні до утворення агрегатів мікронних розмірів. Згідно з даними [10], середній радіус алмазних агрегатів в електролітах хромування становить 4530 нм, а в композиційних покриттях – лише 204 нм. Запускають [10], що в приелектродному шарі відбувається дезагрегація частинок УДА і включення в КЕП дрібніших утворень.

Для зниження собівартості хром-алмазних покриттів у роботі [13] пропонують як дисперсну фазу використовувати первинний продукт одержання наноалмазів – алмазну шихту (АШ), яка може містити до 75 % УДА. Введення додавання АШ в стандартний електроліт хромування практично не впливає на здатність до поляризації і перенапруження виділення водню. Вихід хрому за струмом у присутності АШ зростає незначно (до 3 %). Мікротвердість КЕП з дисперсною фазою АШ зростає на 15...20 %, а зносостійкість – у 2...2,5 разів порівняно з чистими хромовими покриттями. Оптимальна концентрація АШ в електроліті становить 5 г/л. Подальше підвищення концентрації мало впливає на мікротвердість і призводить до збільшення зносу покриттів (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив добавки алмазної шихти на зносостійкість хромових покриттів, одержаних за різних режимах електролізу

Вміст АШ в електроліті, г/л	Зменшення маси покриття (мас.%) за температури, К					
	318±1		323±1		55±1	
	Густина струму i_k , А/дм ²					
	40	50	40	50	40	50
0	3,5	5,40	4,8	5,0	6,2	4,3
1,0	3,2	3,25	3,1	3,5	3,1	2,0
2,5	2,4	2,55	2,6	2,0	3,0	2,4
5,0	2,4	2,80	2,2	1,9	2,4	2,6

В роботі [14] наведено відомі способи одержання КЕП Cr-УДА, зокрема, спосіб одержання композиційних покриттів на основі хрому, що включає електролітичне осадження за присутності колоїдних неабразивних частинок алмазу розміром 0,001...0,01 мкм у кількості 5...40 г/л. Осадження вели з електроліту наступного складу, г/л: CrO_3 – 250; K_3SiF_6 – 15; $BaSO_4$ – 6; H_2SO_4 – 0,5...1,0. Електроліт також містив неабразивний колоїдний порошок алмазу. За реалізації способу спостерігають властивість дисперсних частинок алмазного порошку активно поєднуватися аж до утворення великих агрегатів розміром $10^2...10^3$ нм, що істотно погіршує умови електроосадження та властивості покриттів. У результаті виникає необхідність додаткових операцій для заготування електроліту та підтримки дисперсних частинок у зваженому стані. Щоб зруйнувати агрегатні утворення неабразивних частинок алмазу і поліпшити газовиділення, конвекцію електроліту та протікання струму, доводилося виконувати диспергування колоїдного порошку алмазу у воді або електроліті. Це ускладнює і здорожує спосіб одержання покриттів та не забезпечує відтворюваності результатів за промислової експлуатації. Зазначених недоліків позбавлено спосіб одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі хрому й ультрадисперсних частинок алмазу. Спосіб притаманна підвищена стабільність у роботі, однорідність розподілу алмазних частинок в електроліті й у покритті. Він включає підготовку алмазовмісної суспензії, введення її в електроліт та електрохімічне осадження хрому й алмазів на деталь, що є катодом. Даний спосіб відрізняється тим, що ультрадисперсні частинки алмазу попередньо обробляють сильним окисником, що забезпечує адсорбційну активність УДА в межах 0,1...10 мг-екв/м. Ультрадисперсні алмази вводять в електроліт у вигляді водної суспензії за змішування в масовій пропорції алмазу до хромового ангідриду і тривалентного хрому відповідно: УДА: CrO_3 : Cr^{3+} = 1: (7,5...200): (0,15...20). Швидкість осадження алмазних частинок підтримують у межах 0,001...0,15 г/м²хв. Характерними ознаками способу є:

- попередня обробка ультрадисперсних алмазів сильними окисниками для додання частинкам адсорбційної активності 0,1...10 мг-екв/м;
- пропорційне співвідношення між компонентами електроліту УДА: CrO_3 : Cr^{3+} = 1: (7,5...200): (0,15...10);
- осадження хромового покриття за швидкості осадження алмазних частинок становить 0,001...0,15 г/м²хв.

В роботі [15] розроблено спосіб одержання якісного електрохімічного хромового покриття з використанням нового типу алмазовмісного додавання, що має суттєві переваги перед традиційно використовуваними детонаційними наноалмазами (ДНА), застосовуваними у вигляді водних суспензій. Розроблено і використано порошкоподібну композиційне алмазовмісне додавання, яке містить ДНА, одержані підривом зарядів з тетрилу, лужного ($NaHCO_3$) і кислотного (лимонна кислота) агентів. Склад містить 62,5% мас. ДНА. Автори роботи [15] використовували стандартний електроліт хромування: CrO_3 – 250 г/л, H_2SO_4 – 2,5 г/л, ДНА – 0,1...5 г/л, традиційні методології та алгоритм проведення експерименту. Рамки дослідження обмежували створенням і застосуванням конкретного, зручного в роботі та заготуванні складу з ДНА. Модифікований ДНА (МДНА) можна додавати у стандартний електроліт хромування безпосередньо або у вигляді свіжоприготованої водної суспензії. Досягнуто суттєве збільшення виходу хрому за струмом на ~ 5%. Оригінальність способу полягає в поєднанні в алмазовмісному складі «інертних» наноалмазів та активних лужного й кислотного компонентів, що спрацьовують лише за введення у водне середовище і забезпечують необхідну дезагрегацію та стійкість суспензій ДНА. Досягнуто збільшення мікротвердості

зносостійкого хромового покриття у 1,3 разів (до 9,6 ГПа) і твердого хромового покриття у 1,6 разів (до 13,6 ГПа). Зносостійкість одержаних покриттів збільшилася в два рази. Концентрація (у розрахунку на чистий ДНА) становила від 1 до 5 г/л в електроліті.

У роботі [16] описано спосіб одержання композиційних покриттів на основі хрому та кластерних наноалмазів, для реалізації якого в електроліт хромування вводили 4...6%-ний водний колоїд кластерного алмазу. Вміст колоїду в електроліті становить 5,0...40,0 г/л. Оброблюваний виріб є катодом, якого занурювали у ванну з електролітом, попередньо нагрітому до 223...228 К. Як анод використовували свинець або його сплав із сурмою. Перед початком роботи електроліт механічно перемішували із продуванням газом, наприклад стисненим повітрям [16]. Стійкість суспензії кластерних алмазів у електроліті забезпечували за рахунок виділення на аноді й катоді газів та теплової конвекції електроліту. Недоліком даного методу є здійснення масопереносу частинок у напрямку до катода переважно інерційними силами гідропотоку за рахунок малої інерційності кластерів алмазів з розмірами їх частинок 0,001...0,01 мкм. Обмежені можливості масопереносу та, як наслідок, недостатня стійкість суспензії кластерних алмазів у електроліті, а також відносно невелика кількість частинок у покритті призводять до одержання покриттів з порівняно невисокими фізико-механічними характеристиками через наявність процесу пороутворення, а також неоднорідного розподілу наночастинок. Також відомий спосіб одержання композиційних покриттів на основі хрому електрохімічним осадженням із саморегульованого бар'євого електроліту, що містить кластерні частинки наноалмазу, які знаходяться у колоїдному стані і за підтримання в електроліті хромового ангідриду та сірчаної кислоти в кількості 200...225 і 0,9...1,0 г/л відповідно [16]. Властивості кластерних алмазів забезпечують в аналізованому способі відносну стійкість суспензії в електроліті. Максимальна ефективність покривання досягають у даному способі за концентрації кластерів наноалмазів 15 г/л. Недоліком даного способу є відсутність постійного перемішування електроліту в процесі нанесення покриття, що призводить до коагуляції – об'єднання мікрочастинок у великі агрегати за нейтралізації їх зарядів. За цього дисперсна система прагне перейти в грубодисперсну, яка за рахунок більших розмірів частинок має властивості суспензії. В результаті седиментаційні характеристики електроліту знижуються. Максимальна твердість покриття в описуваному способі досягається в дрібнодисперсній фракції за підвищеної концентрації алмазів і лише за товщини шару до 5 мкм. За подальшим нарощуванням товщини покриття без постійного механічного перемішування електроліту відбувається збільшення розміру зерен і твердість знижується. Відомий спосіб одержання гальванічних покриттів, модифікованих наноалмазами, що включає введення в електроліт фракцій наноалмазу, диспергування і нанесення покриття. В цьому способі вводять фракції наноалмазу розмірністю менше 200 нм, диспергування здійснюють до нанесення покриття і в період всього процесу покривання, впливаючи кавітацією на суспензію електроліту [18]. В даному способі підготовлену фракцію наноалмазу вводять у електроліт, механічно перемішують, диспергують впливом кавітації, здійснюють гальванічне осадження і одночасно пропускають суспензію електроліту через кавітаційний диспергатор. У процесі диспергування на поверхні агрегатів частинок наноалмазу утворюються кавітаційні пухирі. За схлопування бульбашок вивільняється енергія, що йде на руйнування відносно слабких сил зтягання агрегатованих частинок. Якщо суспензії електроліту використовують нерегулярно, перед технологічним процесом здійснюють механічне перемішування для підняття осадженого на дно модифікатора та рівномірного його розподілу за всім об'ємом рідини. Спосіб спрямовано на одержання покриття, модифікованого наноалмазами, що характеризується підвищеними

фізико-механічними характеристиками. Основним недоліком способу є незабезпеченість однорідного розподілу наночастинок впливом на суспензію кавітації в диспергаторах у процесах заготування електроліту та нанесення покриття. З метою підвищення однорідності осадження, твердості та зносостійкості покриття, зниження пороутворення, підвищення однорідності розподілу наночастинок в електролітичних покриттях, здрібнювання зерен за рахунок постійного перебування порошку в рівномірно завислому стані протягом усього періоду технологічного процесу покривання (наприклад, хромування) для утримання наночастинок, введених в електроліт у кількості 10...15 г/л, в завислому стані використовують магнітну мішалку, встановлену під ємністю, де здійснюють процес електролізу [19].

Технологія хромоалмазного хромування [20] дозволяє значною мірою поліпшити фізико-технічні показники такого покриття. Вони, порівняно з твердим хромуванням, збільшились у 2...5 разів, а коефіцієнт тертя зменшився на 15...25%. Завдяки своїй безпористій структурі наноалмазне покриття має також вищу корозійну стійкість. Отже, маючи поліпшені властивості, зміцнювальні покриття за собівартості, вищій на 10...15%, ніж для твердого хромування, можуть у два й більше разів підвищити ресурс роботи деталей та вузлів, які працюють за умов абразивного та корозійного зносу.

КЕП хром-графіт. Композиційні покриття хром-графіт можуть бути використані у виробках, які працюють за умов сухого тертя [21]. Згідно з даними [11], самозмащувальні КЕП хром-графіт можна одержати за вмісту графіту в розчині хромування до 4 г/л. За концентрації графіту більше ніж 4 г/л КЕП характеризуються високою шорсткістю, а за концентрації 8 г/л поверхня осадів покривається чорними плямами. Покриття з матрицею зі сплаву хром-молібден з дисперсною фазою графіту перевершують чистий хром за зносостійкістю більше, ніж удвічі, а за корозійною стійкістю – у шість разів [22]. Гарну корозійну стійкість також мають КЕП *Cr*-графіт-*P*, які можна осаджувати з електролітів як на основі *Cr(VI)*, так і на основі *Cr(III)* [23].

КЕП хром-сполуки металів. В роботах [24,25] показано, що хромові покриття з діоксидом церію, що осаджені в присутності тетраетиламіну, мають дуже високу зносостійкість. Оптимальний діапазон концентрацій SeO_2 в електроліті на основі *Cr(III)*, за яким одержують КЕП з максимальною мікротвердістю (7,72 ГПа), становить 5...8 г/л. За збільшення вмісту SeO_2 до 20 г/л відбувається зменшення мікротвердості до 6,69 ГПа, спостерігається розтріскування та відшарування покриттів, спричинене їх високими внутрішніми напруженнями [23].

Зносостійкість і твердість КЕП на основі хрому значно підвищується за введення дисперсних частинок кремнію або діоксиду титану в стандартний електроліт хромування [26]. За осадження КЕП хром- TiO_2 в імпульсному режимі (співвідношення імпульсу і паузи струму становить 1/3) мікротвердість покриттів зростає від 4,9...6,5 ГПа (чистий хром) до 8,1...8,7 ГПа (КЕП). У такому разі в електроліт додатково вводять галлову кислоту. Якщо використовувати дисперсну фазу TiN у стандартному електроліті хромування то за високої температури відбувається його перетворення на TiO_2 . В подальшому діоксид титану, присутній в електроліті у вигляді високодисперсного осаду з питомою поверхнею, у багато разів вищою за питому поверхню вихідного порошку TiN , сприятливо впливає на дисперсне зміцнення металевої матриці. Чим вища температура електроліту і чим дрібніше порошок, тим швидше досягається рівноважний стан. За взаємодії ультрадисперсного порошку нітриду титану з хромовими кислотами утворюються йони *Cr(III)* без попередньої електричної проробки електроліту.

Автори роботи [27] досліджували спільне осадження хрому з наночастинами оксиду алюмінію та карбиду кремнію. Введення в сульфатно-оксалатний розчин Al_2O_3

або SiC в концентрації 0,5 г/л збільшує перенапруження реакції виділення водню. Частка струму, що йде на виділення металевого хрому зростає, відповідно зростає вихід хрому за струмом. Поверхня осаду чистого хрому покрита сфероподібними елементами (соматоїдами), характерними для росту аморфних структур. За введення в електроліт дисперсної фази Al_2O_3 формуються гладкіші покриття. Частинки оксиду алюмінію входять лише в поверхневий шар осаду і впливають на каталітичні властивості поверхні в реакції виділення водню. В об'єм КЕП частинки Al_2O_3 не входять. Частинки карбіду кремнію, входячи в покриття, помітно підвищують шорсткість КЕП. Включення SiC в об'єм осаду призводить до появи піттингу. Введення в електроліт хромування як Al_2O_3 , так і SiC збільшує мікротвердість покриттів, але на внутрішні напруження осадів впливає незначно.

КЕП на основі міді

КЕП мідь-ультрадисперсний алмаз-фулерен. Головне зазначення КЕП на основі міді – надання металевим поверхням зносостійкості, жароміцності й антифрикційних властивостей [28,29]. Для одержання КЕП на основі міді найчастіше використовують сульфатні електроліти. В роботі [6] досліджували процес осадження КЕП Cu -УДА з електроліту складу, г/л: $CuSO_4$ –80; H_2SO_4 –100. Введення в електроліт УДА в концентрації від 0,1 до 5,0 г/л не змінює природу та механізм електродного процесу. Розсіювальна здатність електроліту з додаванням УДА зростає в три рази порівняно з вихідним розчином. Входження УДА в мідну матрицю призводить до зменшення кількості пор з 10 на 1 cm^2 (0,1 г/л УДА) до повної їх відсутності (5,0 г/л УДА). В результаті утворюються щільніші та дрібнокристалічніші покриття. У процесі корозійних випробувань не спостерігали зменшення маси зразків [6]. Мікротвердість покриттів, осаджених з електроліту з концентрацією УДА 5,0 г/л зростає майже в півтора рази порівняно з осадами, одержаними з базового електроліту. Зношування КЕП Cr -УДА в 9...10 разів менше ніж у чистої міді.

Вивчення трибологічних характеристик КЕП Cr -фулерен C_{60} показало [30], що за входження фулерену в мідні осадки коефіцієнт тертя зменшується з 0,50 до 0,22, а шорсткість поверхні – з 1,05 до 0,50. Подібні змінювання пояснюються впливом дисперсної фази. В процесі осадження на катодній поверхні частинки фулерену є центрами кристалізації визначають подальший ріст осаду та сприяють формуванню дрібнокристалічніших покриттів, ніж у разі чистої міді. Наявність фулерену в покриттях визначає зміну стану поверхні і, відповідно, трибологічних характеристик.

КЕП Cr -сполуки металів. В роботі [24] було виконано порівняння зносостійкості різних композиційних покриттів на основі міді, яке показало, що найкращі трибологічні властивості має КЕП Cu - SiC . Зменшення коефіцієнта тертя мідних покриттів досягається також за спільним осадженням міді з дисульфідом молібдену [25].

Збільшення мікротвердості мідних покриттів може бути досягнуто за введення ультрадисперсного порошку нітриду титану або оксиду алюмінію з розміром частинок 60...80 нм в сульфатний електроліт міднення [31]. Мікротвердість зростає з 0,85 ГПа (чиста мідь) до 1,27 ГПа (Cr - TiN) і 1,77 ГПа (Cr - Al_2O_3). Зміцненню осадів КЕП сприяє утворення великої кількості дислокацій за входженням ультрадисперсних частинок, які перешкоджають поширенню деформації зсуву та частково екранують основу. За співосадження міді з алмазним мікропорошком АСМ (розмір частинок 14...20 мкм) також досягається збільшення мікротвердості покриттів до 1,5...1,8 ГПа [32].

В роботах [28,33–34] досліджено вплив природи електроліту на осадження та властивості КЕП Cu - TiO_2 . Введення поліетиленполіаміну (ПЕПА) в сульфатний електроліт міднення (0,8 М $CuSO_4$; 0,5 М H_2SO_4) сприяє формуванню осадів з високими внутрішніми

напруженнями і дефектами кристалічної будови [33]. В КЕП $Cu-TiO_2$, навпаки, зменшені область когерентного розсіювання і мікронапруження. Такий результат, можливо, пов'язаний зі змінюванням властивостей металу матриці й дисперсної фази в результаті адсорбції на них компонентів електроліту. Структурні змінювання матриці за включення частинок діоксиду титану призводять до зменшення зносу покриттів з 20 г/(м²год) (чиста мідь) до 12,5 г/(м²год) (КЕП $Cu-TiO_2$).

За осадження КЕП $Cu-TiO_2$ з сульфатного електроліту з додаванням молібдату або ванадату амонію зменшується вихід міді за струмом і знижується частка дисперсних частинок у покриттях [34]. Проте, зазначені додавання підвищують жаростійкість $Cu-TiO_2$ -покриттів за 1173 К у 4...6 разів [28], а молібдат-іони надають підвищений блиск осадам [31].

У роботі [35] описано електрохімічний метод формування композиційних покриттів і фольги на основі міді, армованої нанорозмірним оксидом алюмінію, і запропоновано підхід до хімічного диспергування оксиду алюмінію за принципом «зверху вниз», а також склад електроліту, що забезпечує створення композитних матеріалів з різним вмістом модифікувальної фази. Встановлено вплив концентрації оксиду алюмінію в електроліті на фізико-механічні властивості зміцненої фольги. Відмічено зростання міцності (та інших фізико-механічних характеристик) синтезованих матеріалів.

КЕП на основі заліза. Електролітичні залізні покриття за твердістю є близькими до сталі, тому їх використовують для відновлення деталей машин і механізмів [29]. Такі покриття ще більше зміцнюються за використанні УДА як дисперсної фази [29]. Проте за осадження КЕП на основі заліза раціональніше використовувати не чисті наноалмази, а дешевшу алмазну шихту. За введення шихти в електроліт залізнення мікротвердість КЕП зростає вдвічі порівняно з покриттями залізо-УДА. Найкращі результати за зносостійкістю залізо-алмазних КЕП одержані з частково окисненої алмазної шихти.

КЕП залізо-сполуки металів. За входження в залізну матрицю дисперсних частинок B_4C зношування осадів зменшується з 9,8 мкм/км до 4,0 мкм/км, а мікротвердість зростає з 1,8 ГПа до 3,2 ГПа [36]. Разом з тим збільшується швидкість осадження КЕП $Fe-B_4C$, порівняно з чистими залізними покриттями. Входження частинок B_4C у сплав $Fe-Co$ дозволяє істотно підвищити його жаростійкість. Згідно з даними [37] для КЕП $Fe-Co-B_4C$ температура початку окиснення становить 923 К, а температура другій стадії окиснення досягає 1193 К.

В роботі [38] було виявлено, що гетерофазні електролітичні покриття на основі заліза з дисперсною фазою V_2O_5 проявляють високу каталітичну активність у процесі відновлення оксидів азоту. Чисті залізні осади на сталевій основі каталітично неактивні в даному процесі.

В роботі [39] досліджено корозійну поведінку КЕП $Fe-Al_2O_3$ в 0,05 М розчині Na_2SO_4 і в 5% -му розчині $NaCl$. Входження в залізну матрицю дисперсної фази оксиду алюмінію призводить до зсуву потенціалу корозії в позитивний бік і зниження струмів анодного розчинення. Швидкість корозії КЕП знижується порівняно із залізними покриттями. Хіміко-термічна обробка КЕП на основі заліза з Al_2O_3 і CrB_2 шляхом сульфоазотування за 483 К протягом шести годин [40] заводить до зміцнення зв'язку металу матриці з дисперсними частинками і основою. В результаті зростають зносостійкість і корозійна стійкість осадів. Випробування «на задир» до сульфоазотування виявили утворення лунок від випадання дисперсної фази. Після хіміко-термічної обробки цього явища не спостерігали. Швидкість корозії КЕП $Fe-CrB_2$ зменшується з 41,2 г/(м²год.) (без хіміко-термічної обробки) до 28,7 г/(м²год) (після хіміко-термічної обробки).

Для одержання необхідних експлуатаційних характеристик відновлених деталей в роботі [41] пропонується застосувати композиційні електролітичні покриття на основі гальванічного заліза із входженням нанодисперсних порошків нітриду бору (розмір частинок BN досягав 0,01 мкм) і сумісно синтезованої композиції нітридів титану та кремнію (70% TiN + 30% Si_3N_4 з розміром частинок 0,01...0,05 мкм). Вміст наночастинок у покриттях складав до одного масового відсотку. КЕП товщиною 20 мкм, були осаджені на зразки із сталі. Осадження виконано з використанням борфтористого електроліту залізнення та додаванням дисперсних частинок BN та суміші TiN + Si_3N_4 з концентрацією 10 г/л. Запропоновані склади електролітів не є токсичними. На практиці такі покриття піддають термічній обробці у вигляді відпуску за температури близько 600 К у звичайних умовах. Для підвищення механічних, адгезійних і трибологічних властивостей КЕП та утворення перехідної зони з рівноважнішою структурою запропоновано проведення термічної обробки (відпалу) дослідних зразків за вищої температури у вакуумі. Температури відпалу експериментальних зразків вибрано на основі аналізу діаграми стану $Fe-C$ (максимальна температура відпалу – 1000–1200 К). Встановлено, що включення наночастинок BN в композиційні електролітичні покриття на основі заліза, одержані з борфтористого електроліту залізнення, підвищують мікротвердість покриттів в 1,4 разів. Наявність суміші $TiN+Si_3N_4$ підвищує мікротвердість в 3,7 разів порівняно із традиційними гальванічними покриттями на основі заліза. КЕП на основі заліза з додаванням нанорозмірного нітриду бору після термічної обробки зберігають самомастильні властивості. Встановлено, що за збільшення шляху тертя для зразків з КЕП з додаванням нанопорошку нітриду бору лінійний знос практично не збільшується. КЕП на основі заліза з додаванням суміші нанопорошків нітриду титану та нітриду силіцію на стадії припрацювання мають менший лінійний знос, ніж КЕП з додаванням нітриду бору, відсутнє самозмащення, фіксується інтенсивніший знос за збільшені шляху тертя.

КЕП на основі цинку

КЕП цинк-ультрадисперсний алмаз. Композиційні покриття на основі цинку застосовують для захисту сталевих поверхонь від корозії з поліпшенням їх фізико-механічних властивостей. В роботах [6; 42; 43] досліджені корозійні властивості КЕП цинк-УДА, осаджених з лужного цинкатного та слабкокислового хлоридного електролітів. Експериментальним шляхом встановлено, що оптимальний вміст наноалмазів у електроліті становить 10 г/л, за цього в покриття входить 0,7 УДА. Введення дисперсних частинок УДА в цинкатний електроліт спричинює зсув потенціалу в позитивний бік на 20...25 мВ (за концентрації УДА 10 г/л), що вказує на часткову деполаризацію подвійного електролітичного шару [42].

З ростом концентрації УДА в електроліті зростає вміст дисперсної фази в покриттях [42], також збільшується дрібнозернистість осадів [6]. Корозійна стійкість КЕП цинк-УДА значно підвищується за пасивації покриттів шляхом стандартного хроматування або фосфатування [43]. Фосфатування краще, оскільки екологічно менш небезпечне [29].

КЕП цинк-сполуки металів. В роботі [44] розроблено метод осадження покриттів цинк-оксид кремнію. Осади КЕП $Zn-SiO_2$ мають поліпшену адгезію до основи, порівняно з чистим цинком. В роботі [45] запропоновано замість сплавів цинку осаджувати КЕП, що містять близько 20% слюди або оксиду кремнію. В результаті підвищується корозійна стійкість і зносостійкість осадів [46].

КЕП на основі благородних металів

КЕП на основі срібла. КЕП на основі срібла з електропровідними частинками осаджують на електричні контакти для поліпшення провідності. Окрім того, срібні КЕП застосовують для підвищення зносостійкості деталей, що електроконтактують [29].

За введення в синеродистороданистий електроліт сріблення дисперсних наноалмазів одержують щільні дрібнокристалічні напівблискучі осади, що містять до 1,0 мас.% УДА [6; 47]. Якщо вести осадження КЕП срібло-УДА на реверсивному струмі, то вміст дисперсної фази в матриці збільшується до 2,5 мас.% [48].

Залежно від складу електроліту та режиму електролізу, мікротвердість срібноалмазних покриттів зростає на 200...700 МПа порівняно з чистим сріблом [29]. Зносостійкість, за збільшення концентрації УДА в електроліті, зростає в 5...15 разів (табл. 3) [6]. Контактний опір КЕП срібло-УДА ідентичні чистому сріблу [29; 48].

Таблиця 3 – Зносостійкість срібних покриттів

Вміст УДА в електроліті	Товщина покриття, мкм	Час стирання, год	Зменшення маси покриття, %
0	5,0	20	33,3
0,2	1,7	20	6,7
0,5	1,3	20	5,0
1,0	1,3	40	2,5
2,0	1,5	25	0

За входження в срібну матрицю частинок тефлону поліпшується зовнішній вигляд покриттів. КЕП срібло-ПТФЕ не тьмяніє навіть без спеціальної обробки [49].

Золочення в електроніці застосовують для забезпечення стабільного перехідного опору контактів. Осадження КЕП на основі золота здійснюють з ціанистих кислих (цитратних), ціанистих лужних і залізосинеродистих електролітів. Уведення в ці електроліти УДА в концентрації 0,5...10 г/л дає змогу одержувати осади, що містять 0,1...1,0 мас.% алмазів [6]. За входження наноалмазних частинок в золоті покриття істотно поліпшуються фізико-механічні властивості останніх [43; 49; 50]. Мікротвердість КЕП золото-УДА досягає 2,0 ГПа, а зносостійкість збільшується в 2...200 разів (табл. 4) [6; 50]. Як дисперсну фазу КЕП на основі золота може бути використана алмазна шихта. Вміст часток АШ в золотих осадах становить 0,5...0,9 мас.%, мікротвердість даних покриттів може доходити до 1,7 ГПа [29].

Таблиця 4 – Зносостійкість золотих покриттів

Вміст УДА в електроліті, г/л	Зменшення маси покриттів, 10^{-5} г/год
0	93,2
0,1	44,0
0,5	4,8
1,0	0,4
2,0	2,5
5,0	5,6

Для підвищення зносостійкості ювелірних прикрас на них осаджують золоті покриття з дисперсною фазою нітриду титану [51] або карбиду бору [52]. Проте, частинки B_4C в КЕП, одержаних з ціанистих електролітів, розподіляються нерівномірно.

КЕП на основі олова. Олов'янування широко використовують в електротехнічній та харчовій промисловості. Олов'яні покриття мають невисоку стійкість до стирання та корозії. За спільним осадженням олова з наноалмазними частинками з сульфатного електроліту ці показники істотно поліпшуються. Зносостійкість КЕП олово-УДА зростає в три рази порівняно з олов'яними осадами. Кількість пор на 1 cm^2 покриття зменшується з 16...17 (чисте олово) до 0...2 (КЕП) [6], відповідно збільшується і корозійна стійкість.

За цьому залишаються незмінними коефіцієнт розтікання запою (1,8...2,1) і питомий опір (0,18...0,23 Ом·мм²/м). Відомо, що здатність електролітичних олов'яних сплавів до пайки за тривалим зберіганням значно погіршується. Цього недоліку позбавлені КЕП Sn-Vi-УДА [53]. Дані покриття також мають низьку пористість (3...4 пори на 1 см²).

Анодні оксидні плівки. Осадження анодних оксидних плівок (АОП) – головний метод захисту від корозії, підвищення міцності та зносостійкості алюмінію та його сплавів. Даний процес широко використовують у машинобудуванні, авіабудуванні, хімічній промисловості. Основним компонентом АОП є триоксид алюмінію. Анодне оксидування здійснюють, як правило, в кислому середовищі, але іноді – в лужному. Вхідження в АОП дисперсної фази УДА заводить до поліпшення їх властивостей. Наноалмазні частинки в електролітах оксидування набувають негативного заряду і рухаються до анода. Там вони заповнюють пори утвореної АОП і утримуються в них за рахунок механічних і Ван-дер-Ваальсових сил, формуючи композиційне покриття [6]. За цьому маса оксидної плівки збільшується в 2...4 рази. Наявність дисперсних наноалмазів у розчині не зменшує швидкість росту АОП та збільшує розсіювальну здатність електроліту. Величина наповнення оксидних плівок частинками УДА залежить від режиму електролізу і концентрації наноалмазів [6]. Оптимальний вміст УДА в електролітах оксидування становить 2...15 г/л. Зносостійкість АОП з УДА зростає в 10...15 разів, поліпшуються їх корозійна стійкість, електроізоляційні властивості та зовнішній вигляд [6; 29].

Для поліпшення антифрикційних властивостей оксидних плівок на алюмінії і його сплавах до складу лужного електроліту оксидування вводять дисульфід молібдену і гліцерин [6; 29], після чого охолоджують розчин до 275...278 К і ведуть в ньому обробку матеріалу.

Хімічні композиційні покриття. Хімічні композиційні покриття (ХКП), осаджені без накладення струму, наносять на деталі зі складним профілем поверхні для захисту від корозії та зносу. Матрицею ХКП, як правило, служать сплави Ni-P або Ni-B. Вхідження твердих частинок у хімічне нікелеве покриття спричинює в його структурі зсуви, що поліпшують функціональні властивості ХКП [54]. В роботі [55] виконано порівняльне дослідження фізико-механічних та корозійних властивостей ХКП на основі Ni-P з різною дисперсною фазою (розмір часток 1...2 мкм). Найбільшу мікротвердість мають покриття з включеннями карбіду бору й оксиду Cr(III). Найменший знос спостерігають у осадів з дисперсними частинками алмазу, а найбільша корозійна стійкість характерна для ХКП Ni-P-ZrO₂ (табл. 5). За осадження тришарових покриттів найменша швидкість корозії була в осадів Ni-P-оксид титану (0,34 мг/м²·год) [56]. Високу стійкість до корозійного впливу виявляють також багатошарові нікелеві покриття, що містять оксид хрому (III) [55]. В роботі [57] показано, що корозійна стійкість ХКП на основі нікелю з дисперсною фазою TiO₂ і Cr₂O₃ вище, ніж для аналогічних покриттів, одержаних електрохімічним способом. Слід також зазначити, що включення частинок TiO₂ в покриття Ni-P призводить до зниження коефіцієнта тертя [58]. Аналогічний ефект спостерігають за введенням в електроліт хімічного нікелювання дисперсних фаз ПТФЕ [59] або дисульфиду молібдену [60].

Згідно з даними роботи [61] високу зносостійкість мають ХКП Ni-P-SiC, що містять 25–30% дисперсної фази. Проте, твердість і зносостійкість таких покриттів залежить від багатьох факторів, насамперед від властивостей самого карбіду кремнію [62], наявності в електроліті змочувача [63] і кількості фосфору в осадах [64]. Підвищення вмісту фосфору в матриці призводить до підвищення твердості, а зниження – до збільшення зносостійкості.

Таблиця 5 – Властивості хімічних композиційних покриттів на основі нікелю

Покриття	Мікротвердість, МПа	Знос пари тертя, мг	Швидкість корозії в 3% NaCl, мг/м ²
Ni-P	7950	14,95	11,85
Ni-P-Al ₂ O ₃	6330...9090	12,00...23,90	7,74...14,69
Ni-P-B ₄ C	6030...10950	5,55...12,20	6,48...8,70
Ni-P-TiO ₂	7660...10270	6,20...9,80	2,63...6,81
Ni-P-ZrO ₂	6440...8740	19,50...24,20	1,74...2,89
Ni-P-TiN	5790...8410	6,45...8,05	4,13...10,25
Ni-P-алмаз	4290...6440	2,60...2,80	2,32...3,68
Ni-P-Cr ₂ O ₃	8240...10660	6,20...9,50	3,21...7,81

Нанорозмірні частинки оксиду кремнію надають високу твердість ХКП на основі нікелю та міді [65–67]. Твердість хімічних нікелевих покриттів підвищується також за включенні в них алмазних наночастинок. Частинки алмазу мікронних розмірів покращують трибологічні властивості осадів, а більші дисперсні частинки (до 150 мкм) підвищують теплопровідність ХКП на основі нікелю.

Висновки. Розгляд результатів з вивчення структури і властивостей КЕП дає змогу стверджувати, що дана область гальванотехніки продовжує успішно розвиватися. Розроблено методи одержання нових покриттів, що мають підвищену твердість, зносостійкість, корозійну стійкість та інші експлуатаційні властивості. Як тенденцію можна відмітити дослідження композиційних покриттів з дисперсними наночастинами.

Слід зазначити, що застосування префікса «нано» до дисперсної фази КЕП не завжди виправдано: в сильних електролітах нанорозмірні частинки схильні до агрегації. Проте, існують способи запобігання агрегації наночастинок (очищення від домішок-коагулянтів іонообмінними смолами, ультразвукова обробка електроліту, введення в розчин додавань ПАР тощо). Ще однією тенденцією є те, що більшість публікацій присвячено властивостям і структурі композиційних покриттів, у той час як кількість робіт, де обговорюються механізми і кінетичні закономірності формування КЕП, є досить незначним.

Багато КЕП знаходять застосування. У промисловому масштабі реалізовано нанесення хром-алмазних покриттів на різальний інструмент. Низка підприємств виконує осадження КЕП нікель-УДА і нікель-фторопласт на різні деталі. У промисловість упроваджено процеси нанесення композиційних покриттів на основі благородних металів (золото-УДА, срібло-УДА, платина-фторопласт тощо). Це лише кілька закладів, але вони наочно показують практичну значимість дослідження процесів осадження КЕП та їх властивостей.

Бібліографічний перелік

1. Ємченко І.В. Композиційні захисні покриття. *Вісник ЛКА. Серія: Товарознавча.* 2004. Вип. 6. С. 158–163.
2. Гончаренко В.В., Коваленко І.В. Технологія композиційних матеріалів : навчальний посібник. Київ, 2007. 131 с.
3. Геворкян Е.С., Семченко Г.Д., Тимофеева Л.А. Нові матеріали та технології їх одержання : підручник. Харків : УкрДУЗТ, 2015. 341 с.
4. Ghorbani M., Mazaheri M., Khangholi K., Kharazi Y. Electrodeposition of graphite-brass composite coatings and characterization of the tribological properties. *Surf. Coat. Technol.* 2001. Vol. 148, Iss. 1. P. 71–76.
5. Підгайчук С.Я., Покришко Г.А., Яворська Н.М., Саргинська Л.Л. Електрохімічні композиційні покриття з добавкою наноструктур: актуальність та перспективи їх одержання та дослідження. *Вісник Хмельницького нац ун-ту. Серія: Технічні науки.* 2009. № 1. С. 136–138.
6. Буркат Г.К., Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике. *Физика твердого тела.* 2004. Т. 46, № 4. С. 685–692.
7. Ващенко С.В., Соловьева З.А. Электроосаждение износостойких хромовых покрытий из электролитов с ультрадисперсными алмазными порошками. *Гальванотехника и обработка поверхности.* 1992. Т. I. № 5–6. С. 45–48.

8. Mandich N.V., Dennis J.K. Codeposition of nanodiamonds with chromium. *Metal Finishing*. 2001. Vol. 99. No. 6. P. 117–119.
9. Долматов В.Ю., Фуджимура Т., Буркат Г.К., Орлова Е.А. Получение износостойких хромовых покрытий с заменением наноалмазов различной зароды. *Сверхтвердые материалы*. 2002. № 6. С. 16–21.
10. Винокуров Е.Г. Арсенкин А.М., Григорович К.В., Бондарь В.В. Стрoение модифицированных дисперсными частицами хромовых покрытий. *Защита металлов*. 2006. Т. 42. № 2. С. 221–224.
11. Винокуров Е.Г. Арсенкин А.М., Григорович К.В., Бондарь В.В. Электроосаждение модифицированных дисперсными частицами хромовых покрытий и их физико-механические свойства. *Защита металлов*. 2006. Т. 42. № 3. С. 312–316.
12. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и замeнение. *Успехи химии*. 2001. Т. 70. № 7. С. 687–708.
13. Тихонов К.И., Буркат Г.К., Долматов В.Ю., Орлова Е.А. Использование алмазной шихты в процессе хромирования. *Журнал прикладной химии*. 2007. Т. 80. Вып. 7. С. 1113–1116.
14. Иващенко В.М., Губаревич Т.М., Корженевський О.П., Бородин В.П. Спосіб одержання композиційних покриттів на основі хрому. Патент на винахід UA 59561. Опубл. 15.09.2003, Бюл. № 9.
15. Долматов В.Ю., Буркат Г.К., Свирь К.А. Исследование процесса электрохимического осаждения хрома в присутствии композиционного алмазосодержащего состава. *Инструментальное материаловедение*. 2020. Вип. 23. Київ : ИИМ ім. В.М. Бакуля НАН України, С. 187–194.
16. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Пругатарьев А.В. Спосіб одержання зносостійких електролітичних покриттів, зміцнених наночастинками. Патент на корисну модель UA 95887. Опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1.
17. Буркат Г.К., Долматов В.Ю., Орлова Е.А., Рыжов Е.В. Способ и электролит для получения композиционных металл-алмазных покрытий, алмазосодержащая добавка и способ ее получения. Международная заявка PCT/RU2009/000032. Опубл. 09.07.2009, WO 2009/084985 A 2.
18. Макаренко Л.В. Способ получения композиционных покрытий на основе хрома. Патент RU 2031982 C1. Опубл. 27.03.1995.
19. Петров И.Л. Способ получения гальванических покрытий, модифицированных наноалмазами. Патент RU 2368709 C2. Опубл. 27.09.2009.
20. Писаренко В.Г., Иващенко В.М., Бородин В.Г. Нанотехнології зносостійкого покриття. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. № 1. С. 82–85.
21. Махина В.С., Графушин Р.В., Винокуров Е.Г. Интенсивность износа композиционных электрохимических покрытий хром-графит. *Успехи химии*. 2017. Т. 31. № 5. С. 54–56.
22. Сайфуллин Р.С., Зенцова Е.П., Водопьянова С.В. Композиционные покрытия с матрицей из сплава хром-молибден. *Защита металлов*. 1995. Т. 31. № 3. С. 315–316.
23. Plieth W., Voos B., Shroder N., McCaskel J., Martyak N.M. Elektrochemische Herstellung amorpher Chromschichten. *Galvanotechnik*. 1999. Bd. 90. No. 9. P. 2425–2434.
24. Zhan Y., Zhang G., Liu Z. Influences of counterface materials and reinforcements on the sliding wear of copper matrix composites. *Zeitschrift fur Metallkunde*. 2004. Vol. 95. No. 2. P. 91–96.
25. Wan Y.Z. Wang Y.L., Tao H.M., Cheng G.X., Dong X.H. Preparation and Characterization of Cu-MoSi₂ Composite Coatings. *Transactions of The Institute of Metal Finishing*. 1999. Vol. 77. Iss. 1. P. 52–54.
26. Водопьянова С.В., Зенцова Е.П., Сайфуллин Р.С. Электроосаждение хрома из электролитов-суспензий с использованием импульсного тока. *Электрохимия*. 1998. Т. 34. № 3. С. 337–339.
27. Лубнин Е.Н., Поляков Н.А., Полукаров Ю.М. Электроосаждение хрома из сульфатно-оксалатных растворов, содержащих наночастицы оксида алюминия и карбида кремния. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2007. Т. 43. № 2. С. 199–206.
28. Сайфуллин Р.С., Фомина Р.Е., Мингазова Г.Г., Хайдаров Р.А. Электроосаждение медных покрытий из ванадат- и молибдатсодержащих электролитов с суспендированным диоксидом титана. *Защита металлов*. 2002. Т. 38. № 5. С. 530–533.
29. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и замeнение. *Успехи химии*. 2007. Т. 76. № 4. С. 375–397.
30. Целуйкин В.Н., Соловьева Н.Д., Гунькин И.Ф. Влияние фуллерена C₆₀ на свойства электролитических медных покрытий. *Перспективные материалы*. 2007. № 5. С. 82–84.
31. Резчикова Т.В., Куркин Е.Н., Гребцова О.М. Взаимодействие ультрадисперсного порошка TiN с хромовым электролитом. *Журнал закладной химии*. 1993. Т. 66. № 9. С. 1977–1983.

32. Цисарь И.А., Знаменский Г.Н., Ющенко Т.И., Пачес Л.В. Алмазосодержащие износостойкие и абразивные покрытия. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 1996. Т. 4. № 1. С. 21–28.
33. Абдуллин И.А., Сайфуллин Р.С. Влияние зароды электролита на структуру и свойства КЭП с матрицей из меди. *Защита металлов*. 1997. Т. 33. № 2. С. 222–224.
34. Фомина Р.Е., Сайфуллин Р.С., Мингазова Г.Г. Роль ванадат- и молибдат-ионов в процессе образования композиционных электрохимических покрытий медь-доксид титана. *Электрохимия*. 1997. Т. 33. № 11. С. 1367–1369.
35. Sakhnenko M.D., Ovcharenko O.O., Lyabuk S.I. Physicomechanical properties of Cu-Al₂O₃ electroplating compositions. *Materials Science*. 2015. Vol. 50. Iss. 5. P. 646–652.
36. Артамонов В.П., Жанзакова И.М. Композиционное покрытие на основе железа. *Защита металлов*. 1992. Т. 28. № 3. С. 478–481.
37. Бобонова Ж.И., Мичукова Н.Ю., Сидельникова С.П. Электроосаждение сплавов железа и композиционных покрытий на их основе. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2000. Т. 8. № 2. С. 17–19.
38. Ахмеров О.И., Кринари Г.И. Фазовый состав и структура гетерофазных железованадиевых электрохимических покрытий. *Журнал прикладной химии*. 1999. Т. 72. № 6. С. 947–951.
39. Ревенко В.Г., Козлова Т.В., Астахов Г.А. Коррозионное и электрохимическое поведение композиционных электролитических покрытий на основе железа. *Защита металлов*. 2003. Т. 39. № 1. С. 84–87.
40. Абдуллин И.А., Сайфуллин Р.С. Химико-термическая модификация композиционных электрохимических покрытий с железной матрицей. *Защита металлов*. 1995. Т. 31. № 5. С. 541–543.
41. Підгайчук С.Я., Дробот О.С., Яворська Н.М., Машовець Н.С. Відновлення деталей машин комбінованими методами обробки. *Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні* : тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф., 05–08.10.2020. Харків : Ін-т проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, 2020. С. 109–110.
42. Буркат Г.К., Долматов В.Ю. Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий цинк-алмаз из цинкатного электролита. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2001. Т. 9. № 2. С. 35–40.
43. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: монография. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. 344 с.
44. Khan T.R., Erbe A., Auinger M., Marlow F., Rohwerder M. Electrodeposition of zinc-silica composite coatings: challenges in incorporating functionalized silica particles into a zinc matrix. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12. Iss. 5. P. 56–69.
45. Khelladi M.R., Mentar L., Boubatra M., Azi A. Study of nucleation and growth process of electrochemically synthesized ZnO nanostructures. *Materials Letters*. 2012. Vol. 67. Iss. 1. P. 331–333.
46. Гальченко Г.Ю. Корозійностійкі композиційні цинкові електролітичні покриття. *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 3. С. 107–109.
47. Целуйкин В.Н. Композиционные электрохимические покрытия: получение, структура, свойства. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2009. Т. 45. № 3. С. 287–301.
48. Костин Н.А. Перспективы развития импульсного электролиза в гальванотехнике. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 1992. № 1–2. С. 16–18.
49. Tseluikin V.N. Composite electrochemical coatings: Preparation, structure, properties. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2009. Vol. 45. P. 312–326.
50. Loubnin E.N., Pimenov S.M., Bletter A. Electroplating of gold-nanodiamond composite coatings. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*. 1999. Vol. 9. No. 4. P. 273–282.
51. Zielonka A., Raub C.J. Gold-titanium nitride dispersion layers. *Metalloberflache*. 1995. Vol. 49. Iss. 6. P. 409–412.
52. Bozzini B., Cavallotti P.L., Giovannelli G. Electrokinetic behavior of gold alloy and composite plating baths. *Metal Finishing*. 2002. Vol. 100. Iss. 4. P. 50–60.
53. Буркат Г.К., Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике. *Физика твёрдого тела*. 2004. Т. 46. Вып.4. С. 685–692.
54. Schutte A., Gray M. Solid material as a function carrier. Nickel-phosphorus dispersion precipitation. *Metalloberflaeche*. 1999. Vol. 53. Iss. 9. P. 41–44.
55. Скопинцев В.Д., Карелин А.В., Котов И.О., Клинский Г.Д. Коррозионные и физико-механические свойства химических композиционных покрытий. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 1998. Т. 6. № 3. С. 86–91.

56. Sahayaraj M.E., Jappes J.T.W., Siva I., Rajini N. Investigation on corrosion performance of multilayer Ni-P/TiO₂ composite coating on steel. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2016. Vol. 23. No. 3. P. 309–314.
57. Экилик Г.Н. Концентрационные зависимости эффекта комбинированных ингибиторов кислотной коррозии железа. *Защита металлов*. 2003. Т. 39. № 1. С. 34–35.
58. Safavi, M.S., Rasooli A. Ni-P-TiO₂ nanocomposite coatings with uniformly dispersed Ni₃Ti intermetallics: Effects of current density and post heat treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 372. P. 252–259.
59. You Y.-H., Gu C.-D., Wang X.-L., Tu J.-P. Electrochemical Preparation and Characterization of Ni-PTFE Composite Coatings from a Non-Aqueous Solution Without Additives. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. Vol. 7. P. 12440–12455.
60. Moonir-Vaghefi S.M., Saatchi A., Hejazi J. Deposition and properties of electroless nickel-phosphorus-molybdenum disulfide composites. *Metal Finishing*. 1997. Vol. 95. Iss. 11. P. 46–52.
61. Dunner P.H., Hans R. Coatings to reduce the use of machining lubricants. *Galvanotechnik*. 1997. Vol. 88. No. 12. P. 4096–4102.
62. Chou M.C., Ger M.D., Ke S.T., Huang Y.R., Wu S.T. The Ni-P-SiC composite produced by electro-codeposition. *Materials chemistry and physics*. 2005. Vol. 92. No. 1. P. 146–151.
63. Chang, C.S., Hou K.H., Ger M.D., Chung C.K., Lin J.F. Effects of annealing temperature on microstructure, surface roughness, mechanical and tribological properties of Ni-P and Ni-P/SiC films. *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 288. P. 135–143.
64. Hou K.H., Hwu W.H., Ke S.T., Ger M.D. Ni-P-SiC composite produced by pulse and direct current plating. *Materials chemistry and physics*. 2006. Vol. 100. No. 1. P. 54–59.
65. Иванов В.В., Балаклай В.И., Щербаков И.Н. Получение и свойства композиционных покрытий на основе никеля. *Успехи современного естествознания*. 2015. № 1. С. 1335–1338.
66. Колосов В.Н., Шевырев А.А. Электролитические сверхпроводящие материалы. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1996. 117 с.
67. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Расина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. 200 с.

References

1. Yemchenko I.V. Kompozytsiyni zakhysni pokryttia [Composite protective coatings]. *Visnyk LKA. Serii: Tovaroznavcha*. 2004. Iss. 6. P. 158–163.
2. Honcharenko V.V., Kovalenko I.V. Tekhnologiya kompozytsiynykh materialiv : navchalnyi posibnyk [Technology of composite materials : textbook]. Kyiv : 2007. 131 p.
3. Hevorkian E.S., Semchenko H.D., Tymofeieva L.A. Novi materialy ta tekhnolohii yikh otrymannia : pidruchnyk. [New materials and technologies for their production : textbook]. Kharkiv : UkrDUZT, 2015. 341 p.
4. Ghorbani M., Mazaheri M., Khangholi K., Kharazi Y. Electrodeposition of graphite-brass composite coatings and characterization of the tribological properties. *Surf. Coat. Technol.* 2001. Vol. 148, Iss. 1. P. 71–76.
5. Pidhaichuk S.Ya., Pokryshko H.A., Yavorska N.M., Sartynska L.L. Elektrokhimichni kompozytsiyni pokryttia z dobavkoiu nanostruktur: aktualnist ta perspektyvy yikh otrymannia ta doslidzhennia [Electrochemical composite coatings with the addition of nanostructures: relevance and prospects for their production and research]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2009. No. 1. P. 136–138.
6. Burkat H.K., Dolmatov V.Yu. Ultradispersnye almazы v galvanotekhnike [Ultrafine diamonds in electroplating]. *Fizika tverdogo tela*. 2004. Vol. 46. No. 4. P. 685–692.
7. Vashchenko S.V., Soloveva Z.A. Elektroosazhdenie iznosostoykikh khromovykh pokrytyi iz elektrolitov s ultradispersnyimi almaznymi poroshkami [Electrodeposition of wear-resistant chromium coatings from electrolytes with ultrafine diamond powders]. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 1992. Vol. I. No. 5–6. P. 45–48.
8. Mandich N.V., Dennis J.K. Codeposition of nanodiamonds with chromium. *Metal Finishing*. 2001. Vol. 99. No. 6. P. 117–119.
9. Dolmatov V.Yu., Fudzhimura T., Burkat G.K., Orlova E.A. Poluchenie iznosostoykikh khromovykh pokrytyi s primeneniem nanoalmazov razlichnoy prirody [Wear-resistant chromium coatings obtaining using nanodiamonds of various nature]. *Sverkhтвердые материалы*. 2002. No. 6. P. 16–21.

10. Vinokurov E.G., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Bondar V.V. Stroenie modifitsirovannykh dispersnyimi chastitsami khromovykh pokrytiy [Structure of chromium coatings modified with dispersed particles]. *Zashchita metallov*. 2006. Vol. 42. No. 2. P. 221–224.

11. Vinokurov E.G., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Bondar V.V. Elektroosazhdenie modifitsirovannykh dispersnyimi chastitsami khromovykh pokrytiy i ikh fiziko-mekhanicheskie svoystva [Electrodeposition of chromium coatings modified with dispersed particles and their physical and mechanical properties]. *Zashchita metallov*. 2006. Vol. 42. No. 3. P. 312–316.

12. Dolmatov V. Yu. Ul'tradispersnye almazy detonatsionnogo sinteza: svoystva i primeneniye [Ultrafine detonation synthesis diamonds: properties and applications]. *Uspekhi khimii*. 2001. Vol. 70. No. 7. P. 687–708.

13. Tikhonov K.I., Burkat G.K., Dolmatov V.Yu., Orlova E.A. Ispol'zovanie almaznoy shikhty v protsesse khromirovaniya [The use of diamond filling in the chrome plating process]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2007. Vol. 80. Iss. 7. P. 1113–1116.

14. Ivashchenko V.M., Gubarevich T.M., Korzhenyevskiy O.P., Borodin V.P. Sposib oderzhannya kompozitsionnykh pokrytiy na osnovi khromu [The method of obtaining composite coatings based on chromium]. Patent UA59561. Publ. 15.09.2003, Bull. No. 9.

15. Dolmatov V.Yu., Burkat G.K., Svir K.A. Issledovanie protsessa elektrokhimicheskogo osazhdeniya khroma v prisutstviy kompozitsionnogo almazosoderzhashchego sostava [Investigation of the chromium electrochemical deposition process in the composite diamond-containing composition presence]. *Instrumental'ne materials*. 2020. Iss. 23. P. 187–194.

16. Skoblo T.S., Kliuchko O.Yu., Pluhatarov A.V. Sposib oderzhannya znosostiikykh elektrolitychnykh pokrytiy, zmitsnenykh nanochastynkami [A method of obtaining wear-resistant electrolytic coatings reinforced with nanoparticles]. Patent UA95887. Publ. 12.01.2015, Bull. No. 1.

17. Burkat G.K., Dolmatov V.Yu., Orlova E.A., Ryzhov E.V. Sposob i elektrolit dlya polucheniya kompozitsionnykh metall-almaznykh pokrytiy, almazosoderzhashchaya dobavka i sposob yeye polucheniya [Method and electrolyte for obtaining composite metal-diamond coatings, diamond-containing additive, and method for its production]. International application PCT/RU2009/000032. Publ. 09.07.2009, WO 2009/084985 A2.

18. Makarchenko L.V. Sposob polucheniya kompozitsionnykh pokrytiy na osnove khroma [A method of obtaining composite coatings based on chromium]. Patent RU 2031982 C1. Publ. 27.03.1995.

19. Petrov I.L., Sposob polucheniya gal'vanicheskikh pokrytiy, modifitsirovannykh nanoalmazami [Method for producing electroplated coatings modified with nanodiamonds]. Patent RU 2368709 S2. Publ. 27.09.2009.

20. Pysarenko V.G., Ivashchenko V.M., Borodin V.G. Nanotekhnologii znosostiikoho pokryt'ya [Nanotechnologies of wear-resistant coating]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2011. No. 1. P. 82–85.

21. Makhina V.S., Grafushin R.V., Vinokurov E.G. Intensivnost' iznosa kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokrytiy khrom-grafit [Wearing rate of chromium-graphite composite electrochemical coatings]. *Usp. khim. khim. tekhn.* 2017. Vol. 31. No. 5. P. 54–56.

22. Sayfullin R.S., Zentsova E.P., Vodop'yanova S.V. Kompozitsionnye pokryt'ya s matritsey iz splava khrom-molibden [Composite coatings with a matrix from chromium-molybdenum alloy]. *Zashchita metallov*. 1995. Vol. 31. No. 3. S. 315–316.

23. Plieth W., Voos B., Shroder N., McCaskel J., Martyak N.M. Elektrochemische Herstellung amorpher Chromschichten. *Galvanotechnik*. 1999. Bd. 90. No. 9. P. 2425–2434.

24. Zhan Y., Zhang G., Liu Z. Influences of counterface materials and reinforcements on the sliding wear of copper matrix composites. *Zeitschrift fur Metallkunde*. 2004. Vol. 95. No. 2. P. 91–96.

25. Wan Y.Z., Wang Y.L., Tao H.M., Cheng G.X., Dong X.H. Preparation and Characterization of Cu-MoSi₂ Composite Coatings. *Transactions of The Institute of Metal Finishing*. 1999. Vol. 77. Iss. 1. P. 52–54.

26. Vodop'yanova S.V., Zentsova E.P., Sayfullin R.S. Elektroosazhdenie khroma iz elektrolitov-suspenziy s ispol'zovaniem impul'snogo toka [Electrodeposition of chromium from electrolyte suspensions using a pulsed current]. *Elektrokimiya*. 1998. Vol. 34. No. 3. P. 337–339.

27. Lubnin E.N., Polyakov N.A., Polukarov Yu.M. Elektroosazhdenie khroma iz sul'fatno-oksalatnykh rastvorov, soderzhashchikh nanochastitsy oksida alyuminiya i karbida kremniya [Electrodeposition of chromium from sulfate-oxalate solutions containing nanoparticles of aluminum oxide and silicon carbide]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2007. Vol. 43. No. 2. P. 199–206.

28. Sayfullin R.S., Fomina R.E., Mingazova G.G., Khaydarov R.A. Elektroosazhdenie mednykh pokrytiy iz vanadat- i molibdatsoederzhashchikh elektrolitov s suspendirovannym dioksidom titana [Electrodeposition of copper coatings from vanadate- and molybdate-containing electrolytes with suspended titanium dioxide]. *Zashchita metallov*. 2002. Vol. 38. No. 5. P. 530–533.
29. 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.
30. Tseluykin V.N., Solov'eva N.D., Gun'kin I.F. Vliyanie fullerena C_{60} na svoystva elektroliticheskikh mednykh pokrytiy [Influence of C_{60} fullerene on the properties of electrolytic copper coatings]. *Perspektivnye materialy*. 2007. No. 5. P. 82–84.
31. Rezchikova T.V., Kurkin E.N., Grebtsova O.M. Vzaimodeystvie ul'tradispersnogo poroshka TiN s khromovym elektrolitom [Interaction of ultrafine TiN powder with chromium electrolyte]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 1993. Vol. 66. No. 9. P. 1977–1983.
32. Tsisar I.A., Znamenskiy G.N., Yushchenko T.I., Paches L.V. Almazosoderzhashchie iznosostoykie i abrazivnye pokrytiya [Diamond-containing wear-resistant and abrasive coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 1996. Vol. 4. No. 1. P. 21–28.
33. Abdullin I.A., Sayfullin R.S. Vliyanie prirody elektrolita na strukturu i svoystva KEP s matritsey iz medi [Influence of the electrolyte nature on the structure and properties of CECs with a copper matrix]. *Zashchita metallov*. 1997. Vol. 33. No. 2. P. 222–224.
34. Fomina R.E., Sayfullin R.S., Mingazova G.G. Rol' vanadat- i molibdat-ionov v protsesse obrazovaniya kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokrytiy med'-doksida titana [The role of vanadate and molybdate ions in the formation of composite electrochemical coatings of copper-titanium dioxide]. *Elektrokhiimiya*. 1997. Vol. 33. No. 11. P. 1367–1369.
35. Sakhnenko M.D., Ovcharenko O.O., Lyabuk S.I. Physicomechanical properties of Cu- Al_2O_3 electroplating compositions. *Materials Science*. 2015. Vol. 50. Iss. 5. P. 646–652.
36. Artamonov V.P., Zhanzakova I.M. Kompozitsionnoye pokrytie na osnove zheleza [Iron based composite coating]. *Zashchita metallov*. 1992. Vol. 28. No. 3. P. 478–481.
37. Bobonova Zh.I., Michukova N.Yu., Sidel'nikova S.P. Elektroosazhdenie splavov zheleza i kompozitsionnykh pokrytiy na ikh osnove [Electrodeposition of iron alloys and composite coatings based on them]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2000. Vol. 8. No. 2. P. 17–19.
38. Akhmerov O.I., Krinari G.I. Fazoviy sostav i struktura geterofaznykh zhelezovanadiyevykh elektrokhimicheskikh pokrytiy [Phase composition and structure of heterophase iron-vanadium electrochemical coatings]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 1999. Vol. 72. No. 6. P. 947–951.
39. Revenko V.G., Kozlova T.V., Astakhov G.A. Korroziionnoye i elektrokhimicheskoye povedeniye kompozitsionnykh elektroliticheskikh pokrytiy na osnove zheleza [Corrosion and electrochemical behavior of iron-based composite electrolytic coatings]. *Zashchita metallov*. 2003. Vol. 39. No. 1. P. 84–87.
40. Abdullin I.A., Sayfullin R.S. Khimiko-termicheskaya modifikatsiya kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokrytiy s zheleznoy matritsey [Thermochemical modification of composite electrochemical coatings with an iron matrix]. *Zashchita metallov*. 1995. Vol. 31. No. 5.1. P. 541–543.
41. Pidgaychuk S.Ya., Drobot O.S., Yavorska N.M., Mashovets N.S. Vidnovlennia detalei mashyn kombinovanyimi metodami obrobky [Restoration of machine parts by combined processing methods]. *Dynamika, mitsnist ta modeliuvannia v mashynobuduvanni* : tezy dop. II Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 5-8 zhovt. 2020 r. Kharkiv. P. 109–110.
42. Burkat G.K., Dolmatov V.Yu. Poluchenie i svoystva kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokrytiy tsink-almaz iz tsinkatnogo elektrolita [Obtaining and properties of composite electrochemical coatings zinc-diamond from zincate electrolyte]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2001. Vol. 9. No. 2. P. 35–40.
43. Dolmatov V.Yu. Ul'tradispersnye almazy detonatsionnogo sinteza [Ultrafine detonation synthesis diamonds]. SPb. : Izd-vo SPbGPU, 2003. 344 p.
44. Khan T.R., Erbe A., Auinger M., Marlow F., Rohwerder M. Electrodeposition of zinc-silica composite coatings: challenges in incorporating functionalized silica particles into a zinc matrix. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12. Iss. 5. P. 45–56.
45. Khelladi M.R., Mentar L., Boubatra M., Azizi A. Study of nucleation and growth process of electrochemically synthesized ZnO nanostructures. *Materials Letters*. 2012. Vol. 67. Iss. 1. P. 331–333.

46. Galchenko G. Yu. Korozionnostiyki kompozytsiyni tsynkovi elektrolitychni pokryttia [Corrosion-resistant composite zinc electrolytic coatings]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*. 2003. No. 3. P. 107–109.
47. Tseluykin V.N. Kompozitsionnye elektrokhimicheskie pokrytiya: poluchenie, struktura, svoystva [Composite electrochemical coatings: production, structure, properties]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2009. Vol. 45. No. 3. P. 287–301.
48. Kostin N.A. Perspektivy razvitiya impul'snogo elektroliza v gal'vanotekhnike [Prospects for the development of pulse electrolysis in electroplating]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 1992. No. 1–2. P. 16–18.
49. Tseluikin V.N. Composite electrochemical coatings: Preparation, structure, properties. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2009. Vol. 45. P. 312–326.
50. Loubnin E.N., Pimenov S.M., Bletter A. Electroplating of gold-nanodiamond composite coatings. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*. 1999. Vol. 9. No. 4. P. 273–282.
51. Zielonka A., Raub C.J. Gold-titanium nitride dispersion layers. *Metalloberflaeche*. 1995. Vol. 49. Iss. 6. P. 409–412.
52. Bozzini B., Cavallotti P.L., Giovannelli G. Electrokinetic behavior of gold alloy and composite plating baths. *Metal Finishing*. 2002. Vol. 100. Iss. 4. P. 50–60.
53. Burkat G.K., Dolmatov V.Yu. Ul'tradispersnye almazы v gal'vanotekhnike [Ultrafine diamonds in electroplating]. *Fizika tverdogo tela*. 2004. Vol. 46. Iss. 4. P. 685–692.
54. Schutte A., Gray M. Solid material as a function carrier. Nickel-phosphorus dispersion precipitation. *Metalloberflaeche*. 1999. Vol. 53. Iss. 9. P. 41–44.
55. Skopintsev V.D., Karelin A.V., Kotov I.O., Klinskiy G.D. Korrozionnye i fiziko-mekhanicheskie svoystva khimicheskikh kompozitsionnykh pokrytiy [Corrosion, physical, and mechanical properties of chemical composite coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 1998. Vol. 6. No. 3. P. 86–91.
56. Sahayaraj M.E., Jappes J.T.W., Siva I., Rajini N. Investigation on corrosion performance of multilayer Ni-P/TiO₂ composite coating on steel. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2016. Vol. 23. No. 3. P. 309–314.
57. Ekilik G.N. Kontsentratsionnye zavisimosti effekta kombinirovannykh inhibitorov kislotnoy korrozii zheleza [Concentration dependences of the effect of combined iron acid corrosion inhibitors]. *Zashchita metallov*. 2003. Vol. 39. No. 1. P. 34–35.
58. Safavi M.S., Rasooli A. Ni-P-TiO₂ nanocomposite coatings with uniformly dispersed Ni₃Ti intermetallics: Effects of current density and post heat treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 372. P. 252–259.
59. You Y.-H., Gu C.-D., Wang X.-L., Tu J.-P. Electrochemical Preparation and Characterization of Ni-PTFE Composite Coatings from a Non-Aqueous Solution Without Additives. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. Vol. 7. P. 12440–12455.
60. Moonir-Vaghefi S.M., Saatchi A., Hejazi J. Deposition and properties of electroless nickel-phosphorus-molybdenum disulfide composites. *Metal Finishing*. 1997. Vol. 95. Iss. 11. P. 46–52.
61. Dunner, P.H., Hans R. Coatings to reduce the use of machining lubricants. *Galvanotechnik*. 1997. Vol. 88. No. 12. P. 4096–4102.
62. Chou M.C., Ger M.D., Ke S.T., Huang Y.R., Wu S.T. The Ni-P-SiC composite produced by electro-codeposition. *Materials chemistry and physics*. 2005. Vol. 92. No. 1. P. 146–151.
63. Chang, C.S., Hou K.H., Ger M.D., Chung C.K., Lin J.F. Effects of annealing temperature on microstructure, surface roughness, mechanical and tribological properties of Ni-P and Ni-P/SiC films. *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 288. P. 135–143.
64. Hou K.H., Ke S.T., Ger M.D. Ni-P-SiC composite produced by pulse and direct current plating. *Materials chemistry and physics*. 2006. Vol. 100. No. 1. P. 54–59.
65. Ivanov V.V., Balaklay V.I., Shcherbakov I.N. Poluchenie i svoystva kompozitsionnykh pokrytiy na osnove nikelya [Preparation and properties of nickel-based composite coatings]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2015. No. 1. P. 1335–1338.
66. Kolosov V.N., Shevyrev A.A. Elektroliticheskie sverkhprovodyashchie materialy [Electrolytic superconducting materials]. Apatity. : Izd-vo KNTS RAN, 1996. 117 p.
67. Lobanov M.L., Kardonina N I., Rasina N.G., Yurovskikh A.S. Zashitnye pokrytiya : uchebnoe posobie [Protective coverings : textbook] Ekaterinburg : Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2014. 200 p.

Gab Angelina, 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”

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

Kuris Yuri, Chief researcher, Doctor of Technical Sciences, Institute of Engineering Thelophysic NANU, Kyev

Kyrychenko Aleksiy, Head of Department, Candidate of Technical Sciences, Zaporozhe National University

Vodennikova Oksana, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporozhe National University

Volyar Roman, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporozhe National University

COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS BASED ON CHROME, COPPER, ZINC, IRON, TIN, PRECIOUS METALS: OBTAINING, STRUCTURE, PROPERTIES (REVIEW)

One of the ways to improve the metal parts physical and mechanical properties is to deposit complex electrochemical coatings (CEC) onto them. The chromium current yield in the presence of ultrafine diamonds (UFD) is reduced in both standard and self-regulating chroming electrolytes. The microhardness of chromium – UFD CECs decreases compared to pure chromium coatings from 1.03 GPa to 9.06 GPa (standard electrolyte) and from 9.68 GPa to 9.50 GPa (self-regulating electrolyte). Chromium-graphite composite coatings can be used in products operating under dry friction conditions. Self-lubricating chromium-graphite CECs can be obtained if the graphite content in the chromium solution is up to 4 g/L. Cerium dioxide containing chromium coatings deposited in the tetraethylamine presence have a very high wear resistance. The wear resistance and hardness of chromium-based CECs is significantly increased by introducing of silicon or titanium dioxide dispersed particles into the standard chroming electrolyte. The main purpose of copper-based CECs is provision of metal surfaces with wear resistance, heat resistance, and antifrictional properties. Sulfate electrolytes are most often used to obtain copper-based CECs. The UFD particles introduction into the electrolyte up to a concentration from 0.1 to 5.0 g/L does not change the nature and mechanism of the electrode process. The microhardness of coatings deposited from an electrolyte with UFD concentration 5.0 g/L increases almost one and a half times compared to the deposits obtained from the standard electrolyte. The copper – UFD CEC wearing degree is 9–10 times less than that of pure copper. Electrolytic iron coatings are used to restore parts of machines and mechanisms. Zinc-based composite coatings are used to protect steel surfaces from corrosion with simultaneous improvement of their physical and mechanical properties. Silver-based CECs with electrically conductive particles are deposited onto electrical contacts to improve their electrical conductivity.

Keywords: composition coverages, chrome, ultrasuper diamond, graphite, copper, zinc, tin, iron, noble metals, connections of metals

Стаття надійшла: 10.10.2021 р.