

**Андрій Забалуєв¹, Дмитро Ущановський², Георгій Васильєв³, Ольга Лінючева⁴,
Вікторія Воробйова⁵**

¹аспірант кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: koala.zab@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9749-7599>

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: soltdim@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

³доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: g.vasyliiev@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

⁴доктор технічних наук, професор кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o_lin@xtf.kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

ВПЛИВ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОЛІТУ ТА ПРИРОДИ РОЗЧИННИКА НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

Стаття присвячена дослідженню впливу введення легуючого компонента - вольфраму, складу електроліту та природи розчинника на фізико-механічні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю. SEM-дослідження морфології покриттів на основі нікелю показали, що з водних електролітів осаджуються більш дрібнокристалічні покриття ніж з неводних електролітів на основі низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР). Для покриттів зі сплаву нікель-вольфрам, з вмістом вольфраму 14,6 мас.%, електроосаджених з водного цитратного електроліту та нікелевих покриттів осаджених з електроліту на основі НЕР мікротвердість зростає у два рази, а модуль Юнга зростає на 10...20 ГПа у порівнянні з відповідними характеристиками для гальванічних нікелевих покриттів осаджених з електроліту Уотса. На основі методів повторного багаторазового дряпання та безперервного вдавлення та сканування індензором Берковича встановлено, що відповідні покриття також володіють підвищеною зносостійкістю з огляду на найменші осциляційні значення сили тертя та ширину канавок впровадження індензора.

***Ключові слова:** електроосадження; нікелеві покриття; нікель-вольфрамовий сплав; низькотемпературний евтектичний розчинник; мікротвердість; модуль Юнга; супротив до тертя.*

Актуальність теми досліджень. Важливим науково-технічним завданням є осадження гальванічних покриттів із полішеними фізико-механічними характеристиками та корозійною стійкістю. Це, зокрема, може бути досягнуто завдяки підбору та введенню у металеве покриття певних легуючих компонентів та зміною складу електроліту.

Постановка проблеми. Найбільшою твердістю і зносостійкістю серед функціональних гальванічних покриттів володіють хромові. Однак процес електроосадження відповідних покриттів є мало енерго-ефективним. У деяких випадках заміниками хромових покриттів можуть виступати тверді нікелеві покриття. З метою підвищення твердості та зносостійкості у нікелеві покриття можуть вводити легуючі елементи, зокрема, такі як вольфрам чи молібден. У роботах [1,2] показано, що покриття з масовою часткою вольфраму 30...35 мас.% володіють аналогічною мікроструктурою та подібними фізико-механічними властивостями, що і тверді гальванічні хромові покриття. Ще однією перевагою електроосадження нікель-вольфрамових покриттів є набагато вищий вихід за струмом у порівнянні з процесом електроосадження хрому. Це робить нанесення саме Ni-W покриттів більш енергоефективним.

Аналіз останніх досліджень. Електроосадження покриттів із електролітів на основі низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР) – розплавів органічних речовин є

новим напрямком [3-5] і може бути використаним для отримання покриттів із спеціальними властивостями. Зокрема для електроосадження покриттів зі сплаву Ni-Mo, які характеризуються підвищеними твердістю та корозійною стійкістю, застосовуються електrolіти, приготовані на основі НЕР – суміші холін хлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2 М [6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Малочисленими є данні щодо антифрикційних властивостей нікель-вольфрамових покриттів та фізико-механічних властивостей нікелевих покриттів, електроосаджених з неводних розчинників на основі НЕР.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження впливу співосадження вольфраму у гальванічне покриття, складу електроліту та природи розчинника на фізико-механічні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю.

Викладення основного матеріалу. Електроосадження Ni та Ni-W покриттів проводили з цитратного електроліту, вміст основних компонентів якого був аналогічним до приведенного у [7]. Водневий показник електроліту до рівня рН 6,5...8,5 доводили гідроксидом амонію. Також електроосадження нікелевих покриттів проводили із електроліту на основі НЕР холінхлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2. Детально опис приготування електроліту та нанесення покриттів приведений у [8]. Дослідженням фізико механічних характеристик та оцінці зносостійкості підлягали гальванічні нікелеві покриття товщиною 40 мкм, які електроосаджували на прямокутні зразки із сталеві стрічки марки 08кп, товщина стрічки складала 0,5 мм. Склади електролітів та умови процесів електроосадження наведені у табл.1.

Таблиця 1 - Склад електролітів та умови електроосадження гальванічних покриттів

Електроліт Уотса	Цитратний ^{1,2} електроліт нікелювання	Цитратний електроліт для осадження Ni-W покриттів ^{1,2}	Електроліт нікелювання на основі НЕР ^{1,2}	Електроліт нікелювання на основі НЕР з додаванням вольфраму натрію ^{1,2}
Основні компоненти				
NiSO ₄ ·7H ₂ O; NiCl ₂ ·6H ₂ O; H ₃ BO ₃ ;	NiSO ₄ ·7H ₂ O; Na ₃ Cit; NH ₄ Cl; Na ₄ B ₂ O ₇ ;	NiSO ₄ ·7H ₂ O; Na ₂ WO ₄ ; Na ₃ Cit; NH ₄ Cl; Na ₄ B ₂ O ₇	NiCl ₂ ·6H ₂ O C ₆ H ₈ O ₇	NiCl ₂ ·6H ₂ O C ₆ H ₈ O ₇ Na ₂ WO ₄ ;
Розчинник				
дистильована вода	дистильована вода	дистильована вода	розтоп холінхлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2	розтоп холінхлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2
Режим електролізу				
рН 4...4,5; t = 50±3 °С; i = 1 А/дм ²	рН 6,5...8,5; t = 50±3 °С; i = 1 А/дм ²	рН 6,5...8,5; t = 50±3 °С; i = 1 А/дм ²	рН≈7; t = 75±3 °С; i = 1 А/дм ²	рН≈7; t = 75±3 °С; i = 1 А/дм ²

¹ опис складу електролітів згідно [7,8]

² концентрації іонів нікелю та цитрат аніону, а також їх молярні співвідношення є близькими за значенням [8]

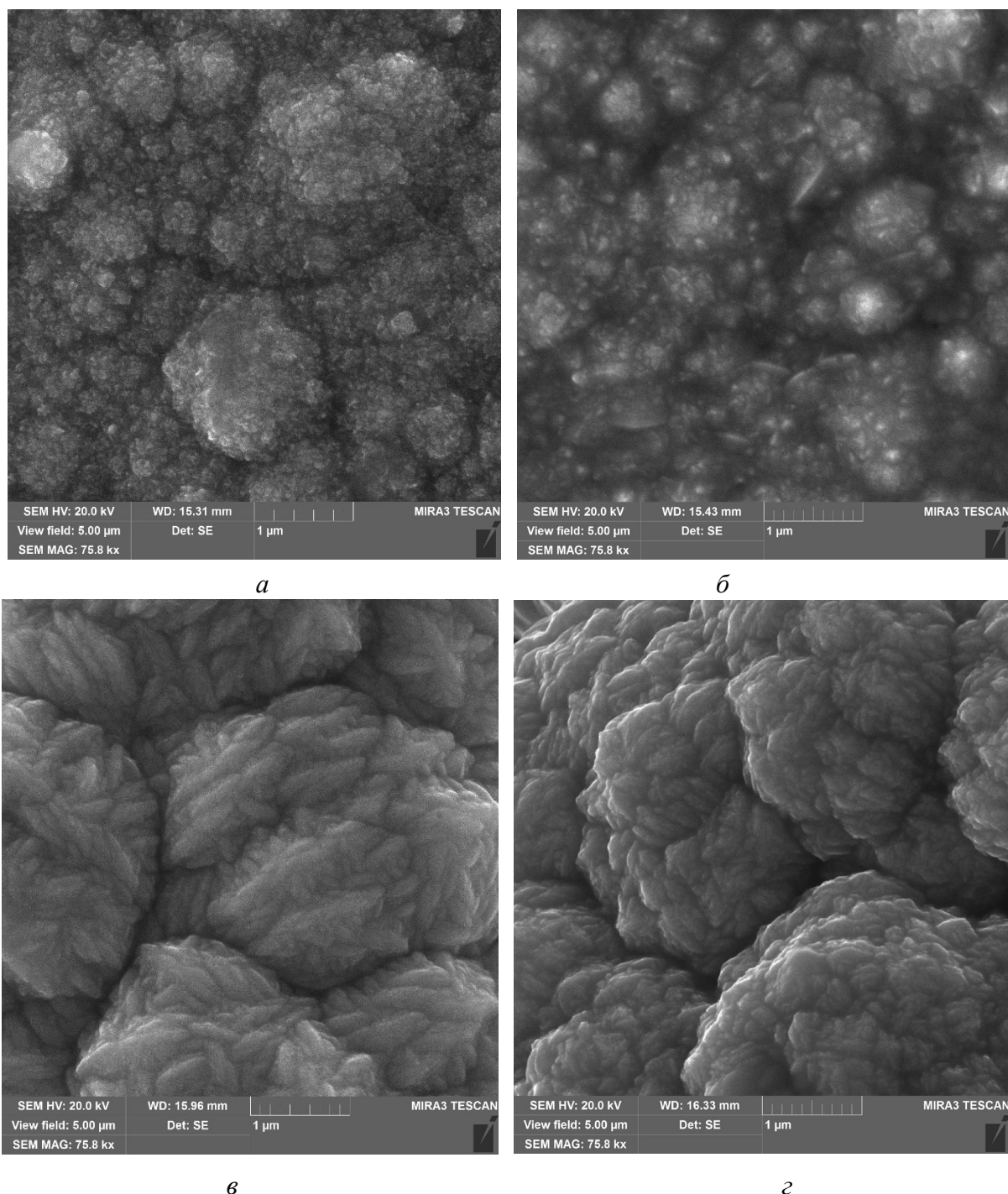


Рис.1. SEM-знімки морфології покриттів на основі нікелю: а, б – нікелевих та зі сплаву нікель-вольфрам (14,6 мас.% W) відповідно, електроосаджених з водних електролітів; в, г – нікелевих, електроосаджених з електролітів на основі НЕР (г – з додаванням вольфраму натрію)

Результати кількісного аналізу складу поверхні електроосаджених нікелевих покриттів, виконані на мікроскопі TESCAN VEGA3, оснащеному EDX аналізатором BRUKER QUANTAX EDS, показали наступне. При електроосадженні нікелевих покриттів з водних цитратних електролітів за густини струму 1 A/дм^2 був досягнутий вміст вольфраму в сплаві 14,6 мас.% [8]. В електролітах на основі НЕР, із вмістом солей нікелю

та вольфраму як у відповідному водному цитратному електроліті, співосадження вольфраму у сплав не було досягнуто. SEM-дослідження морфології покриттів на основі нікелю (рис. 1) свідчать про те, що з водних електролітів осаджуються більш дрібнокристалічні покриття ніж з електролітів на основі НЕР. Це може бути зумовлено зміною характеру контролюючої стадії процесу електроосадження. У водних електролітах може бути контролюючою стадія розряд комплексного іона, а у електролітах на основі НЕР – стадія доставки іонів металу до поверхні катода через більшу в'язкість електроліту. В обох випадках введення вольфрамат іонів у електроліт призводить до утворення більш дрібнокристалічної структури покриття. Зокрема, для водних електролітів, осадження більш дрібнокристалічних покриттів сплавом Ni-W супроводжується меншою перенапругою електроосадження ніж для чисто нікелевих покриттів [8]. Це пояснюється меншою енергією активації утворення відповідної більш щільно упакованої та дрібнокристалічної структури сплаву, у порівнянні з чистим нікелем [1,2].



Рис.2. Фотозображення розміщених для випробувань зразків

Мікромеханічні випробування електроосаджених нікелевих покриттів проводилися на універсальному мікротвердомірі-скречтестері "Micron-gamma" [9] методами безперервного вдавлення і дряпання індентором. "Micron-gamma" складається з двокординатного моторизованого предметного столу, що переміщається зі швидкістю 20 $\mu\text{m/s}$, електромагнітного навантажувача індентора з максимальним зусиллям, що розвивається, 450 гс і датчиків нормального і тангенціального переміщень індентора з нанометричним дозволом. Для прицільного позиціонування індентора та аналізу відбитків використовується вбудований цифровий мікроскоп з роздільною здатністю 5 Мр. При цьому зразки із покриттям розташовувались та фіксувались за допомогою двостороннього скотчу на пластині з нержавіючої сталі, як це показано на рис.2.

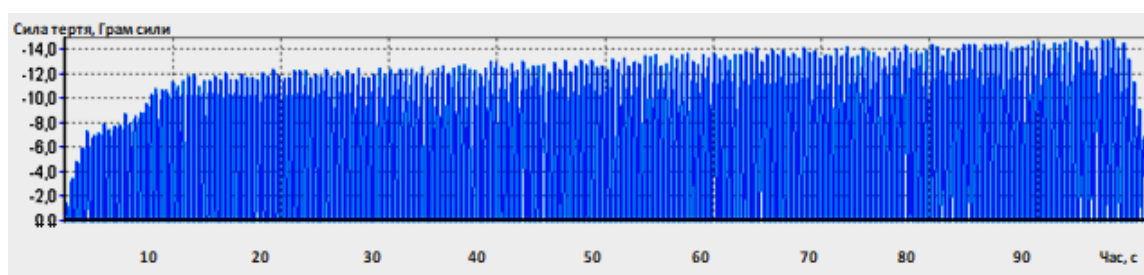
Мікромеханічні характеристики, такі як мікротвердість і модуль Юнга, вимірювалися методом вдавлювання індентора Берковича за постійної швидкості навантаження 5 гс/с з автоматичною реєстрацією навантаження на індентор та глибини його впровадження. При цьому максимальне навантаження складало 50 гс. Методичні основи визначення твердості та модуля пружності за діаграмами впровадження базуються на методі Олівера-Фара [10] прийнятого як міжнародний стандарт (ISO/FDIS 14577-1: 2002). Результати проведених вимірювань мікротвердості та модулю Юнга для гальванічних нікелевих покриттів представлені у табл.1.

Таблиця 1 – Мікромеханічні характеристики гальванічних покриттів на основі нікелю

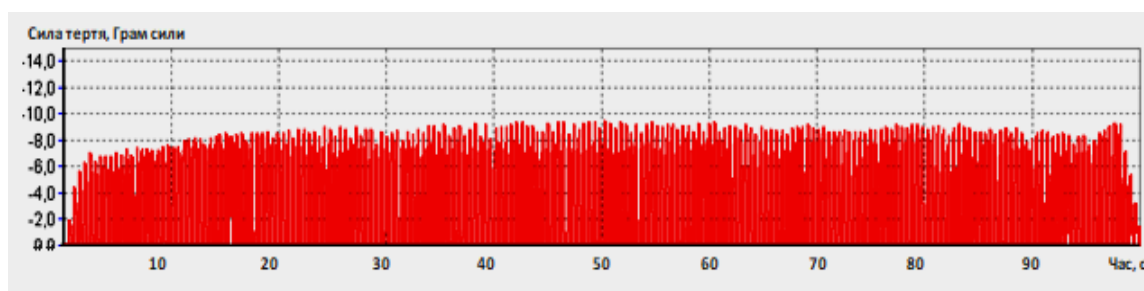
Нікелеве покриття отримане з електроліту Уотса		Нікелеве покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікель-вольфрамове покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікелеве покриття, отримане з електроліту на основі НЕР		Нікелеве покриття, отримане з електроліту на основі НЕР з додаванням вольфраму натрію	
НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа
3,6	170	6	180	8	180	7	150	встановити не вдалось	встановити не вдалось

Як видно з табл.1, у порівнянні з еталонними зразками гальванічних нікелевих покриттів електроосаджених з електроліту Уотса, мікротвердість нікелевого покриття, осадженого з водного цитратного електроліту, є у 1,7 разів вища, а модуль Юнга, відповідно, вищий на 10 ГПа. Для покриттів зі сплаву нікель-вольфрам електроосаджених з цитратного електроліту, з вмістом вольфраму 14,6 мас.%, мікротвердість зростає у 2,2 рази, а модуль Юнга зростає на 10 ГПа. Для нікелевих покриттів, осаджених з електроліту на основі НЕР, мікротвердість є більшою майже у 2 рази, модуль Юнга при цьому навпаки є меншим на 20 ГПа. Отримані зміни фізико-механічних властивостей можуть бути пов'язані із відмінністю кристалічної структури, а саме, з цитратних електролітів осаджуються покриття з більш дрібнокристалічною і щільно упакованою структурою металевих осаду ніж з електроліту Уотса. Додаткове ущільнення та формування ще більш дрібнокристалічної структури покриття досягається за рахунок введення вольфраму (рис.1) в структуру нікелевого покриття, що також сприяє додатковому підвищенню мікротвердості. В електроліті нікелювання на основі НЕР більша твердість покриття може бути пояснена включенням в структуру покриття молекул органічних речовин – компонентів розчинника і, за рахунок цього, видозміною кристалічної структури з утворенням дислокацій. Введення у електроліт нікелювання на основі НЕР хоча і сприяє деякому подрібненню кристалічних зерен (рис.1), проте, призводить до осадження крихких покриттів, мікротвердість та модуль Юнга для яких встановити не вдалось. Надалі їхні властивості не досліджували.

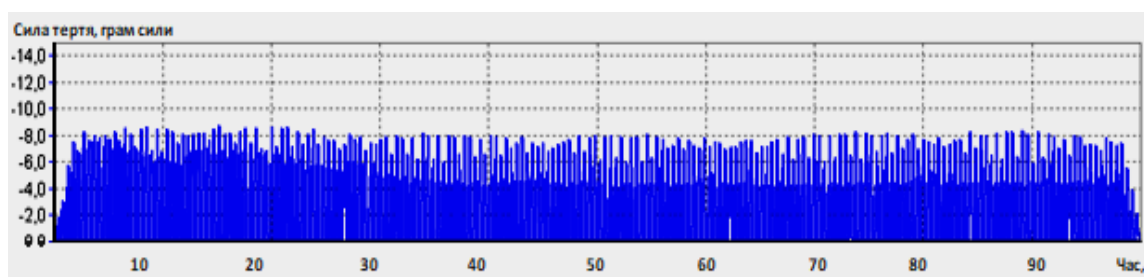
Оцінка здатності гальванічних покриттів щодо спротиву до механічного тертя здійснювалась методом повторного багаторазового дряпання індентором Берковича при постійному навантаженні 50 гс і швидкості переміщення 20 мкм/с. При отриманні циклічних залежностей зміни сили тертя у часі використовувався індентор із радіусом закруглення 30 мкм, яким здійснювалось 2 зворотно-поступальні коливання в секунду. Час випробування 100 с. Результати проведених досліджень представлені на рис.3.



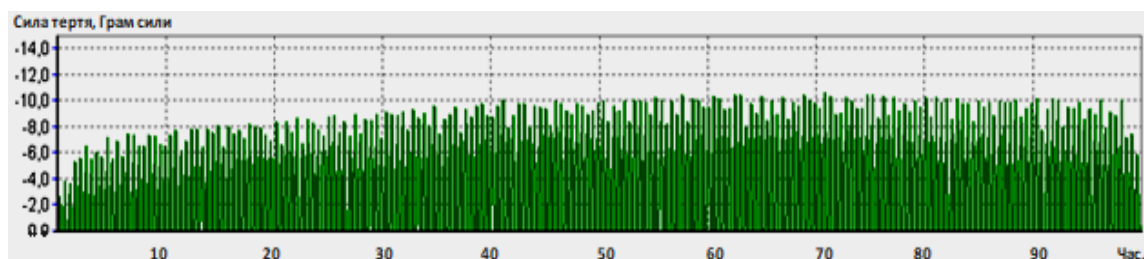
а



б



в



г

Рис. 3. Діаграма залежності зміни в часі сили тертя при циклічному навантаженні для сталевих зразків із гальванічними покриттями: а) нікелевого, електроосадженого з електроліту Уотса; б) нікелевого, електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; в) нікель-вольфрамового (15 мас.% Вольфраму), електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; г) нікелевого, електроосадженого з електроліту на основі НЕР

Аналізуючи дані наведені в табл. 1 та на рис.3. можна прийти до наступних висновків. Для досліджуваних зразків із покриттями чим більшим є значення мікротвердості, тим менших значень набуває сила тертя на діаграмах. Відповідно найменші значення сили тертя спостерігаються для нікель-вольфрамових покриттів (осаджених з водного цитратного електроліту) та покриттів нікелем отриманих з електроліту на основі НЕР (рис.3 в, г).

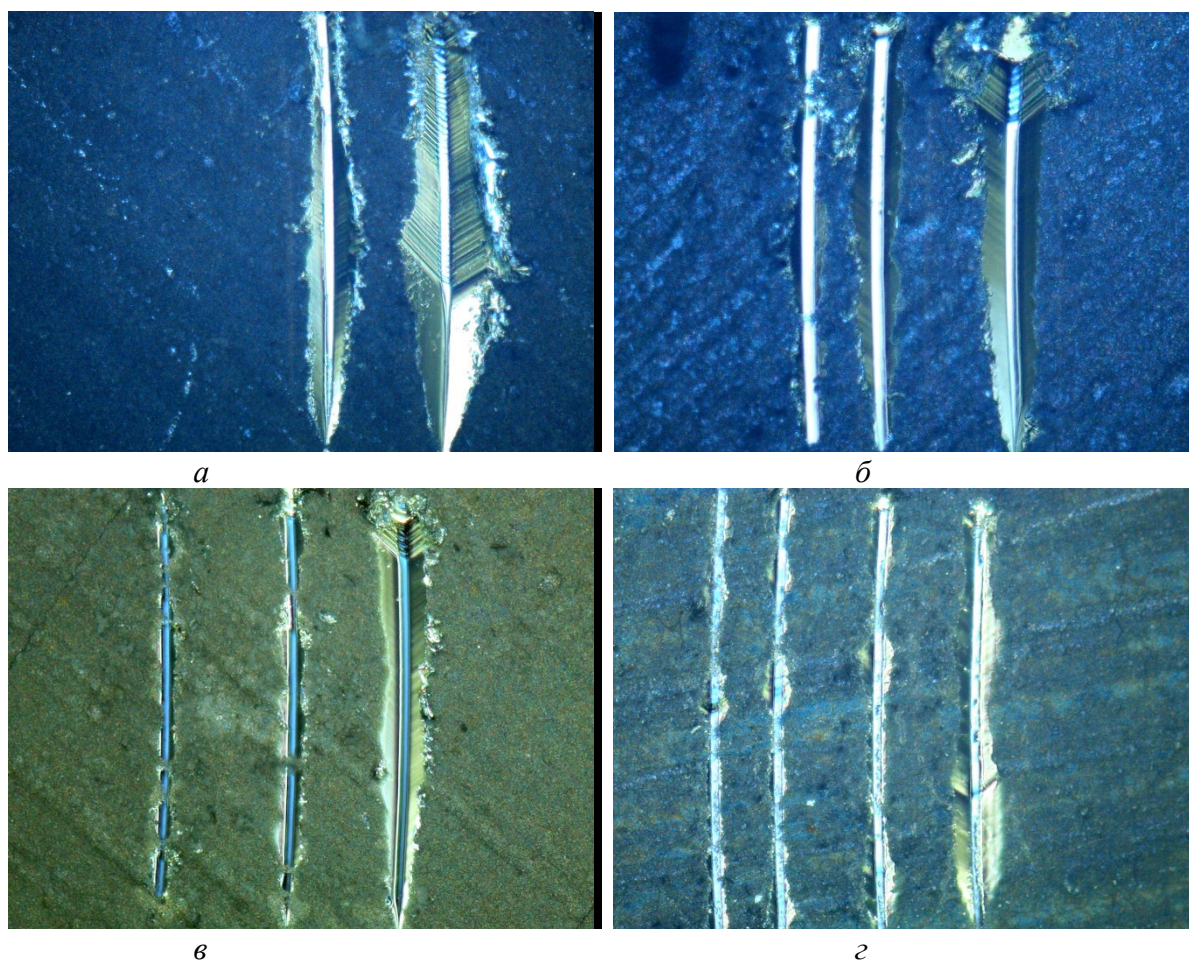


Рис.4. Фотозображення канавок безперервного вдавлювання і сканування індентора Берковича для сталевих зразків із гальванічними покриттями (зліва більш тонкі канавки - навантаження 20 гс, справа більш широка одна канавка - відповідно навантаження 50 гс): а) нікелевого, електроосадженого з електроліту Уотса; б) нікелевого, електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; в) нікель-вольфрамового (14,6 мас.% Вольфраму), електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; г) нікелевого, електроосадженого з електроліту на основі НЕР

Також у даній роботі проводили порівняльну оцінку спротиву до механічного зношування зразків з нікелевими покриттями методами безперервного вдавлювання та сканування індентором на приладі "Micron-gamma", за допомогою індентора Берковича. Режим сканування: величина навантаження на індентор – 20 та 50 гс; швидкість навантаження – 5 гс/с; швидкість сканування – 40 мкм/с. Довжина траси близько 1 мм. Фактично супротив до механічного зношення або зносостійкість можна опосередковано оцінити на основі порівняння ширини траси або канавки, яку залишає на поверхні металу після себе індентор. Чим вужчою є канавка, тим вищою є відповідно зносостійкість покриття. Відповідні мікрофотографії канавок після індентора Берковича приведені на рис.4, усереднені значення їх товщини у табл. 2.

Таблиця 2 – Дослідження покриттів методом безперервного вдавлювання та сканування індентором Берковича

Нікелеве покриття отримане з електроліту Уотса		Нікелеве покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікель-вольфрамове покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікелеве покриття, отримане з електроліту на основі НЕР	
Ширина канавки впровадженні індентора при відповідному навантаженні, мм							
20 гс	50 гс	20 гс	50 гс	20 гс	50 гс	20 гс	50 гс
0,12±0,02	0,18±0,03	0,08±0,02	0,13±0,03	0,05±0,01	0,1±0,02	0,06±0,01	0,1±0,02

Як видно з рис.4 та табл. 2. найменша ширина канавок яку залишає індентор, що особливо помітно при навантаженні 20 гс, спостерігається для нікель-вольфрамових покриттів (осаджених з водного цитратного електроліту) та покриттів нікелем отриманих з електроліту на основі НЕР. З огляду на вищенаведені результати мікромеханічних та трибологічних досліджень можна стверджувати, що відповідні зразки покриттів також володіють найбільшою мікротвердістю і зносостійкістю серед інших досліджуваних в даній роботі.

Висновки. Встановлено, що склад електроліту в значній мірі впливає на мікромеханічні та антифрикційні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю. Впровадження в структуру покриття вольфраму (14,6 ма.%) та використання електроліту на основі низькотемпературних евтектичних розчинників сприяє майже двократному підвищенню мікротвердості гальванічного нікелевого покриття, що також супроводжується підвищенням зносостійкості. Це може бути пояснено видозміною морфології та кристалічної структури покриття через включення в структуру легуючого компонента (W) або органічних молекул у випадку неводного електроліту на основі низькотемпературного евтектичного розчинника.

Список використаних джерел

1. Zhong, Z. Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications / Z. Zhong, S. J. Clouser // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 240. – P. 380-386.
2. The heat treatment effect on the structure and mechanical properties of electrodeposited nano grain size Ni–W alloy coatings / K. Hou, Y. Chang, S. Chang, C. Chang // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518. No. 24. – P. 7535-7540.
3. Electrodeposition of polyfunctional Ni coatings from deep eutectic solvent based on choline chloride and lactic acid / D. Uschapovskiy, V. Vorobyova, G. Vasyliiev, O. Linucheva // J. Electrochem. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 12. No. 5. – P. 1025-1039.
4. Abbott, A. P. Bright metal coatings from sustainable electrolytes: the effect of molecular additives on electrodeposition of nickel from a deep eutectic solvent / A. P. Abbott, et al. // Phys. Chem. – 2017. – Vol. 19. – P. 3219-3231.
5. Winiarski J. Ni/ cerium Molybdenum Oxide Hydrate Microflakes Composite Coatings Electrodeposited from Choline Chloride: Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent / J. Winiarski, et al. // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 924-941.
6. Investigation of Ni-Mo and Co-Mo alloys electrodeposition involving choline chloride based ionic liquids / S. Costovici, A.-C. Manea, T. Visan, L. Anicai // Electrochimica Acta. – 2016. – Vol. 207. – P. 97-111.
7. Study on mechanical and anticorrosion performance of NiW alloy coatings prepared by induced codeposition / Y. Hu, Y. Yu, H. Ge, G. Wei, L. Jiang // Int. J. Electrochem. Sci. – 2019. – Vol. 14. – P.1649-1657.

8. Вплив природи розчинника на електроосадження Ni та Ni-W покриттів / Д. Ю. Ущаровський, А. С. Забалуйев, В. І. Воробйова, Г. С. Васильєв, О. В. Лінючева // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Т.34 (73) . – № 2. – С. 46-51.

9. Игнатович, С. Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев, Д. И. Борисов // Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 132-139.

10. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – No. 7. – P. 1572.

References

1. Zhong, Z., Clouser, S.J. (2014). Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications. *Surface and Coatings Technology*, 240, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.059>

2. Hou, K., Chang, Y., Chang, S., Chang, C. (2010). The heat treatment effect on the structure and mechanical properties of electrodeposited nano grain size Ni–W alloy coatings. *Thin Solid Films*, 518(24), 7535–7540. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.041>

3. Uschapovskiy, D., Vorobyova, V., Vasyliiev, G., Linucheva, O. (2022). Electrodeposition of polyfunctional Ni coatings from deep eutectic solvent based on choline chloride and lactic acid. *J. Electrochem. Sci. Eng.*, 12(5), 1025–1039. <https://doi.org/10.5599/jese.1451>

4. Abbott, A. P., et al.(2017). Bright metal coatings from sustainable electrolytes: the effect of molecular additives on electrodeposition of nickel from a deep eutectic solvent. *Phys. Chem*, 19, 3219–3231. <https://doi.org/10.1039/C6CP08720E>

5. Winiarski, J., et al. (2020). Ni/cerium Molybdenum Oxide Hydrate Microflakes Composite Coatings Electrodeposited from Choline Chloride: Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent. *Materials*, 13, 924–941. <https://doi.org/10.3390/ma13040924>

6. Costovici, S., Manea, A.-C., Visan, T. (2016). Anicai L. Investigation of Ni-Mo and Co-Mo alloys electrodeposition involving choline chloride based ionic liquids. *Electrochimica Acta*, 207, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.04.173>

7. Hu, Y., Yu, Y., Ge, H., Wei, G., Jiang, L. (2019). Study on mechanical and anticorrosion performance of NiW alloy coatings prepared by induced codeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 14, 1649–1657. <http://www.electrochemsci.org/papers/vol14/140201649.pdf>

8. Uschapovskyi, D.Yu., Zabaluyev, A.S., Vorobyova, V.I., Vasiliev, G.S., Linyucheva, O.V. (2023). Influence of the solvent nature on the electrodeposition of Ni and Ni-W coatings. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 34(73), 2, 46–51. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/09>

9. Ignatovich, S.R., Zakiyev, I.M., Borisov, D.I. (2006). Assessment of damage to the surface layer of materials under cyclic loading using nanoindentation and nanosclerometry methods. *Problems of strength*, 4, 132-139. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/47795>

10. Oliver, W.C., Pharr, G.M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, 7, 1564–1583. <https://link.springer.com/article/10.1557/JMR.1992.1564>

Отримано 20.09.2023

**Andrii Zabaluyev¹, Dmytro Uschapovskiy², Georgy Vasiliev³, Olga Linyucheva⁴,
Viktoriya Vorobyova⁵**

¹ PhD Student, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: koala.zab@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9749-7599>

² PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: soltdim@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

³ Doctor in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: g.vasilyev@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

⁴ Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: o_lin@xtf.kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

⁵ PhD in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Physical Chemistry Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

INFLUENCE OF THE ELECTROLYTE COMPOSITION AND THE SOLVENT NATURE ON THE PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF NICKEL-BASED GALVANIC COATINGS

Electrodeposition of galvanic coatings with improved physical-mechanical characteristics and corrosion resistance is an important scientific and technical task. In order to increase hardness and wear resistance, alloying elements, in particular, tungsten or molybdenum, can be introduced into nickel coatings.

The purpose of this investigation is to study the influence of the introduction of the alloying component, the composition of the electrolyte and the nature of the solvent on the physical and mechanical properties of galvanic coatings based on nickel.

SEM studies of the morphology of nickel-based coatings showed that crystalline coatings are deposited more finely from aqueous electrolytes than from non-aqueous electrolytes based on deep eutectic solvents (DES). For coatings based on nickel-tungsten alloy with a tungsten content of 14.6 wt.%, electrodeposited from an aqueous citrate electrolyte and nickel coatings deposited from an electrolyte based on DES, the microhardness increases twice, and the Young's modulus increases by 10...20 GPa compared to appropriate characteristics for galvanic nickel coatings deposited from Watts electrolyte. Based on the methods of repeated multiple scratching and continuous indentation and scanning with a Berkovich indenter, it was established that the corresponding coatings also have increased wear resistance. This is indicated by the smallest oscillating values of the friction force and the width of the indenter introduction grooves.

Keywords: electrodeposition; nickel coatings; nickel-tungsten alloy; low-temperature eutectic solvent; microhardness; Young's modulus; wear resistance.