

УДК 621.357

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/23>**Забалуєв А.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Ущановський Д.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воробйова В.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Васильєв Г.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лінючева О.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ, МЕХАНІЧНІ ТА КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

У статті досліджено електрохімічні характеристики, механічні та каталітичні властивості покриттів на основі нікелю отриманих із водних електролітів на основі низькотемпературного евтектичного розчинника – реліну. Доведено формування реліну на основі ІЧ-спектроскопічних досліджень, проведених за допомогою Bruker Tensor II спектрометра.

На основі потенціодинамічних вольт-амперних вимірювань, при дослідженні електроосадження нікелевих покриттів, показано, що основним фактором впливу на перенапругу виділення металу є температура. Виявлено, що збільшення швидкості сканування потенціалу не призводить до виникнення чітко виражених максимумів граничного струму притаманних контролюючій дифузійній стадії. Це, з одного боку, може бути пов'язане із маскуючим впливом побічного процесу виділення водню. З іншого боку, це може бути наслідком переважаючого контролю стадії дисоціації комплексних іонів на основі нікелю. Відсутність вираженого максимуму граничної густини струму є притаманним як водним цитратним, так і електролітам нікелювання на основі реліну.

Встановлено, що найменша швидкість корозії та найбільша мікротвердість очікувано спостерігається для нікелевих та нікель-вольфрамівих покриттів отриманих з водного цитратного електроліту.

У статті виявлено, що покриття отримані з електроліту на основі низькотемпературного евтектичного розчинника є корозійно нестабільними в хлоридному середовищі. Порівняно високі швидкості корозійного руйнування можуть пояснюватись особливостями кристалічної структури, наявністю тріщин та продуктів розкладу електроліту на основі НЕР в покритті.

Показано, що найменша перенапруга виділення водню спостерігається на покриттях, отриманих з електролітів на основі НЕР – реліну. Це, є наслідком, формування покриттів із нановпорядкованою та високорозвинутою структурою поверхні.

Ключові слова: покриття на основі нікелю, низькотемпературний евтектичний розчинник, діаграми впровадження, мікротвердість, корозійна стійкість, електрокаталітичні властивості.

Постановка проблеми. Гальванічні нікелеві покриття з огляду на ряд особливих властивостей набувають широкого застосування у промисловості. Технологічні параметри процесу електро-

лізу та склад електроліту в значній мірі можуть визначати фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики відповідних покриттів. Більшість використовуваних технологічних процесів

нанесення гальванічних покриттів включають використання добре вивчених водних розчинів електролітів [1–3]. Новітнім напрямком у гальванотехніці є використання електролітів на основі неізохотемпературних евтектичних розчинників (НЕР), які являють собою продукт взаємодії органічних сполук за донорно-акцепторним механізмом. У разі дисоціації молекул на іони такі розчинники у розплавленому стані ще називають іонними рідинами, через схожість їх фізико-хімічних властивостей із розплавами солей [4]. Однак комплекс властивостей гальванічних покриттів отримуваних з електролітів на основі НЕР є маловивченим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою покращення фізико-хімічних властивостей покриття на основі нікелю легують молібденом та вольфрамом. Це призводить також до покращення корозійної стійкості покриттів на основі нікелю [5]. При цьому, наприклад, електроосадження Ni-W покриттів, може бути більш економічно вигідним через набагато вищу струмову ефективність у порівнянні з процесом гальванічного хромування (55...65 % для Ni-W [5], проти 13...18 % для хрому [3]). Електроосадження покриттів із електролітів на основі НЕР протягом останнього часу зайняло трендовий напрям в галузі гальванотехніки [6–8]. Зокрема, для електроосадження нікелевих покриттів та покриттів сплавом нікель-молібден застосовуються електроліти, приготовані на основі НЕР – суміші холін хлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2 М [9]. Однак, беручи до уваги саме комплекс поліфункціональних властивостей, важливим є проведення порівняльних досліджень процесів електроосадження покриттів одночасно за багатьма параметрами. Це дозволить підвищити керованість процесу та виокремити галузь можливого застосування відповідних покриттів.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є проведення комплексу порівняльних досліджень фізико-хімічних та механічних властивостей гальванічних покриттів на основі нікелю отриманих з водних електролітів та з електролітів на основі низькотемпературних евтектичних розчинників. Це, зокрема, дасть змогу оцінити перспективи впровадження та можливість удосконалення класичних технологій гальванотехніки.

Виклад основного матеріалу. Експериментальна частина. Електроосадження нікелевих та нікель-вольфрамових покриттів проводили з водного цитратного електроліту. Електроліт для

нанесення покриттів сплавом Ni-W містив 0,75 М $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 0,5 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ і 0,07 М Na_2WO_4 . Додатково електроліт містив до 1 М хлориду амонію та 0,2 М тетраборату натрію. Водневий показник електроліту до рівня pH 6,5...8,5 доводили гідроксидом амонію. Для порівняння властивостей також отримували нікелеві покриття з електроліту Уотса [10, 11].

Також електроосадження нікелевих покриттів проводили із електроліту на основі низькотемпературної евтектичної суміші холін хлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2. Приготування електроліту здійснювали наступним чином. Холін хлорид та карбамід при температурі 80 °C підігрівали на водяній бані до утворення розтопу [10, 11]. За допомогою інфрачервоної спектроскопії отриману суміш аналізували на утворення відповідної евтектичної сполуки. Отримана за допомогою Bruker Tensor II спектрограма представлена на рис. 1.

Приведена на рис. 1 ІЧ-спектрограма підтверджує утворення низькотемпературного евтектичного розчину завдяки водневим зв'язкам між компонентами системи (карбамід-холін-хлоридом). Це видно з характерних піків для груп O-H, N-H і C=O, а також зі зміщення їх частот, що свідчить про специфічні взаємодії у НЕР. Широки смуги у високочастотному регіоні свідчать про складну мережу водневих зв'язків у системі, що є характерним для НЕР. Зміщення основних характеристичних піків свідчить про взаємодію між карбамідом, холін-хлоридом і хлорид-іоном, що підтверджує утворення НЕР. Інтенсивність смуг для C=O і N-H демонструє стабільність зв'язків у евтектичній системі. Широка смуга в діапазоні 3300–3500 cm^{-1} відповідає валентним коливанням аміногруп (N-H). Ця широка смуга свідчить про наявність водневих зв'язків у системі. Смуга в області 3200–3400 cm^{-1} (з перекриттям зі смугою N-H) також вказує на валентні коливання O-H групи холіну, які беруть участь у водневих зв'язках. Невеликі піки в області 2800–3000 cm^{-1} відповідають валентним коливанням C-H у метиленових ($-\text{CH}_2-$) і метильних ($-\text{CH}_3$) групах холіну. Смуга в діапазоні 1650–1700 cm^{-1} відповідає валентним коливанням карбонільної групи (C=O) у карбаміді. Її зсув вказує на взаємодію з хлорид-іоном і водневими зв'язками. Смуги в діапазоні 1300–1600 cm^{-1} відповідають деформаційним і валентним коливанням C-N зв'язків, характерних для сечовини та холіну. Смуга в області 400–600 cm^{-1} може відповідати асоціації хлорид-іона з іншими компонентами НЕР.

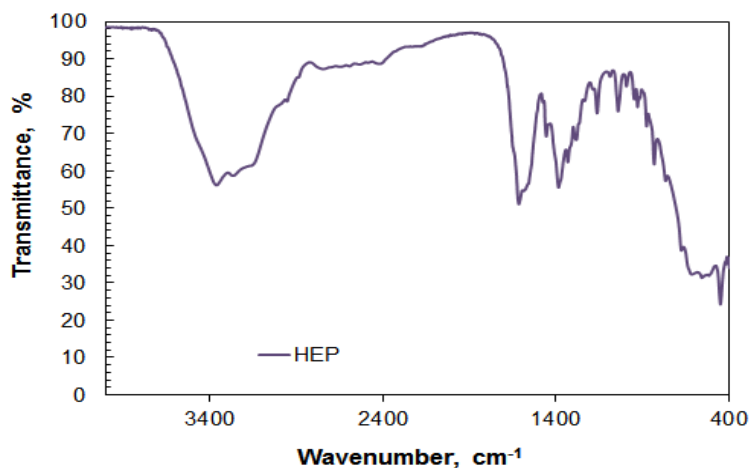


Рис. 1. ІЧ-спектроскопічне підтвердження утворення НЕР на основі холін-хлориду та карбаміду

Після отримання розплаву з НЕР у нього вводили 0,75 М $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 0,5 М лимонної кислоти. З метою дослідження можливості електроосадження нікелевих покриттів легованих вольфрамом в отриманий електроліт додатково 0,07 М вводили вольфрамат Na_2WO_4 . Дослідна температура при електроосадженні становила 75 °С. З метою порівняння процесів електроосадження нікелевих покриттів в електролітах на водній основі та на основі НЕР молярні концентрації солей нікелю та вольфраму були однаковими. Більш детально методика електроосадження описана в [10]. За даними кількісного аналізу складу поверхні електроосаджених нікелевих покриттів, виконаних на мікроскопі TESCAN VEGA3, оснащеному EDX аналізатором BRUKER QUANTAX EDS, було встановлено наступне. При електроосадженні нікелевих покриттів з водних цитратних електролітів за густини струму 1 А/дм² був досягнутий вміст вольфраму в сплаві 14,6 мас.%. При дослідженні електролітів на основі НЕР введення вольфрамату натрію не призвело до включення вольфраму в покриття [10, 11].

З метою дослідження механізму катодного процесу проводили поляризаційні вимірювання. Для цього застосовували цифровий потенціостат VersaStat3 2 AMP. Отримання катодних поляризаційних кривих проводили у потенціодинамічному режимі за швидкостей сканування потенціалу 1...100 мВ/с. Вольт-амперні криві отримували з використанням триелектродних комірок, робочим електродом слугував нікелевий циліндричний стрижень запресований у тефлон. Допоміжним електродом слугувала пластина з електролітичної нікелевої фольги марки

Н0, електродом порівняння – насичений хлор срібний електрод. При знятті поляризаційних кривих у неводному електроліті на основі НЕР, через малу провідність середовища, електродом порівняння слугувала срібна дрітина, яку в поліпропіленовому капілярі розташовували безпосередньо в дослідній комірці. Потенціал срібної дротини додатково вимірювали відносно насиченого хлор-срібного електрода порівняння [10]. У даній роботі всі електродні потенціали приведені в шкалі насиченого хлор-срібного електрода порівняння.

Спочатку у водних розчинах були проведені дослідження впливу температури на процес електроосадження нікелю. Як і очікувалось, зі збільшенням температури катодна поляризація зменшуються, а нахили катодних кривих зростає (рис. 2). З отриманих поляризаційних кривих видно, що збільшення температури очікувано призводить до зростання струму на поляризаційних кривих і, відповідно, до зменшення перенапруги катодного процесу. Було помічено, що осаді нікелю, отримані на катоді при температурі 20 °С, були напруженими, тріскались і відшаровувалися від поверхні катода. Осаджені при 70 °С осаді були грубокристалічними і темними. Найбільш якісні світлі і дрібнокристалічні осаді нікелю та нікель-вольфрамового сплаву були отримані при температурі 50 °С. Саме цю температуру осаження із водних електролітів було обрано для подальших досліджень властивостей осадів на основі нікелю.

З метою вивчення механізму катодного процесу у досліджуваних розчинах були отримані катодні потенціодинамічні криві при різній швидкості сканування потенціалу (рис. 3). Як видно із відповідного рисунку, зі збільшенням швид-

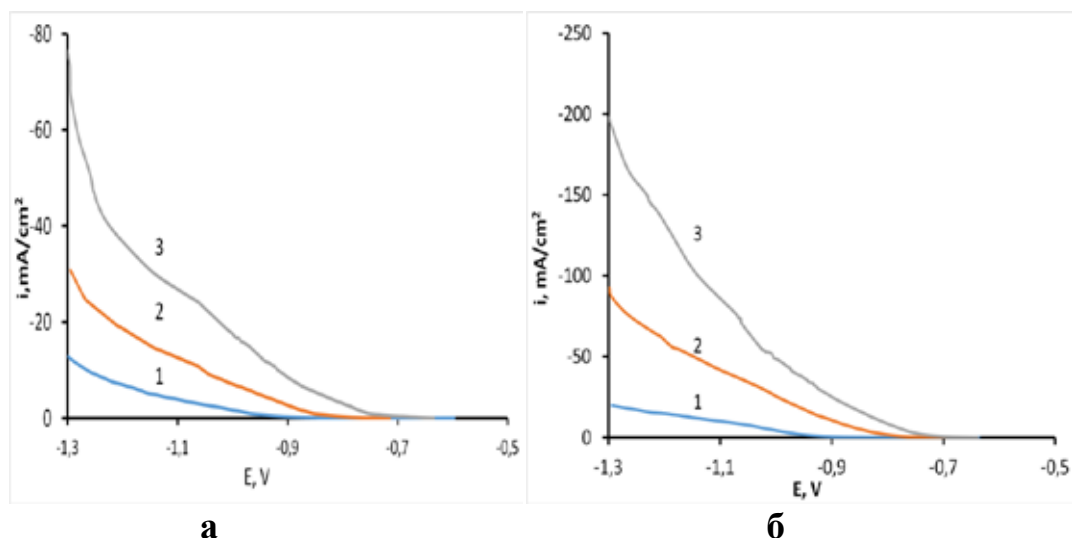


Рис. 2. Вплив температури на катодні поляризаційні криві електроосадження Ni (а) та Ni-W сплаву (б), швидкість сканування потенціалу 1 мВ/с, температура, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 70

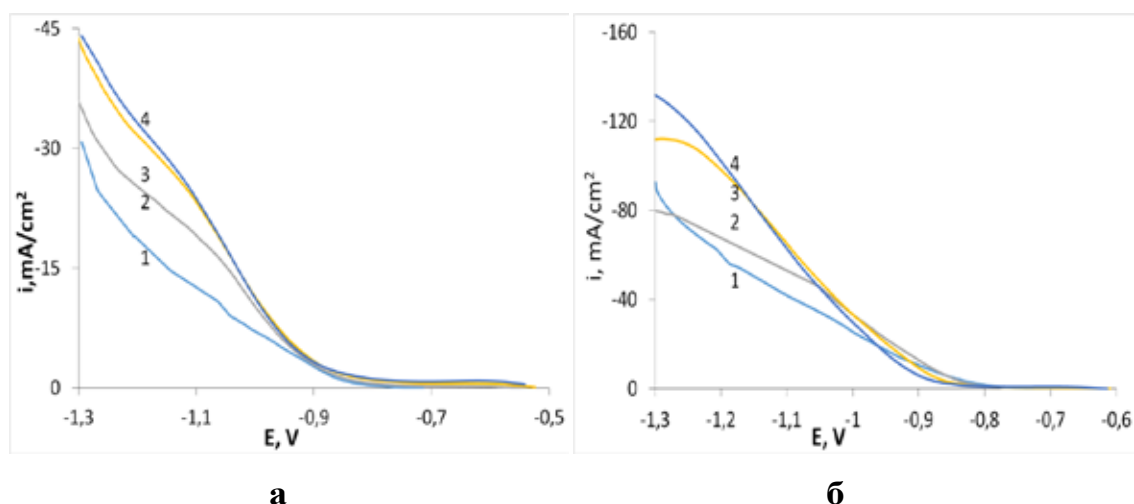


Рис. 3. Вплив швидкості сканування потенціалу на катодні поляризаційні криві електроосадження Ni (а) та Ni-W сплаву (б) за температури 50 °С, швидкість сканування потенціалу, мВ/с: 1 – 1; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100

кості розгортки нахил катодної кривої збільшується. Однак на поляризаційних кривих як для осадження нікелю, так і для нікель-вольфрамового сплаву, в цитратних електролітах чітко вираженого граничного струму із максимумом не спостерігається. Причиною цього може бути інтенсивне виділення водню в області потенціалів, від'ємніших за -1,0 В, що відбувається паралельно із електроосадженням нікелю та нікель-вольфрамового сплаву. Таким чином, отримані результати свідчать про те, що не можна однозначно говорити про переважну стадію доставки комплексних іонів нікелю до поверхні катода. Більш вірогідно, що саме їх подальша адсорбція та дисоціація комплексних іонів визначають загальну швидкість катодного процесу. Також

з рис. 2 та 3 видно, що значення катодних густин струму на кривих осадження сплаву нікель-вольфрам є вищими ніж для електроосадження чистого нікелю. З одного боку, це пов'язано особливостями процесу сплавоутворення при електроосадженні [10], з іншого боку, відомо [12], що нікель-вольфрамові сплави є більш каталітично активними щодо процесу виділення водню. Відповідно, цей побічний процес на сплаві перебігає більш інтенсивно, особливо в області високих значень катодного потенціалу.

Осадження нікелю з електроліту на основі НЕР проводили за температури 75 °С. Отримані при різних швидкості сканування потенціалу поляризаційні криві приведені на рис. 4. При проведенні поляризаційних вимірювань різниця між ходом

катодної поляризаційної кривої для електролітів на основі НЕР з додаванням та без вольфрамату натрію була мінімальною і візуально малопомітною. Це пояснює поміченим раніше явищем відсутності впровадження вольфраму в сплав у відповідних системах [10, 11].

Як видно з рис. 4, на поляризаційних кривих в інтервалі потенціалів $-0,5 \dots -0,75$ В спостерігається чітко виражений граничний струм першої хвилі катодного процесу, який зростає зі збільшенням швидкості розгортки. Проте, за умови найменшої швидкості розгортки 1 мВ/с, яка відповідає стаціонарним умовам електроосадження, відповідна хвиля майже не спостерігається. Це вказує на те, що першочерговим може відбуватися електрохімічне перетворення самого НЕР, що узгоджується із встановленим порівняно невисоким виходом за струму нікелю на рівні 60% [10]. Таким чином, аналогічно водному розчину, контроль катодного процесу не є дифузійним. Хоча, через підвищену в'язкість електроліту на основі НЕР рухомість катіонів металу є набагато нижчою ніж у водному розчині. Проте, іони нікелю теж можуть досить міцно зв'язуватись у комплексні сполуки компонентами НЕР, руйнація зв'язків та дисоціація комплексу може бути переважаючою, подібно до водних цитратних електролітів.

Визначення швидкості корозії та каталітичної активності. Дослідження проводили із застосуванням зразків гальванічних покриттів нікелем товщиною 20 мкм, нанесених на сталеву основу. На основі знятих катодних та анодних поляризаційних кривих в корозійному серед-

овищі здійснювали побудову корозійних діаграм у напівлогарифмічних координатах (перенапруг – логарифм десятковий від густини струму). Катодні та анодні криві на досліджуваних зразках знімали у $3,5\%$ розчині хлориду натрію за температури 18°C . Швидкість сканування потенціалу становила 2 мВ/с. Для зняття поляризаційних кривих застосовували стандартну триелектродну комірку, таку ж як і при дослідженні катодного процесу електроосадження нікелевих покриттів. Допоміжним електродом слугувала платинова пластина площею 1 см^2 , у якості електрода порівняння використовували насичений хлор-срібний електрод. Побудовані на основі отриманих поляризаційних кривих корозійні діаграми представлені на рис. 5, 6.

З рис. 5,6 видно наступне. Для нікелю та нікель-вольфрамового сплаву спостерігається область активного розчинення при значенні анодної перенапруги до $+0,3$ В, при більш високих значеннях перенапруги спостерігається початок переходу металу в пасивний стан, як для чистого нікелю, так і для сплаву. Для зразків нікелевих покриттів, отриманих з електроліту на основі НЕР, струми анодного розчинення є набагато вищими, а введення вольфрамату натрію в електроліт майже не впливає на корозійну поведінку. Останнє пов'язане з відсутністю впровадження вольфраму у структуру покриття [10, 11]. З метою порівняння значення швидкості корозії, визначені на основі рис. 5, 6 приведені в табл. 1.

З табл. 1 видно, що найменша швидкість корозії очікувано спостерігається для нікель-вольфрамових покриттів. Дещо, проте досить незначно,

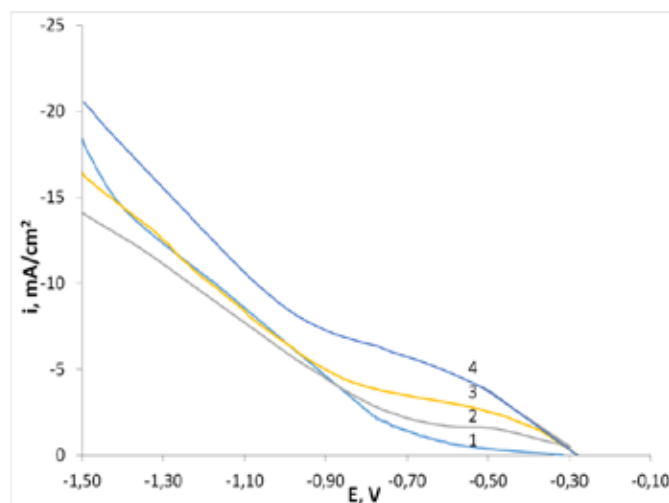


Рис. 4. Вплив швидкості сканування потенціалу на катодні поляризаційні криві електроосадження Ni з електроліту на основі НЕР за температури 75°C , швидкість сканування потенціалу, мВ/с: 1 – 1; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100

вищою є швидкість корозії нікелевих покриттів отриманих із водного цитратного електроліту. Покриття отримані з електроліту на основі НЕР є корозійно нестійкими в хлоридному середовищі. Такі високі швидкості корозійного руйнування можуть, зокрема, пояснюватись особливостями кристалічної структури покриття, наявністю крупнокристалічних зерен та тріщин в покритті [10]. Крім цього, низький вихід за струмом (близько 60 %) свідчить про включення до складу покриття продуктів розкладу електроліту на основі НЕР, які можуть пришвидшувати корозійне руйнування. Про це також свідчать наведені у таблиці 1 значення потенціалів корозії.

Електрохімічну активність щодо процесу виділення водню оцінювали на основі аналізу катодних поляризаційних кривих, отриманих в у 3,5 % розчині хлориду натрію та побудованих у координатах перенапряга – густина струму (рис. 7).

З огляду на дані, приведені на рис. 7 можна зробити наступні висновки. Перенапряга виділення водню за катодної густини струму 5 mA/cm^2 на нікелевих покриттях становить близько 0,3 В. Введення до складу покриття 14,6 мас.% W призводить до зменшення перенапряги виділення водню майже на 0,1 В у порівняння з чистим нікелем. Це узгоджується з даними приведеними у [12] і пояснюється появою каталітично активних центрів

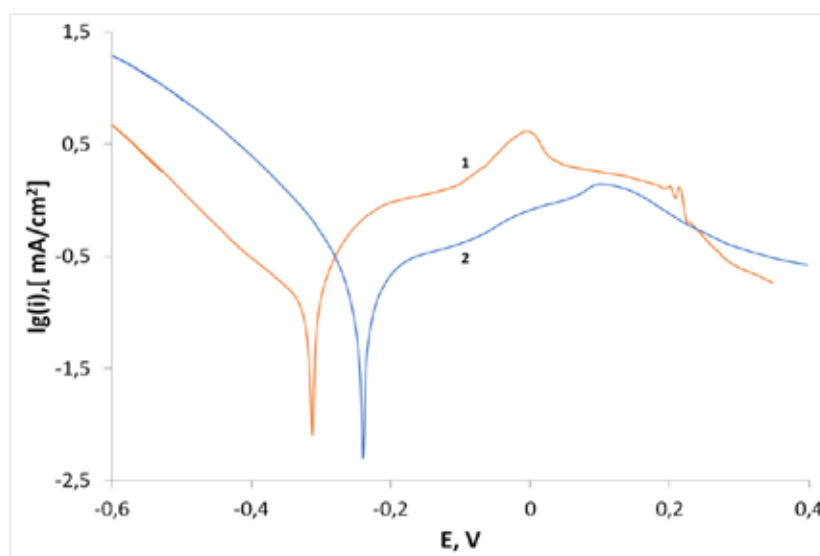


Рис. 5. Корозійні діаграми для нікелевого (1) та нікель-вольфрамового (2) покриттів отриманих з водного цитратного електроліту в 3,5 % NaCl за температури 18 °C

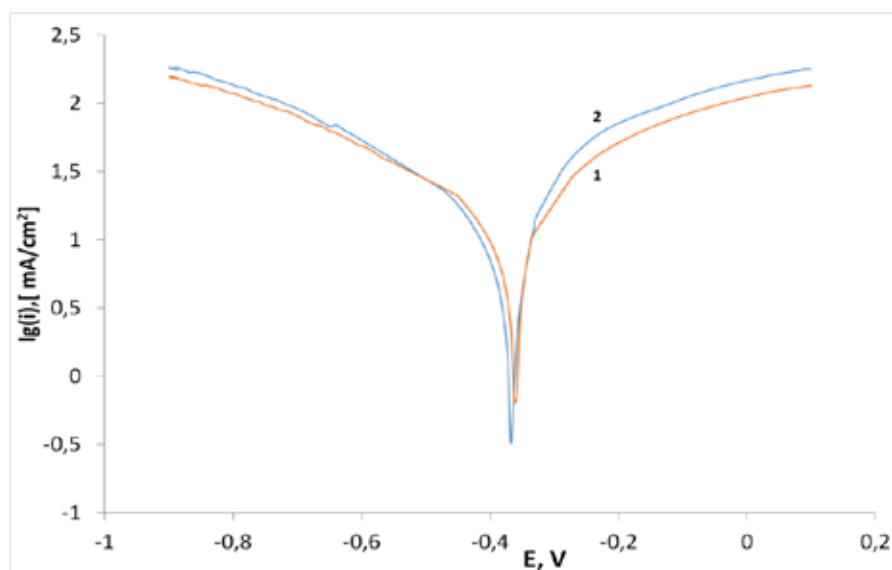


Рис. 6. Корозійні діаграми для нікелевого (1) та нікель-вольфрамового (2) покриттів отриманих з електроліту на основі НЕР в 3,5 % NaCl за температури 18 °C

Корозійні характеристики покриттів на основі нікелю

Характеристики	Нікелеві покриття, отримані з водних електролітів	Покриття сплавом Ni-W, (вміст W 14,6 мас.%)	Нікелеві покриття, отримані з електроліту на основі НЕР
$\lg(i_{\text{сopf}})$, [мА/см ²]	-0,65	-1	0,8
$i_{\text{сopf}}$, мА/см ²	0,22	0,1	6,3
$E_{\text{сopf}}$, В	-0,31	-0,24	-0,37

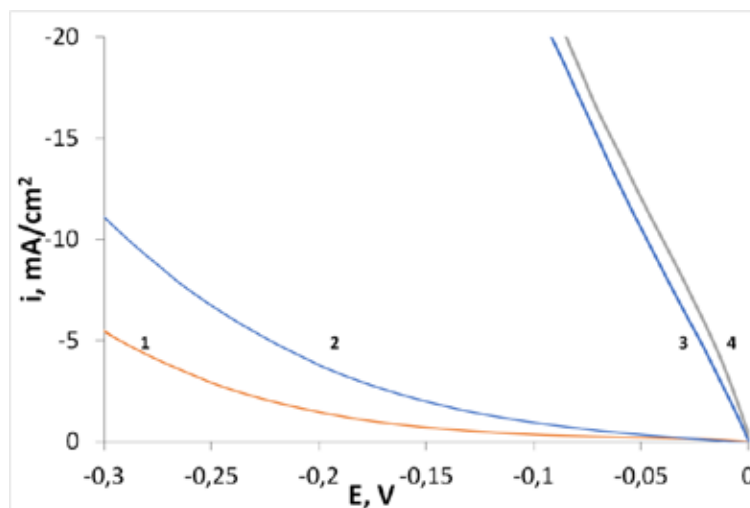


Рис. 7. Каталітична активність покриттів на основі нікелю щодо процесу катодного виділення водню: 1 – нікелевих, отриманих з цитратного електроліту; 2 – нікель-вольфрамових (14,6 мас.% W), отриманих з цитратного електроліту; 3 – нікелевих, з електроліту на основі НЕР; 4 – нікелевих, з електроліту на основі НЕР з додаванням Na_2WO_4

завдяки включенню вольфраму в сплав. Найменшою перенапругою виділення водню і відповідно найвищими електрокаталітичними властивостями щодо відповідного процесу серед досліджуваних володіють покриття, отримані з електроліту на основі НЕР. Перенапруга виділення водню на них за катодної густини струму 5 мА/см² не перевищує 0,02 В. Це у першу чергу пов'язане із нанопорядкованою та високорозвинутою структурою поверхні покриття [10, 11].

Мікромеханічні випробування електроосаджених нікелевих покриттів проводилися на універсальному мікротвердомірі-скретестері "Micron-gamma" [11, 13, 14] методом безперервного вдавлювання індентора. Вдавлювання індентора Берковича здійснювалось за постійної швидкості навантаження 0,45 сН/с. При цьому максимальне навантаження на індентор складало 30 сН. В ході відповідних випробувань здійснювали автоматичну реєстрацію величини навантаження на індентор та глибини його впровадження. Як наслідок отримували діаграми впровадження (рис. 8, 9), за якими оцінювали мікротвердість покриття в цілому. Основним оціночним параме-

тром в даному випадку виступала глибина впровадження індентора (табл. 2).

З даних приведених на рис. 8, 9 можна зробити наступні висновки. Чим більшою є мікротвердість покриття, тим відповідно меншою є глибина впровадження індентора при досягненні максимального навантаження. Таким чином нікелеві покриття, отримані з цитратного комплексних електролітів є більш твердими ніж отримані з електроліту Уотса (рис. 8, табл. 2). Впровадження у сплав вольфраму забезпечує осадження найбільш твердих покриттів серед відповідних досліджуваних (рис. 8 крива 3, табл. 2). Покриття нікелем, отримані з електроліту на основі НЕР теж мають доволі високу мікротвердість (рис. 9 крива 1, табл. 2), порівняну з нікелевими покриттями отриманими з водного цитратного електроліту. Введення в електроліт на основі НЕР вольфраму натрію, хоча і не призводить до включення в структуру покриття вольфраму, проте сприяє отриманню більш крихких і механічно не стабільних покриттів, які руйнуються при відповідних дослідженнях. Про це також свідчить форма кривої 2 на рис. 9, де проявляється значна величина впровадження індентора та поличка

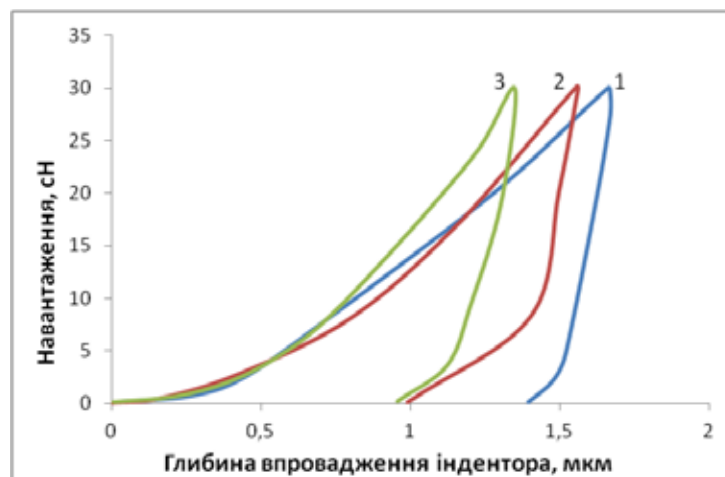


Рис. 8. Діаграми впровадження індентора Берковича для зразків нікелевих покриттів: 1 – осажденного з електроліту Уотса; 2 – осаженного цитратного електроліту нікелювання; 3 – отриманого з цитратного електроліту для осаження сплаву нікель-вольфрам

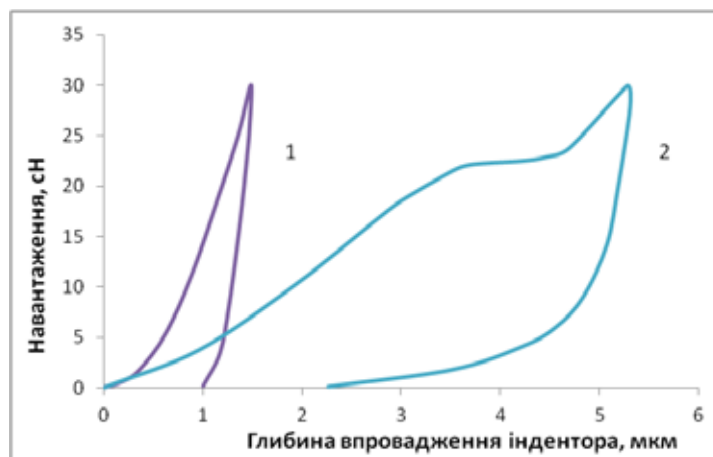


Рис. 9. Діаграми впровадження індентора Берковича для зразків нікелевих покриттів: 1 – осаженного з електроліту нікелювання на основі НЕР; 2 – осаженного з електроліту нікелювання на основі НЕР з додаванням вольфрамату натрію

Таблиця 2

Оцінювання мікротвердості досліджуваних нікелевих покриттів

Глибина впровадження індентора при навантаженні 30 сН, мкм				
Нікелеве покриття отримане з електроліту Уотса	Нікелеве покриття отримане з цитратного електроліту	Покриття сплавом Ni-W, (вміст W 14,6 мас.%) отримане з цитратного електроліту	Нікелеві покриття, отримані з електроліту на основі НЕР	Нікелеві покриття, отримані з електроліту на основі НЕР з додаванням Na_2WO_4
1,67	1,56	1,35	1,48	5,31

в інтервалі 3,5...4,5 мкм, що пов'язана із руйнуванням покриття під дією механічного навантаження [11].

Висновки. Таким чином в ході проведених досліджень було встановлено наступне. Відсутність дифузійної перенапруги в процесі електроосадження покриттів на основі нікелю із водних

цитратних електролітів сприяє отриманню рівномірних дрібнокристалічних покриттів з високою корозійною стійкістю. Додавання до складу електроліту іонів вольфрамату з подальшим включенням вольфраму до складу покриття додатково підвищує твердість та корозійну стійкість металічного осаду.

На відміну від водних електролітів, в електроліті на основі реліну осадження відбувається з більшою перенапругою та меншим виходом за струмом. Отримані покриття є більш напруженими та мають нижчу

корозійну стійкість. В той же час, такі покриття мають більш розвинену структуру поверхні, що робить їх перспективними для використання в процесах електрохімічного отримання водню.

Список літератури:

1. Nickel plating handbook <https://surl.li/qdkxyr>
2. Nickel Plating by George Di Bari in the ASM Handbook, Volume 5, Surface Engineering, published by ASM International, Materials Park, OH 44073, 1994, page 201 <https://surl.li/ifuxfv>
3. Gamburg Y.D., Zangari G. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. *New York: Springer*. 2011. p. 385
4. Azmi S., Koudahi M.F., Frackowiak E. Reline deep eutectic solvent as a green electrolyte for electrochemical energy storage applications. *Energy Environ. Sci.* 2022. 15. P 1156–1171.
5. Zhong Z., Clouser S. J. Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications. *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 240. P. 380–386.
6. Abbott A. P., et al. A Comparative Study of Nickel Electrodeposition Using Deep Eutectic Solvents and Aqueous Solutions. *Electrochimica Acta*. 2015. V.176. P. 718–726.
7. Winiarski J., et al. Ni/cerium Molybdenum Oxide Hydrate Microflakes Composite Coatings Electrodeposited from Choline Chloride: Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent. *Materials*. 2020. V. 13. P. 924–941.
8. Qadr G., et al. Nickel electrodeposition from deep eutectic solvents containing copper ions at a high temperature. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. V. 378, 121584
9. Costovici S., Manea A.-C., Visan T. Anicai L. Investigation of Ni-Mo and Co-Mo alloys electrodeposition involving choline chloride based ionic liquids. *Electrochimica Acta*, 2016. V. 207, P. 97–111.
10. Uschapovskiy D.Yu., Zabaluyev A.S., Vorobyova V.I., Vasiliev G.S., Linyucheva O.V. Influence of the solvent nature on the electrodeposition of Ni and Ni-W coatings, *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2023. 34 (73), 2. P. 46–51.
11. Zabaluyev, A., et al. Influence of the electrolyte composition and the solvent nature on the physical-mechanical characteristics of nickel-based galvanic coatings. *Technical Sciences and Technology*. 2023. V. 3 (33). P. 170–179.
12. Wu H., et al. Double-Site Ni–W Nanosheet for Best Alkaline HER Performance at High Current Density >500 mA cm⁻². 2019. V. 6(10). P. 1900308

Zabaluyev A.S., Ushchapovskiy D.Yu., Vorobyova V.I., Vasilyev G.S., Linyucheva O.V. ELECTROCHEMICAL, MECHANICAL AND CATALYTIC PROPERTIES OF NICKEL-BASED GALVANIC COATINGS

The electrochemical characteristics and multifunctional properties of nickel-based coatings obtained from aqueous citrate and electrolytes based on a deep eutectic solvent (DES) – reelin have been investigated. Based on IR spectroscopic studies conducted using a Bruker Tensor II spectrometer, the formation of a low-temperature eutectic solvent corresponding to reelin has been shown.

Based on potentiodynamic current-voltage measurements, during the investigation of the electrodeposition of nickel coatings, it has been shown that the main factor influencing the overvoltage of metal release is temperature. It was found that increasing the potential scanning rate does not lead to the appearance of clearly pronounced maximums of the limiting current inherent in the controlling diffusion stage. This, on the one hand, may be associated with the masking effect of the side process of hydrogen release. On the other hand, this may be a consequence of the predominant control of the dissociation stage of complex ions based on nickel. The corresponding is inherent in both aqueous citrate and reelin-based nickel plating electrolytes.

It was found that the lowest corrosion rate and the highest microhardness are expected to be observed for nickel and nickel-tungsten coatings obtained from aqueous citrate electrolytes.

The article reveals that coatings obtained from electrolytes based on deep eutectic solvents are corrosion-unstable in chloride environments. The relatively high rates of corrosion damage can be explained by the peculiarities of the crystal structure, the presence of cracks and decomposition products of the reelin-based electrolyte in the coating.

It has been shown that the lowest hydrogen evolution overvoltage is observed on coatings obtained from the reelin-based electrolyte. This is the result of the formation of coatings with a nano-ordered and highly developed surface structure.

Key words: nickel-based coating, low-temperature eutectic solvent, implementation diagrams, microhardness, corrosion resistance, electrocatalytic properties.