

УДК 66.087.4:544.032.53

*С.В. Ковальов, В.І. Міщенко, Н.В. Ковальова, К.М. Сухий***ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОСАДІВ****Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна**

Стаття присвячена електрохімічному процесу одержання нікелевих покриттів в магнітному полі низької індукції при різних значеннях густини струму та дослідженню їх структури, морфології та хіміко-механічних властивостей. Показано, що магнітне поле індукцією 0,5 мТ, направлене паралельно до поверхні електрода, впливає на процес електроосадження нікелю, що приводить до зростання перенапруги процесу. При застосуванні магнітного поля 0,5 мТ при різній густині струму можливо впливати на морфологію, розмір кристалів, переважну кристалографічну орієнтацію осаду, твердість та корозійні властивості нікелевого покриття. При збільшенні густини струму від 50 до 630 мА/см² розмір кристалів одержаних осадів нікелю збільшується. Спостерігається зміна морфології поверхні покриття: при 50 мА/см² одержана поверхня, утворена дрібнокристалічними зеренними агрегатами з хаотичною (нерівномірною) структурою; при 100–315 мА/см² поверхня утворена чітко вираженими зеренними агрегатами; при 630 мА/см² утворюються зерна у вигляді неправильних сфер. Найбільш тверді (мікротвердість покриття складала 8600 МПа) та корозійностійкі дрібнокристалічні покриття з переважуючою кристалографічною орієнтацією піків нікелю (220) були одержані при електрохімічному осадженні нікелю під впливом магнітного поля з індукцією 0,5 мТ та густині струму 50 мА/см².

Ключові слова: електроосадження, магнітне поле, нікелеві покриття, морфологія, властивості.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-163-6-168-177

Вступ

Осади нікелю використовують, як декоративні, захисні та функціональні покриття. Перевагами нікелевих покриттів є висока корозійна стійкість, термостійкість, зносостійкість, твердість та привабливий зовнішній вигляд. Завдяки високому світлопоглинанню та здатності перетворювати сонячну енергію в теплову покриття з чорного нікелю знайшли використання в системах сонячної енергії, сонячних колекторах, оп-

тичних пристроях та інших електронних компонентах [1]. Наноструктурований нікель широко використовується в паливних елементах, процесах електрохімічного гідрування, в якості каталізатора, може проявляти суперпарамагнетизм [2] та має перспективи використання в нанобіотехнологіях [3]. В медичній галузі покриття з нікелю пропонується використовувати в якості захисних. Кумар (Kumar) зі співавторами [4] досліджував властивості нікелевого покриття,

© С.В. Ковальов, В.І. Міщенко, Н.В. Ковальова, К.М. Сухий, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

S.V. Kovalyov, V.I. Mishchenko, N.V. Kovalova, K.M. Sukhyi

осадженого електрохімічним шляхом на поверхню нержавіючої сталі. Були зроблені висновки про те, що нанесення багат шарового нікелевого покриття можна покращити її корозійну стійкість, а результати дослідження цитотоксичності дозволили їм запропонувати використовувати нікелеві покриття в якості захисних для імплантатів.

Введення магнітного поля у процесі електроосадження металевих, композитних покриттів і сплавів створило нову галузь електрохімічної науки, яка називається магніто-електроосадженням. Сучасні дослідження показують, що зовнішнє магнітне поле може мати значний вплив на масообмін, швидкість осаження, ефективність катодного струму, морфологію, структуру та фізико-хімічні властивості шару осаження, що дозволяє отримати матеріали з відмінною продуктивністю, які матимуть широкі перспективи застосування в промисловості [5].

Слід зауважити, що робіт, присвячених впливу магнітного поля на процес електроосадження чистих нікелевих покриттів і вивченню їх властивостей небагато.

Жанг (Zhang) зі співавторами [6] вивчав процес електроосадження нікелю на золотому електроді в статичному магнітному полі з індукцією 0,850 Т методом імпедансу. Було виявлено, що на початковому етапі електроосадження нікелю на золотому електроді (діамагнітний метал) вплив магнітного поля був незначним, але збільшувався при зростанні товщини шару нікелю, нанесеного на поверхню. Застосування статичного магнітного поля вплинуло на морфологію та розміри частинок осадів.

В дослідженнях впливу статичних магнітних полів з індукцією до 0,740 Тл на процес електроосадження нікелю [7] спостерігалось збільшення шорсткості поверхні нікелевого покриття, нанесеного у магнітному полі, направленому паралельно до поверхні електрода. Абсолютні значення магнітних властивостей приготованих шарів в магнітному полі дещо відрізнялися від отриманих за відсутності магнітного поля, що, за думкою авторів, можна пояснити змінами у структурі осаду. Крім того, магнітне поле посилювало виділення водню при малих значеннях густин струму, що пояснювалось складною взаємодією гідродинаміки та кінетики процесу.

Іспас (Ispas) зі співавторами [8] вивчав процес електрокристалізації нікелю в присутності зовнішнього магнітного поля з індукцією до 0,7 Т. Авторами було досліджено варіанти паралельного та перпендикулярного направлення магнітного

поля відносно поверхні електрода. В умовах, коли сила Лоренца і перемішування електроліту спрямовано в одну сторону, одержано підвищення парціальної густини струму нікелю. Коли лінії магнітного поля проходили паралельно лініям електричного струму, парціальна густина струму нікелю навпаки зменшувалась. Автори показали, що стаціонарний струм зростає в присутності магнітного поля, прикладеного перпендикулярно лініям електричного струму, тоді як він може зменшуватися або не змінюватись (залежно від напрямку індукції магнітного поля) у випадку, якщо магнітне поле направлено паралельно електричному струму. Це, за думкою авторів, може свідчити про зміни в утворенні зародків і впливає на механізм зростання осаду [8].

Вайнман (Weinmann) зі співавторами [9] запропонував спосіб покращення осаження нікелевого покриття на деталях складної геометричної форми під дією стаціонарного магнітного поля з індукцією до 1,25 Т. Авторами зроблений висновок, що за допомогою дії магнітного поля можливо одержати більш товсті покриття нікелю з покращеними механічними властивостями за рахунок одержання дрібнозернистої мікроструктури покриття.

В літературних даних дослідження дії магнітних полів здійснювались при значеннях індукції поля більше 0,4 Т. Вплив слабких магнітних полів на властивості нікелевих осадів не вивчався.

В попередніх роботах були досліджені процеси електроосадження міді [10,11] та олова [12] під дією слабого магнітного поля (від 0,5 до 2 мТ). Було виявлено, що магнітні поля низької індукції, прикладені паралельно до поверхні електрода, впливають на процес електроосадження, текстуру, морфологію та фізико-механічні (твердість, відбивна здатність, блиск) властивості отриманих осадів.

Метою цієї роботи стало визначення впливу магнітного поля низької індукції та густини струму на процес електроосадження, мікротвердість, корозійну стійкість, морфологію та фазовий склад нікелевих покриттів.

Методика експерименту

Нікелеві покриття одержували у присутності постійного магнітного поля з індукцією 0,5 мТ. Метод, згідно з яким розташовувалась комірка для електроосадження, описаний у роботі [13]. Лінії магнітної індукції були спрямовані паралельно до поверхні електрода.

Електроосадження нікелю проводили в електроліті складу, моль/л: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,64, NH_4Cl 0,5, H_3BO_3 0,49. Дослідження проводились

при температурі 298 ± 3 К. Густина струму змінювалась в діапазоні 50–630 мА/см². Як анод використовували нікелеву пластину, а як робочий електрод (катод) – сталеву пластину розміром 3×2,5 см. Як електрод порівняння використовували хлоросрібний електрод, заповнений насиченим розчином KCl.

Товщина осаджених покриттів складала близько 20 мкм.

Корозійні випробування проводили за допомогою потенціостата-гальваностата МТех EW-1000 з програмним керуванням. Модульним розчином для визначення корозійної стійкості було обрано розчин 3 мас.% NaCl. Вольтамперні криві були одержані при лінійній розгортці потенціалу зі швидкістю 1 мВ/с.

Дослідження морфології поверхні осаду та шліфів нікелевих покриттів здійснювались за допомогою апарата РЕМ-106І. Фазовий аналіз досліджувався на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3. Мікротвердість покриттів визначали за допомогою приладу ПМТ-3.

Відхилення від повторюваності експериментальних даних не перевищували 10%.

Результати та їх обговорення

На рис. 1 наведені хронопотенціограми процесу електрохімічного осадження нікелю, який проводили під дією постійного магнітного поля та без нього. Видно, що при проведенні процесу під впливом магнітного поля значення потенціалу електрода в процесі електроосадження значно менше, що вказує на більшу поляризацію електрода. Різниця потенціалів на початку процесу складала близько 300 мВ. Також можна відмітити, що під час усього процесу осадження, в випадку його проведення без впливу магнітного поля, потенціал поступово зменшується та після 20 хвилини електролізу майже не змінюється до закінчення експерименту. При проведенні процесу під дією магнітного поля спостерігається зовсім інша картина. В перші 12 хвилин процесу потенціал не змінюється, а далі починає плавно збільшуватись протягом часу проведення експерименту. Наприкінці експерименту різниця потенціалів процесів, проведених під дією магнітного поля та без нього, складала близько 100 мВ. Така різниця потенціалів вказує на значне збільшення перенапруги виділення нікелю під впливом магнітного поля. Подібний ефект ми також спостерігали при електроосадженні мідних покриттів [10]. За нашою думкою, така різниця в хронопотенціограмах при проведенні процесу під дією магнітного поля та без нього свідчить про те, що магнітне поле впливає на процес електро-

осадження нікелю і приводить до зміни характеристик одержаних осадів.

На рис. 2 наведені рентгенівські дифрактограми покриттів нікелю, отриманих в процесі електролізу під дією магнітного поля з індукцією 0,5 мТ при різних значеннях густини струму. На рентгенівських дифрактограмах присутні піки нікелю з орієнтацією (111), (200), (220), (311) та (222). Наявність піків заліза та оксиду заліза обумовлено тим, що покриття наносились на сталеву основу. Для наочності порівняння на рис. 3 надані зведені рентгенівські дифрактограми, на яких вказані переважаючі кристалографічні орієнтації нікелю.

Як видно з рис. 2 і 3, при збільшенні густини струму відбувається зміна інтенсивності піків з різною орієнтацією. Найбільш інтенсивними серед піків нікелю є орієнтація (220) для зразка, отриманого при 50 мА/см² та орієнтація (200) для зразка, отриманого при 630 мА/см². Зразки, отримані при 100–315 мА/см², мають переважаючу інтенсивність піку з орієнтацією (311).

На рис. 4 показані мікрофотографії морфології поверхні зразків, отриманих під дією магнітного поля, при різних значеннях густини струму. Зі зростанням густини струму морфологія поверхні нікелевих покриттів суттєво змінюється. При густині струму 50 мА/см² поверхня осаду утворена дрібнокристалічними зернистими агрегатами з хаотичною (нерівномірною) структурою (рис. 4,а), в якій переважає фаза нікелю з орієнтацією (220) (рис. 3, крива 1). Покриття, одержані при значеннях густини струму 100–315 мА/см², мають чітко виражені зеренні

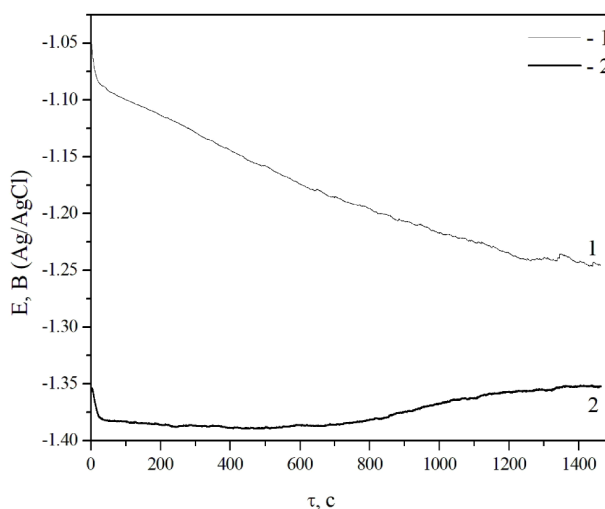


Рис. 1. Хронопотенціограма процесу електроосадження нікелевого покриття при густині струму 50 мА/см².

Індукція магнітного поля, мТ: 1 – 0; 2 – 0,5

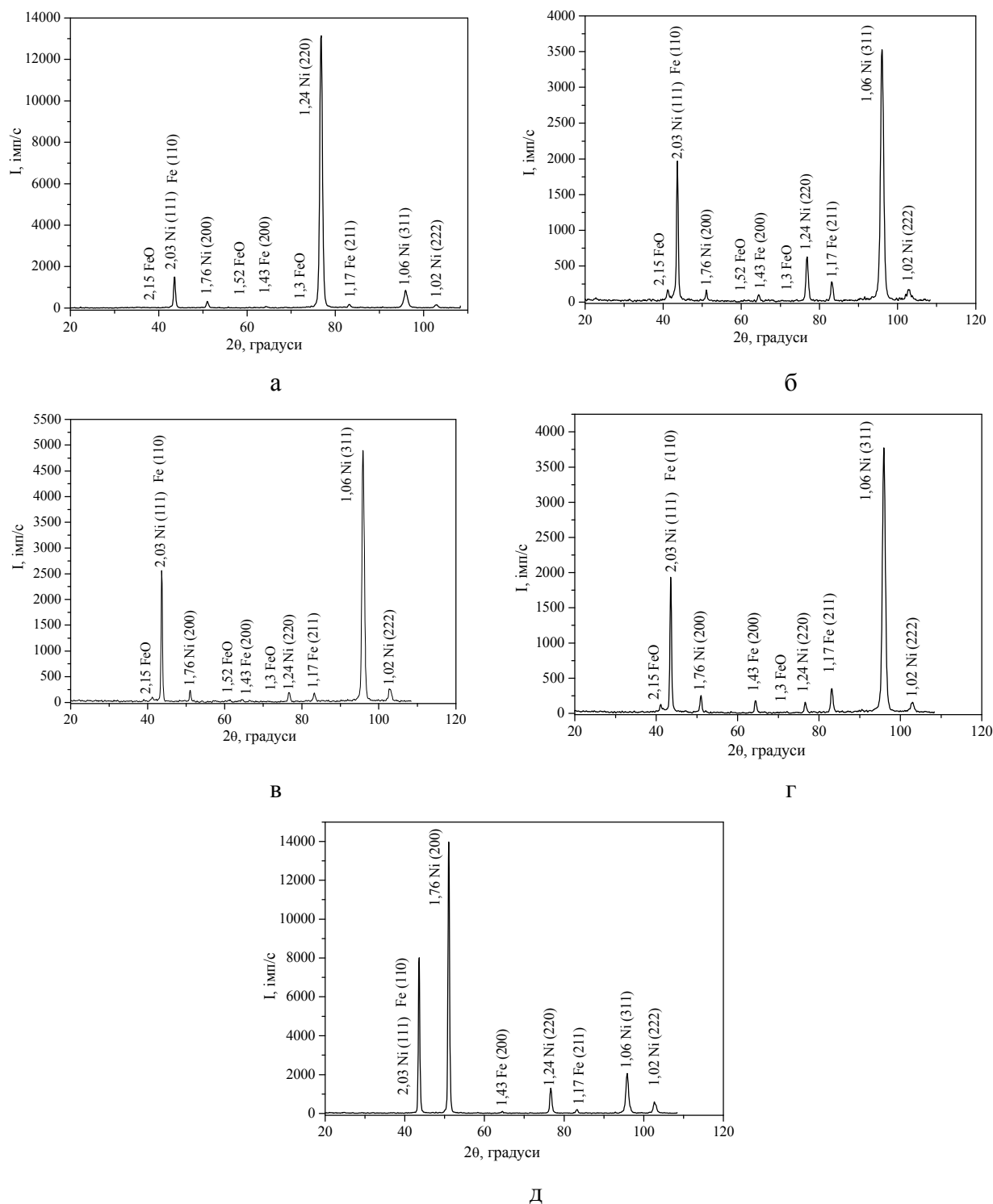


Рис. 2. Рентгенівські дифрактограми електроосаджених покриттів нікелю при індукції магнітного поля 0,5 мТ, отриманих при густині струму, mA/cm^2 : а – 50; б – 100; в – 200; г – 315; д – 630

агрегати (рис. 4,б,в,г) з переважаною фазою нікелю орієнтацією (311) (рис. 3, криві 2, 3, 4). При збільшенні густини струму розміри зерен змінюються. На зразку, одержаному при 630 мА/см² утворюються зерна у вигляді неправильних сфер (рис. 4,д), які характеризуються переважно фазою з орієнтацією (200) (рис. 3, крива 5). Слід зауважити, що не зважаючи на те, що у зразках, одержаних при 100–315 мА/см² інтенсивність піків приблизно в 3 рази менша за інтенсивність піків у зразках, отриманих при 50 та 630 мА/см² (рис. 3), вони мають чітко виражену кристалографічну структуру (рис. 4).

На рис. 5 наведені зображення поперечного перерізу зразків нікелевих покриттів, одержаних під дією магнітного поля з індукцією 0,5 мТ при різних значеннях густини струму. Поперечний переріз нікелевих покриттів показує шар нанесеного покриття та фрагмент металевої основи. Аналізуючи отримані зображення, можна стверджувати, що нікелеві покриття мають гарну адгезію до сталеві основи у всіх зразках, окрім зразку «в», що був отриманий при густині струму 200 мА/см². На це вказує несуцільний перехідний шар між нікелевим покриттям та основою.

Фізико-механічні властивості одержаних нікелевих покриттів вивчали шляхом вимірювання

мікротвердості (рис. 6). Найбільш твердою є поверхня зразка, одержана при густині струму 50 мА/см², її мікротвердість складає 8600 МПа, що значно перевищує значення мікротвердості нікелевих покриттів, наданих у літературі: 2000–3000 МПа [14,15] та 4420–4900 МПа (ГОСТ 9.303). Мікротвердість покриттів, одержаних при густинах струму 100–630 мА/см², знаходилась в межах 4000–5000 МПа. Одержані дані свідчать, що найбільшу мікротвердість має зразок з переважною кристалографічною орієнтацією (220) (рис. 2,а) та з дрібнокристалічною поверхнею (рис. 4,а). Автори [14] також прийшли до висновку, що переважання кристалографічної орієнтації (220) більш за все впливає на твердість нікелевого покриття.

Згідно з даними [15], збільшення перенапруги процесу електроосадження нікелю призводить до збільшення кількості зародків нікелю на поверхні сталі, що, у свою чергу, веде до утворення осаду з меншим розміром зерна. Дрібнозернисті осади, як відомо, мають кращу мікротвердість зі зрівняння з крупнозернистими агрегатами.

Здійснені в цій роботі дослідження вказують, що магнітне поле низької індукції впливає на процес утворення нікелевого покриття,

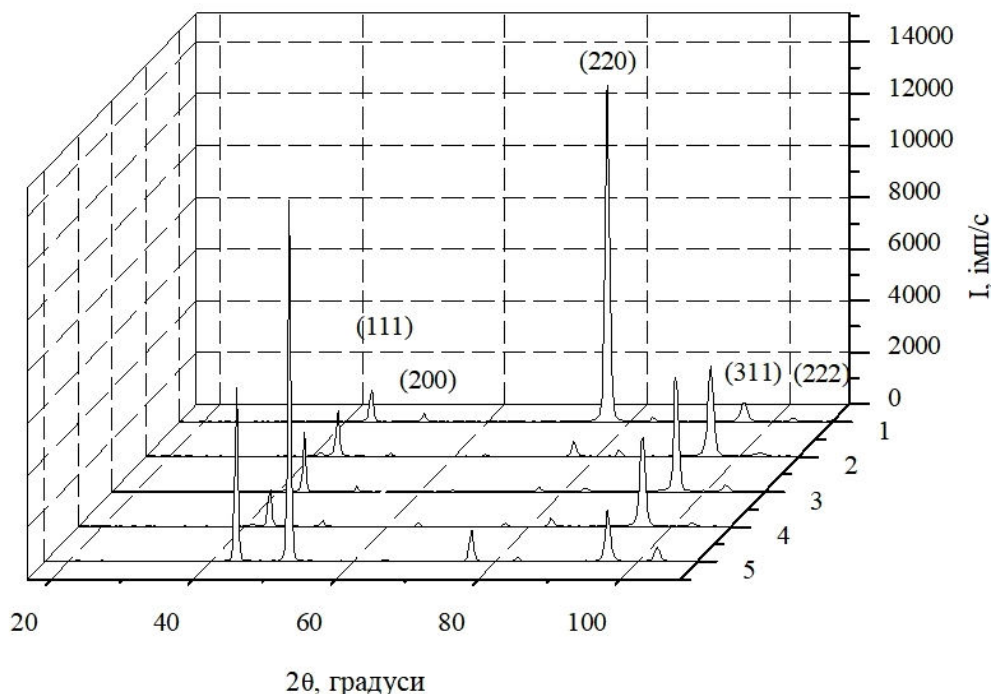


Рис. 3. Зведені рентгенівські дифрактограми електроосаджених покриттів нікелю при індукції магнітного поля 0,5 мТ, одержаних при густині струму, мА/см²: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 315; 5 – 630

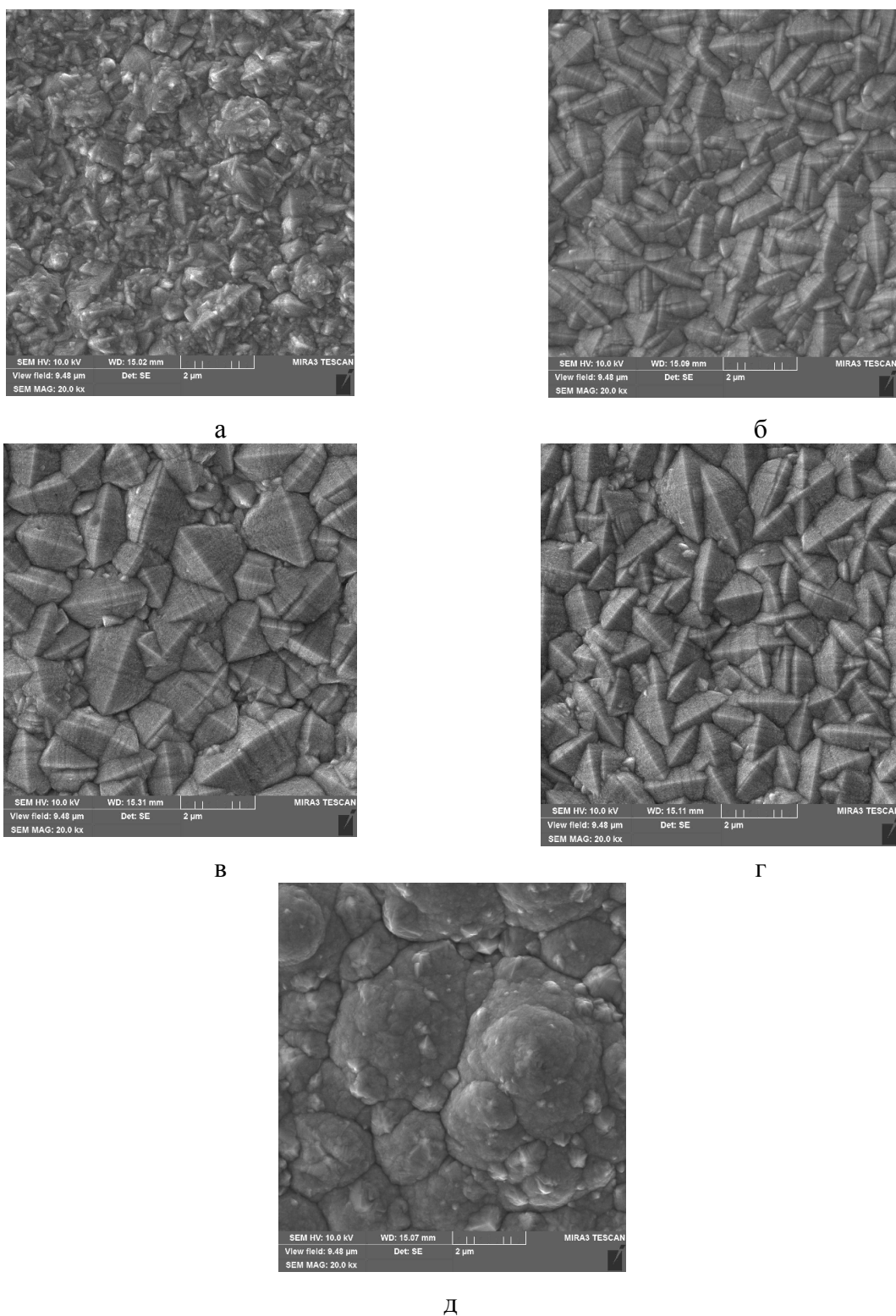


Рис. 4. Мікрофотографії поверхні нікелевих покриттів, одержаних під дією магнітного поля з індукцією 0,5 мТ та густини струму, мА/см²: а – 50; б – 100; в – 200; г – 315; д – 630

збільшуючи перенапругу процесу електроосадження нікелю, що приводить до утворення дрібнозернистих високотвердих покриттів. Слід зазначити, що використання магнітного поля дозволяє одержувати різну кристалографічну орієнтацію осадів нікелю при різних значеннях густини струму.

Рисунок 7 демонструє результати дослідження корозійної стійкості нікелевих покриттів, одержаних при впливі магнітного поля низької індукції при різних значеннях густини струму, та сталевій пластині без покриття. Потенціал корозії та густину струму корозії розраховували по перетину дотичних, проведених до лінійних ділянок кривих, одержаних в координатах логарифм току як функція від потенціалу робочого електрода. На кривій 1 рисунку 7 жирними лініями показано методику визначення корозійного потенціалу та густини струму корозії.

Значення потенціалу корозії та струму корозії для всіх зразків наведені в таблиці. Видно,

що високе значення потенціалу корозії при впливі на процес магнітного поля низької індукції мають покриття, осаджені при густині струму 50 та 630 мА/см², що вказує на високу захисну властивість нікелевих покриттів, одержаних в цих умовах. Струм корозії мав найменше значення при 50 мА/см².

Висновки

1. Магнітне поле індукцією 0,5 мТ впливає на процес електроосадження нікелю.

2. За умов дії магнітного поля збільшується перенапруга осадження покриття більш ніж на 100 мВ.

3. Застосовування магнітного поля 0,5 мТ при певних густинах струму може впливати на переважну кристалографічну орієнтацію нікелевого покриття.

4. Морфологія поверхні сильно змінюється при застосуванні магнітного поля 0,5 мТ з різною густиною струму. При густині струму 50 мА/см²

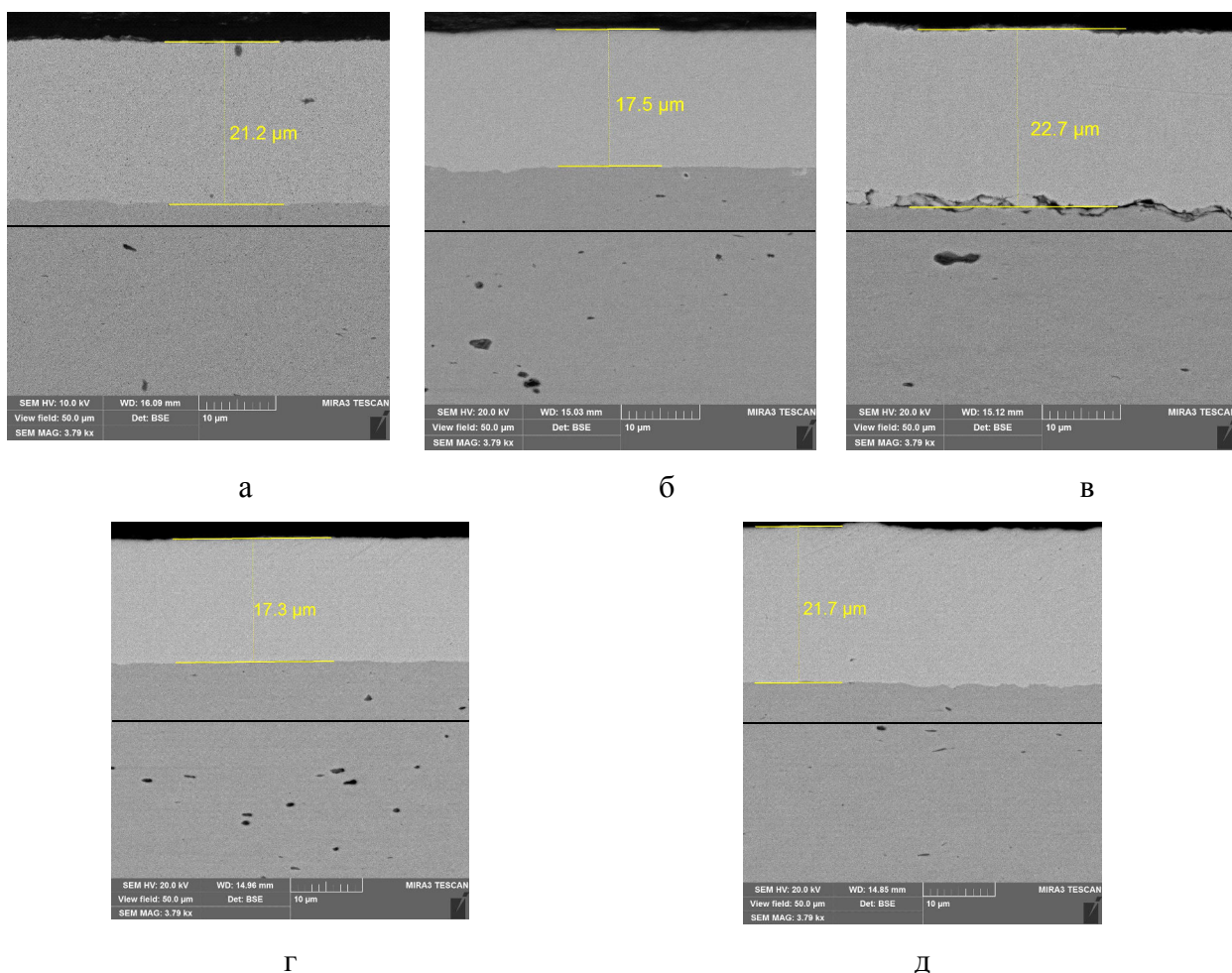


Рис. 5. Поперечний переріз зразків нікелевих покриттів одержаних під дією магнітного поля з індукцією 0,5 мТ та густині струму, мА/см²: а – 50; б – 100; в – 200; г – 315; д – 630

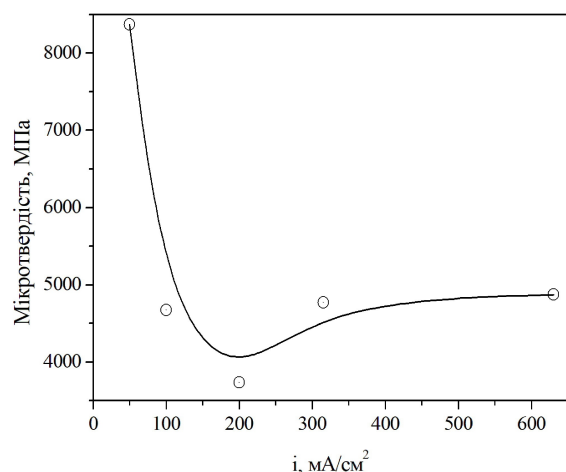


Рис. 6. Мікротвердість зразків нікелевих покриттів, одержаних під дією магнітного поля з індукцією 0,5 мТ при різній густині струму осадження

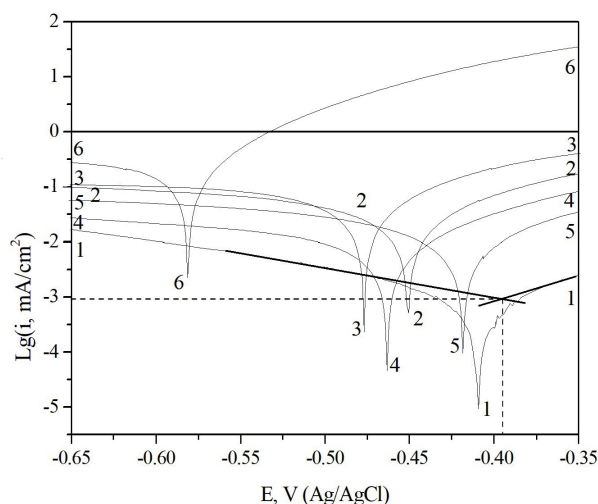


Рис. 7. Корозійні діаграми зразків нікелевих покриттів та сталі, одержані у розчині 3 мас.% NaCl. Покриття нікелю одержано під дією магнітного поля з індукцією 0,5 мТ та густині струму, mA/cm^2 : 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 315; 5 – 630; 6 – сталь без покриття

Дані про корозійний потенціал та густину струму корозії (рис. 7)

№	Густина струму осадження нікелевого покриття, mA/cm^2	Потенціал корозії $E_{\text{кор}}$ (відносно Ag/AgCl), В	Густина струму корозії $i_{\text{кор}}$, mA/cm^2
1	50	-0,395	0,0009376
2	100	-0,448	0,03206
3	200	-0,483	0,04779
4	315	-0,463	0,008356
5	630	-0,393	0,01435
6	сталь без покриття	-0,616	0,2109

одержано дрібнокристалічні осади. Зі збільшенням густини струму утворюються осади з більшим розміром зерених агрегатів. При густині струму $630 \text{ mA}/\text{cm}^2$ відбувається зміна морфології осаду.

5. Для одержання високотвердих, корозійностійких покриттів рекомендується застосування магнітного поля 0,5 мТ та густини струму $50 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rudnik E. Black nickel coatings: from plating techniques to applications // *Coatings*. – 2024. – Vol.14. – No. 12. – Art. No. 1588.
2. Nanoporous Ni: electrodeposition synthesis, morphology, and magnetic property / Huang X., Fu Z., Yang X., Sun Z., Zhong M., Yi Y., Tang Y., Wang C. // *J. Porous Mater.* – 2014. – Vol.21. – P.9-14.
3. Prina-Mello A., Diao Z., Coey J.M.D. Internalization of ferromagnetic nanowires by different living cells // *J. Nanobiotechnology*. – 2006. – Vol.4. – No. 1. – Art. No. 9.
4. Investigation of stainless steel 316 coated with nickel / Ashok Kumar P., Vasanth Kumar D., Davis Hans S.J., Janarthanan P. // *Mater. Today Proc.* – 2022. – Vol.62. – Part 4. – P.2376-2379.
5. Long Q., Zhong Y., Wu J. Research progress of magnetic field techniques for electrodeposition of coating // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2020. – Vol.15. – No. 8. – P.8026-8040.
6. *In situ* monitoring Ni electrodeposition and stripping on gold electrode surface in a static magnetic field using an electrochemical quartz crystal impedance system / Zhang Y., Liu M., Wang M., Xie Q., Yao S. // *Sens. Actuators B. Chem.* – 2007. – Vol.123. – No. 1. – P.444-453.
7. Bund A., Ispas A. Influence of a static magnetic field on nickel electrodeposition studied using an electrochemical quartz crystal microbalance, atomic force microscopy and vibrating sample magnetometry // *J. Electroanal. Chem.* – 2005. – Vol.575. – No. 2. – P.221-228.

8. *Nucleation and growth of thin nickel layers under the influence of a magnetic field* / Ispas A., Matsushima H., Bund A., Bozzini B. // *J. Electroanal. Chem.* – 2009. – Vol.626. – No. 1-2. – P.174-182.

9. *Weinmann M., Jung A., Natter H. Magnetic field-assisted electroforming of complex geometries* // *J. Solid State Electrochem.* – 2013. – Vol.17. – P.2721-2729.

10. *Copper electrodeposition under a weak magnetic field: Effect on the texturing and properties of the deposits* / Kovalyov S.V., Girin O.B., Debiemme-Chouvy C., Mishchenko V.I. // *J. Appl. Electrochem.* – 2021. – Vol.51. – No. 11. – P.235-243.

11. *Influence of weak magnetic field on electrodeposition and properties of copper films* / Kovalyov S.V., Debiemme-Chouvy C., Koval'ova N.V. // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2021. – Vol.57. – No. 3. – P.308-314.

12. *Kovalyov S.V., Girin O.B., Debiemme-Chouvy C. Properties of tin films electrodeposited under a weak magnetic field* // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2018. – Vol.54. – P.593-598.

13. *Патент 119771 С2 Україна, МПК (2019.01). Спосіб електрохімічного одержання покриттів в магнітному полі.* – Ковальов С.В., Гірін О.Б., Косолапов А.О. – № а 2016 11847; Заявл. 23.11.2016; Опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15. – 2 с.

14. *An Y.-A., Wu W., Wang Q. Optimization of process parameters for electrodeposited watts nickel coating using a genetic algorithm approach* // *J. Electrochem. Sci. Technol.* – 2025. – Vol.16. – No. 4. – P.435-455.

15. *Optimization of the preparation parameters of high-strength nickel layers by electrodeposition on mild steel substrates* / Wang D., Li F., Shi Y., Liu M., Liu B., Chang Q. // *Materials.* – 2021. – Vol.14. – Art. No. 5461.

Надійшла до редакції 31.07.2025

ELECTRODEPOSITION OF NICKEL DEPOSITS IN A WEAK-INDUCTION MAGNETIC FIELD AND STUDY OF DEPOSIT PROPERTIES

S.V. Kovalyov^{}, V.I. Mishchenko, N.V. Kovalova, K.M. Sukhyy*
Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, Ukraine

^{*} e-mail: sv_kovalyov@i.ua

The article is devoted to the electrochemical production of nickel deposits in a weak-induction magnetic field at different current densities and to the study of their structure, morphology, and corrosion and mechanical characteristics. It is shown that a parallel magnetic field with an induction of 0.5 mT affects the process of nickel electrodeposition, leading to an increase in the overpotential of the process. Using a magnetic field at different current densities makes it possible to influence the morphology, crystal size, predominant crystallographic orientation of the deposit, hardness, and corrosion properties of the nickel coating. When the current density is increased from 50 to 630 mA/cm², the crystal size of the nickel deposits increases. A change in the surface morphology is observed: at 50 mA/cm², the resulting surface is formed by fine-crystalline grain aggregates with a chaotic (non-uniform) structure; at 100–315 mA/cm², the surface is formed by clearly defined grain aggregates; and at 630 mA/cm², grains in the form of irregular spheres are formed. The hardest (microhardness of the coating was 8600 MPa) and most corrosion-resistant fine-crystalline deposits with a predominant crystallographic orientation of nickel peaks (220) were obtained by electrodeposition under a magnetic field of 0.5 mT at a current density of 50 mA/cm².

Keywords: electrodeposition; magnetic field; nickel deposit; morphology; properties.

REFERENCES

1. Rudnik E. Black nickel coatings: from plating techniques to applications. *Coatings*. 2024; 14: 1588. doi: 10.3390/coatings14121588.
2. Huang X, Fu Z, Yang X, Sun Z, Zhong M, Yi Y, et al. Nanoporous Ni: electrodeposition synthesis, morphology, and magnetic property. *J Porous Mater.* 2014; 21: 9-14. doi: 10.1007/s10934-013-9740-0.
3. Prina-Mello A, Diao Z, Coey JMD. Internalization of ferromagnetic nanowires by different living cells. *J Nanobiotechnology*. 2006; 4: 9. doi: 10.1186/1477-3155-4-9.
4. Ashok Kumar P, Vasanth Kumar D, Davis Hans SJ, Janarthanan P. Investigation of stainless steel 316 coated with nickel. *Mater Today Proc.* 2022; 62(4): 2376-2379. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.852.
5. Long Q, Zhong Y, Wu J. Research progress of magnetic field techniques for electrodeposition of coating. *Int J Electrochem Sci.* 2020; 15: 8026-8040. doi: 10.20964/2020.08.40.
6. Zhang Y, Liu M, Wang M, Xie Q, Yao S. In situ monitoring Ni electrodeposition and stripping on gold electrode surface in a static magnetic field using an electrochemical quartz crystal impedance system. *Sens Actuators B Chem.* 2007; 123: 444-453. doi: 10.1016/j.snb.2006.09.017.
7. Bund A, Ispas A. Influence of a static magnetic field on nickel electrodeposition studied using an electrochemical quartz crystal microbalance, atomic force microscopy and vibrating sample magnetometry. *J Electroanal Chem.* 2005; 575: 221-228. doi: 10.1016/j.jelechem.2004.09.014.

8. Ispas A, Matsushima H, Bund A, Bozzini B. Nucleation and growth of thin nickel layers under the influence of a magnetic field. *J Electroanal Chem*. 2009; 626: 174-182. doi: 10.1016/j.jelechem.2008.12.015.
9. Weinmann M, Jung A, Natter H. Magnetic field-assisted electroforming of complex geometries. *J Solid State Electrochem*. 2013; 17: 2721-2729. doi: 10.1007/s10008-013-2172-6.
10. Kovalyov SV, Girin OB, Debiemme-Chouvy C, Mishchenko VI. Copper electrodeposition under a weak magnetic field: effect on the texturing and properties of the deposits. *J Appl Electrochem*. 2021; 51: 235-243. doi: 10.1007/s10800-020-01492-3.
11. Kovalyov SV, Debiemme-Chouvy C, Koval'ova NV. Influence of weak magnetic field on electrodeposition and properties of copper films. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2021; 57: 308-314. doi: 10.3103/S1068375521030091.
12. Kovalyov SV, Girin OB, Debiemme-Chouvy C. Properties of tin films electrodeposited under a weak magnetic field. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2018; 54: 593-598. doi: 10.3103/S1068375518060066.
13. Kovalov SV, Hirin OB, Kosolapov AO, inventors; Ukrainian State University of Chemical Technology, assignee. *Sposib elektrokhimichnoho oderzhannia pokryttiv v mahnitnomu poli* [Method for electrochemical production of coatings in a magnetic field]. Ukraine patent UA 119771. 2019 Aug 12. (*in Ukrainian*).
14. An YA, Wu W, Wang Q. Optimization of process parameters for electrodeposited Watts nickel coating using a genetic algorithm approach. *J Electrochem Sci Technol*. 2025; 16(4): 435-455. doi: 10.33961/jecst.2025.00164.
15. Wang D, Li F, Shi Y, Liu M, Liu B, Chang Q. Optimization of the preparation parameters of high-strength nickel layers by electrodeposition on mild steel substrates. *Materials*. 2021; 14: 5461. doi: 10.3390/ma14185461.