

УДК 669.15-192.017:621.357.7

Є.В. Колесник, О.П. Клименко, А.М. Дудка

ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”, Дніпропетровськ, Україна

**ВЗАЄМОЗВ’ЯЗОК МІЖ МІКРОТВЕРДІСТЮ І МАГНІТНИМ ОПОРОМ  
ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИХ СПЛАВІВ Fe-Cr І Fe-Ni**

**Background.** For thin metal coatings indirect determination of mechanical properties is an actual task. Its accomplishing requires establishing the dependencies between different groups of coatings properties.

**Objective.** The aim of research is identification of the dependence between characteristics of mechanical and magnetic properties of thin electrodeposited coatings, particularly – the iron-based alloys.

**Methods.** 50  $\mu\text{m}$  thick Fe-Cr and Fe-Ni alloys obtained at the temperature of 55 °C and the cathode current density of 10 A/dm<sup>2</sup> from the sulphate electrolytes, containing iron ions (80 g/l) and chromium or nickel ions (from 1 to 40 g/l), have been investigated with definition of microhardness, magnetic resistance, surface morphology, phase composition and preferred crystal orientations.

**Results.** The dependencies of microhardness and magnetic resistance of the Fe-Cr and Fe-Ni alloys on the concentration of the alloying elements in the electrolyte have common non-linear nature and correlate well with the results of precise measurement of the spacing of crystal lattice of the alloys. At that, the content of chromium and nickel in the coatings is not significant impact factor on the properties.

**Conclusions.** The found identical character of microhardness change and magnetic resistance of the alloys indicates significant influence of residual macrostrain on mechanical and magnetic properties of Fe-Cr and Fe-Ni alloys. The reason for non-linear changes in macrostrain in the investigated alloys are the features of structure formation, which can be observed in the formation of surface morphology and preferred crystal orientations.

**Keywords:** electrodeposited coatings; alloy; Fe-Cr; Fe-Ni; microhardness; magnetic resistance; macrostrain; surface morphology; preferred crystal orientations.

**Вступ**

Достовірне визначення механічних властивостей електроосаджених покриттів є важливою науково-технічною задачею – як з огляду на вибір нових перспективних сфер їх застосування, так і для оцінки можливості здійснення тих або інших технологічних операцій у процесі одержання та обробки виробів з покриттями. Тому в науковій літературі, присвяченій електроосадженим покриттям [1–5], механічним властивостям приділяється істотна увага.

Однак мала товщина покриттів, здебільшого вимірюваних мікрометрами, зазвичай істотно ускладнює або взагалі унеможливує застосування стандартних методів випробувань [6–8], передбачених для масивних зразків.

Тому в літературних джерелах були запропоновані різноманітні непрямі методи визначення показників механічних властивостей спеціально для тонких покриттів. Наприклад, існують методика розрахункового визначення границі текучості тонких покриттів, виходячи зі значень їх твердості за Віккерсом [5]; методика визначення залишкових макронапружень за зсувом ліній на рентгенівських дифрактограмах зразків порівняно з дифрактограмою ненапруженого еталона [9]; методика визначення критерію в’язкості руйнування за дов-

жиною радіальних тріщин, одержуваних при мікроіндентуванні поверхні [5], та інші. Також були запропоновані методики визначення майже всього комплексу механічних властивостей тонких покриттів і поверхневих шарів за результатами наноіндентування поверхні [10, 11].

Проте питання непрямого визначення показників механічних властивостей покриттів не можна вважати повністю вичерпаним, у зв’язку з чим виявлення залежностей між різними групами властивостей покриттів уявляється досить актуальною задачею.

Особливий інтерес, зокрема, може становити дослідження магнітних властивостей покриттів, тому що їх вимірювання здійснюється неруйнівним способом і може застосовуватися для досить тонких покриттів за умови виключення впливу на результат матеріалу підкладки. Крім того, вивчення взаємозв’язків між магнітними і механічними властивостями покриттів можна вважати досить актуальним у зв’язку зі стрімким розвитком мікроелектроніки і застосуванням електроосаджених сплавів з особливими магнітними властивостями в цій області.

Сплави Fe-Cr [12, 13] і Fe-Ni [14, 15] поряд з електроосадженим залізом без легування [16–18] можуть бути застосовані в промисловості для відновлення розмірів і одночасного зміцнення зношених у процесі експлуатації деталей

машин. Слід також відзначити застосування сплавів Fe-Ni як покриттів з особливими магнітними властивостями для пристроїв магнітного запису і збереження інформації [19, 20].

### Постановка задачі

Метою роботи є виявлення взаємозв'язку між показниками механічних і магнітних властивостей тонких електроосаджених покриттів на прикладі електроосаджених сплавів на основі заліза (Fe-Cr і Fe-Ni) залежно від концентрації легувальних елементів у електроліті залізнення.

### Матеріал і методика дослідження

Покриття електроосадженим залізом і сплавами Fe-Cr, Fe-Ni завтовшки 50 мкм одержували за температури електроліту 55 °С і катодної щільності струму 10 А/дм<sup>2</sup> із сульфатних електролітів (рН = 2–3), що містять іони заліза – 80 г/л, а також додатково – іони хрому або нікелю, концентрацію яких варіювали від 1 до 40 г/л для одержання сплавів з різним вмістом легувальних елементів. Як підкладку використовували промисловий лист з низьковуглецевої сталі 08кп завтовшки 0,5 мм без додаткової механічної обробки поверхні. Зразки перед осадженням покриттів знежирювали і декапірували. Електроліз здійснювали із застосуванням розчинного залізного анода.

Середній вміст елементів у покриттях і морфологію поверхні досліджували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И, оснащеному системою енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Фазовий склад покриттів визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні міді. Переважні орієнтування кристалів у покриттях оцінювали за співвідношенням інтенсивностей дифракційних максимумів на дифрактограмах зразків. Зразки покриттів досліджували без відділення від підкладки.

Як один із показників механічних властивостей використовували значення мікротвердості, яку вимірювали на стандартному приладі ПМТ-3. Індентор – алмазна чотиригранна піраміда з квадратною основою, навантаження на індентор – 50 гс. Похибка вимірювань становила ± 5 %.

Як один із показників магнітних властивостей було вибрано значення магнітного опору  $R_m$ , яке можна розрахувати, виходячи з обмірюваної індуктивності  $L$  обмотки електромагніта, повітряний зазор якого замикається поверхнею досліджуваного зразка за формулою

$$R_m = \frac{W^2}{L},$$

де  $W$  – кількість витків обмотки.

Однак у зв'язку з наявністю в електромагніті феритового осердя, що робить свій внесок у вимірювану величину, обчислення абсолютних значень магнітного опору в роботі не проводили. Замість цього визначали зміну магнітного опору досліджуваних зразків покриттів сплавами Fe-Cr і Fe-Ni відносно аналогічного зразка покриття електроосадженим залізом без легування.

Для одержання достовірних даних у зв'язку з малою товщиною покриттів як електромагніт малих розмірів застосовували магнітну головку зчитування-запису 1532AF, яку використовують в пристроях запису і збереження інформації. Виміри індуктивності обмотки здійснювали на приладі RLC-2 при частоті струму 1 кГц. Похибка вимірювань не перевищувала ± 1 %.

### Результати дослідження і їх обговорення

Установлено, що фазовий склад усіх досліджених сплавів Fe-Cr і Fe-Ni містить тверді розчини на основі кристалічної решітки  $\alpha$ -заліза. Інтерметаліди у складі покриттів не виявлені. Вміст хрому та нікелю в сплавах збільшується з ростом їх концентрації в сульфатному електроліті у всьому дослідженому діапазоні (рис. 1), однак така залежність для хрому має явно нелінійний характер. Нахил отриманих кривих вказує на те, що швидкість осадження хрому при збільшенні його концентрації в елек-

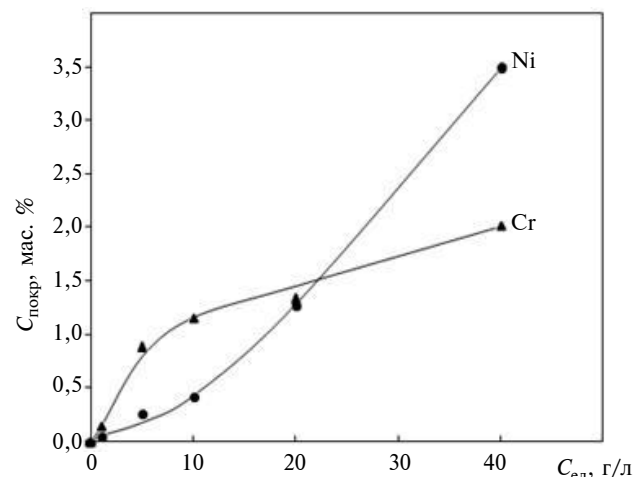


Рис. 1. Вміст хрому і нікелю в сплавах Fe-Cr та Fe-Ni відповідно залежно від концентрації легувального елемента в електроліті

троліті зменшується, в той час як швидкість осадження нікелю є більш стабільною, а його вміст у покриттях залежно від концентрації в електроліті змінюється більш монотонно.

Характер зміни мікротвердості досліджених покриттів (рис. 2) і його зіставлення з даними про вміст легувальних елементів у їх складі (див. рис. 1) указують на слабкий взаємозв'язок між цими параметрами. Деяка кореляція між ними простежується, що пояснюється відомим фактом зміцнення у твердих розчинах на основі заліза, зумовленим наявністю атомів заміщення – хрому та нікелю. Проте очевидно, що концентрація твердих розчинів у цьому випадку не є визначальним фактором зміни мікротвердості, а її коливання, напевне, зумовлене іншими структурними параметрами.

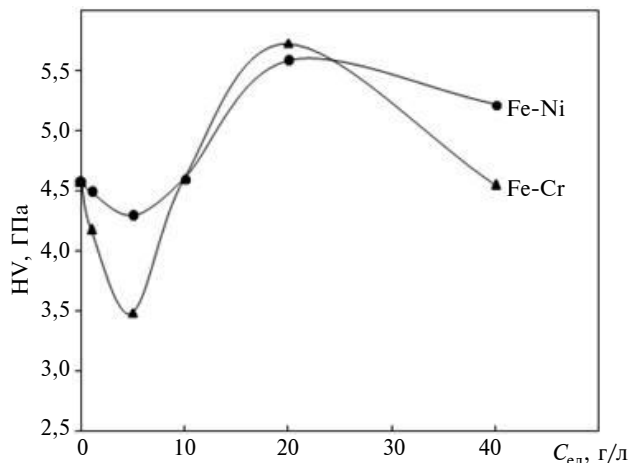


Рис. 2. Мікротвердість сплавів Fe-Cr і Fe-Ni залежно від концентрації легувального елемента в електроліті

Подальші вимірювання магнітного опору одержаних покриттів показали, що його залежність від концентрації легувальних елементів у електроліті (рис. 3) має аналогічний характер з розглянутою залежністю мікротвердості (див. рис. 2) – як для сплавів Fe-Cr, так і для сплавів Fe-Ni. Коефіцієнт лінійної кореляції між зміною магнітного опору і зміною мікротвердості досліджених зразків відносно електроосадженого заліза становив 0,91 і 0,67 для сплавів Fe-Cr і Fe-Ni відповідно.

Проведений на підставі одержаних даних літературний пошук дає змогу вважати, що найбільш вірогідною причиною виявленого одноманітного характеру зміни як мікротвердості, так і магнітного опору можуть бути залишкові макронапруження в покриттях.

Відомо, що для покриттів, одержаних способом електроосадження, зазвичай є характер-

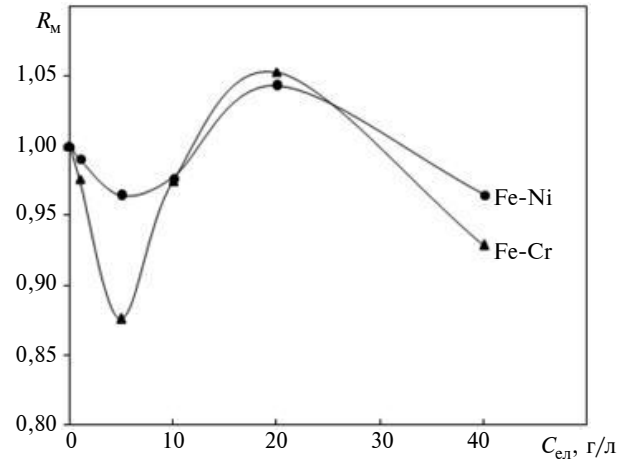


Рис. 3. Магнітний опір сплавів Fe-Cr і Fe-Ni (відносно електроосадженого заліза) залежно від концентрації легувального елемента в електроліті

ним досить високий рівень залишкових напружень [5], підпорядкованих закону Гука і врівноважених в обсязі всього покриття або значної його частини.

Очевидно, що пружне спотворення решітки у покриттях з високим рівнем макронапружень приводить до зміни всього комплексу механічних властивостей і, зокрема, мікротвердості. З іншого боку, відомим є вплив механічних напружень на комплекс магнітних властивостей матеріалів. Дослідженню цього питання присвячені численні праці, наприклад [21–23].

Для перевірки гіпотези про вплив залишкових макронапружень на мікротвердість і магнітний опір електроосаджених сплавів була проведена оцінка кутового зсуву дифракційних максимумів на рентгєнівських дифрактограмах досліджених покриттів з подальшим прецизійним визначенням періоду решітки згідно з методикою [9]. Оскільки зміна періоду решітки зумовлена не тільки макронапруженнями, але й наявністю атомів розчиненого елемента у твердому розчині, то було виконано коригування вимірюваних значень на відповідну величину спотворення решітки, виходячи з відомих концентрацій легувальних елементів у покриттях. При цьому величину зміни періоду, зумовлену наявністю атомів розчиненого елемента, розраховували за методикою Любарди [24]. Отримані залежності коригованого значення періоду решітки від концентрації легувальних елементів (рис. 4) показали добру відповідність до аналогічних залежностей мікротвердості (див. рис. 2) і магнітного опору (див. рис. 3), що вказує на вірогідність висловленої

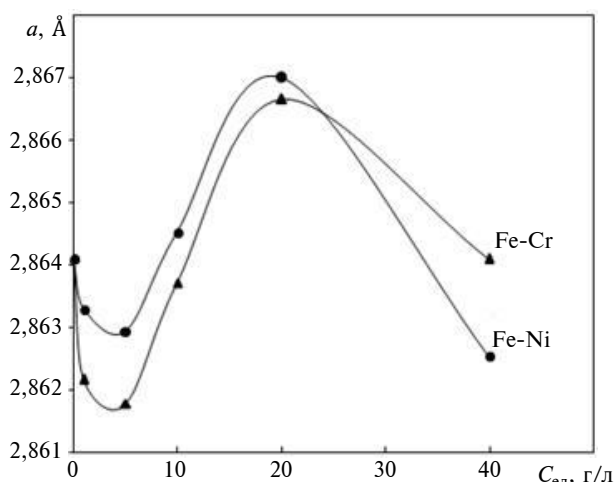


Рис. 4. Зміна періоду решітки сплавів Fe-Cr і Fe-Ni, зумовлена наявністю макронапружень у покриттях, залежно від концентрації легувального елемента в електроліті

гіпотези щодо переважного впливу макронапружень на властивості покриттів. Таким чином, з урахуванням одержаних результатів визначальним фактором зміни мікротвердості і магнітного опору тонких покриттів електроосадженими сплавами Fe-Cr і Fe-Ni можна вважати залишкові макронапруження.

Причиною нелінійної зміни макронапружень у досліджених електроосаджених покриттях залежно від концентрації легувальних елементів у електроліті є особливості їх структуроутворення. Так, структура електроосадженого заліза без легування (рис. 5) представлена компактно розміщеними кристалами з чітким огранюванням і яскраво вираженим переважним орієнтуванням  $\langle 211 \rangle$  (рис. 6). Але вже при концентрації хрому або нікелю в електроліті 5 г/л в структурі покриттів переважають дрібнодисперсні, здебільшого голчасті кристали (рис. 7). При цьому в сплавах Fe-Ni кристали

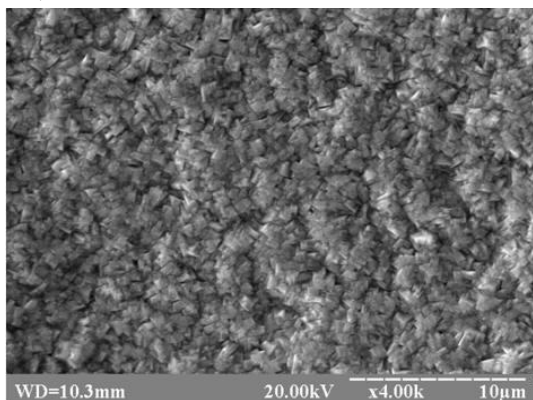


Рис. 5. Морфологія поверхні електроосадженого заліза без легування,  $\times 10$  мкм

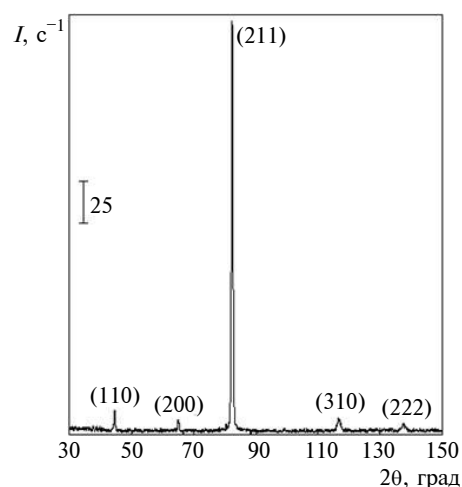


Рис. 6. Дифрактограма електроосадженого заліза без легування, Cu-Kα

мають переважне орієнтування  $\langle 111 \rangle$  (рис. 8) і утворюють порівняно гладкий рельєф поверхні. У сплавах Fe-Cr дрібнодисперсні кристали формують різномірні за розмірами, досить рельєфні конгломерати. У цьому випадку переважне орієнтування кристалів  $\langle 211 \rangle$ , характерне для чистого заліза, зберігається, однак істотно зростає об'ємна частка кристалів із невпорядкованим орієнтуванням (рис. 8). Дисперсність такої структури, напевне, є причиною зниження макронапружень у покриттях, що формуються.

Подальше збільшення концентрації легувальних елементів в електроліті до 20 г/л приводить до поступового росту рівня макронапружень, що може бути пов'язане з укрупненням структурних складових покриттів. Так, у сплавах Fe-Ni дрібнодисперсні кристали формують агрегати радіально-променевої будови – сфероліти, які є однією з характерних форм росту електроосаджених металів [25, 26] і належать до квазікристалічних структур [26]. У сплавах Fe-Cr формування сферолітів не відбувається, однак спостерігається як укрупнення кристалів з проявом типових ознак огранювання кристалів чистого заліза, так і деяке збільшення розмірів утворених ними конгломератів.

Подальше збільшення концентрації легувальних елементів у електроліті до 40 г/л приводить до структурної неоднорідності електроосаджених покриттів, найбільш вираженої в сплавах Fe-Cr, в структурі поверхні яких можна спостерігати окремі великі кристали (див. рис. 7), що може бути пов'язане з появою орієнтування  $\langle 110 \rangle$  (рис. 8). У сплавах Fe-Ni наявні як окремі сфероліти з чіткою радіально-про-

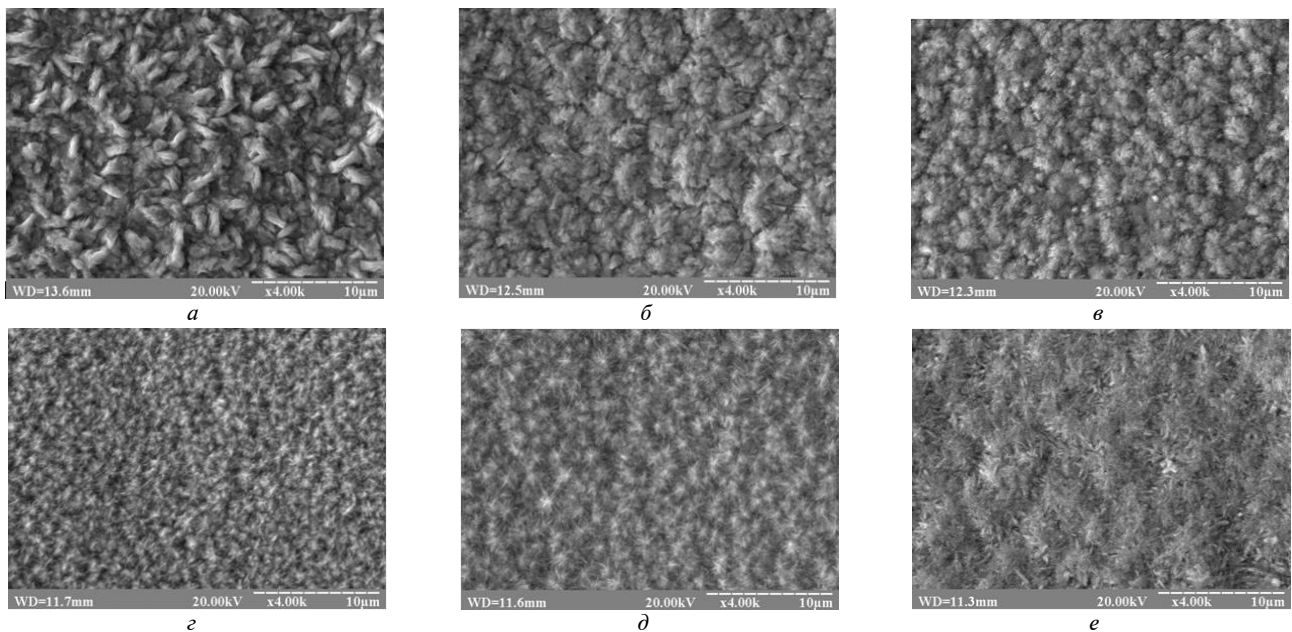


Рис. 7. Морфологія поверхні сплавів на основі заліза, одержаних з електролітів із різною концентрацією легувальних елементів (*a–в* – Cr, *г–е* – Ni): *a, г* – 40 г/л; *б, д* – 20 г/л; *в, е* – 5 г/л;  $\times 10$  мкм

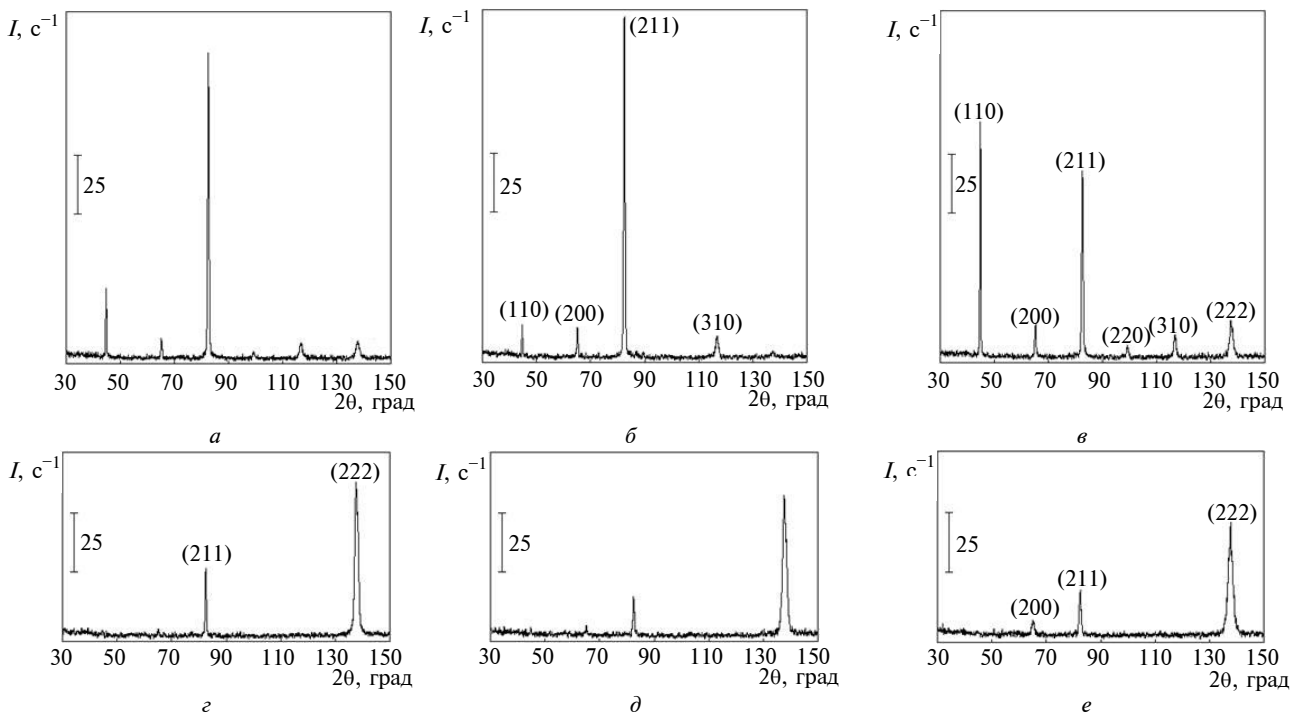


Рис. 8. Дифрактограми сплавів на основі заліза, одержаних з електролітів із різною концентрацією легувальних елементів (*a–в* – Cr, *г–е* – Ni), Cu-K $\alpha$ : *a, г* – 5 г/л; *б, д* – 20 г/л; *в, е* – 40 г/л

меневою симетрією, так і ділянки поверхні з неупорядковано розміщеними голчастими кристалами. За такої концентрації нікелю об'ємна частка кристалів з орієнтуванням  $\langle 111 \rangle$ , характерним для сферолітної структури, зменшується (рис. 8). Як виявилось, в цьому випадку різномірність структури пов'язана з істот-

ним зменшенням макронапружень у покриттях. Очевидно, наявність різномірних за розмірами структурних складових приводить до деякої компенсації і взаємного врівноваження напружень на окремих ділянках покриття, що формується, у процесі заповнення його поверхні електроосаджуваним металом.

## Висновки

Зміна мікротвердості низьколегованих сплавів Fe-Cr і Fe-Ni залежно від концентрації легувальних елементів у сульфатних електролітах, що застосовують для їх електроосадження, має спільний нелінійний характер. При цьому вміст хрому та нікелю в складі покриттів не є визначальним фактором впливу на мікротвердість. Виявлений ідентичний характер зміни мікротвердості і магнітного опору сплавів залежно від концентрації легувальних елементів в електроліті дає підставу припускати переважний вплив залишкових макронапружень на механічні та магнітні властивості досліджених сплавів, що отримало підтвердження за даними прецизійного вимірювання періоду кристалічної решітки сплавів. Причиною нелінійної змі-

ни макронапружень у досліджених електроосаджених сплавах є особливості їх структуроутворення, що простежуються у формуванні морфології поверхні та переважних орієнтувань кристалів.

З метою розширення одержаних результатів і підтвердження виявлених закономірностей імовірним напрямом подальших досліджень може бути визначення інших показників механічних і магнітних властивостей розглянутих електроосаджених покриттів сплавами Fe-Cr і Fe-Ni. Також певний інтерес може становити спільне дослідження механічних і магнітних властивостей електроосаджених покриттів сплавами системи Fe-Cr-Ni з різною концентрацією хрому та нікелю й іншими сплавами на основі заліза.

## Список літератури

1. *Safranek W.H.* The properties of electrodeposited metals and alloys. – Orlando: American Electroplaters & Surface Finishers Society, 1986. – 550 p.
2. *Coated metal structure and properties of metal-coating compositions / L. Tushinsky, I. Kovensky, A. Plokhov et al.* – Berlin: Springer-Verlag, 2002. – 446 p.
3. *Gamburg Y.D., Zangari G.* Theory and practice of metal electrodeposition. – New York: Springer, 2011. – 378 p.
4. *Dini J.W.* Electrodeposition: the materials science of coatings and substrates. – Westwood: Noyes Publications, 1993. – 367 p.
5. *Ковенский И.М., Поветкин В.В.* Металловедение покрытий. – М.: Интермет инжиниринг, 1999. – 296 с.
6. *Pelleg J.* Mechanical properties of materials (Solid mechanics and its applications). – New York: Springer, 2013. – 634 p.
7. *Dowling N.E.* Mechanical behavior of materials. – New Jersey: Prentice Hall, 2012. – 960 p.
8. *Золоторевский С.М.* Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
9. *Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.* Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 2002. – 358 с.
10. *Головин Ю.И.* Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // Физика твердого тела. – 2008. – № 12. – С. 2113–2142.
11. *Головин Ю.И.* Исследование механических свойств материалов методом наноиндентирования (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 2. – С. 37–52.
12. *Колесник Е.В., Величко М.Т.* Особенности формирования структуры электроосажденных Fe-Cr покрытий // Металлознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 64–68.
13. *Wang F., Watanabe T.* Preparation and characterization of the electrodeposited Fe-Cr alloy film // Materials Sci. Eng. A. – 2003. – № 1-2. – P. 183–190.
14. *Колесник Е.В.* Особенности структурообразования электроосажденных сплавов Fe-Ni // Науковий вісник Нац. гірничого ун-ту. – 2013. – № 5. – С. 62–66.
15. *Kolesnyk Ie.* Influence of metal ions in iron-plating solution on structure formation of electrodeposited iron-based coatings // Chimia. – 2013. – № 7-8. – P. 575.
16. *Pleshka E.D.* Iron coatings from multicomponent methyl sulfate chloride electrolyte // Surface Eng. Appl. Electrochem. – 2008. – № 4. – P. 264–270.
17. *Лихачев В.А.* Восстановление изношенных деталей методом холодного железнения // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2006. – № 1. – С. 14–18.
18. *Электролитическое осаждение железа / Ю.Н. Петров, Г.В. Гурьянов, Ж.И. Бобанова и др.* – Кишинев: Штиинца, 1990. – 195 с.
19. *Properties and applications for electrodeposited nanocrystalline Fe-Ni alloys / J.L. Mccrea, G. Palumbo, G.D. Hibbard, U. Erb // Rev. Adv. Mat. Scie.* – 2003. – № 1. – P. 252–258.

20. *Mechanism of Anomalous Type Electrodeposition of Fe-Ni Alloys from Sulfate Solutions* / H. Nakano, M. Matsuno, S. Oue et al. // *Materials Transactions*. – 2004. – № 11. – P. 3130–3135.
21. *Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Лукьянов Н.В.* Влияние механических напряжений на магнитные и электрические свойства полого ферромагнитного ротора полифункционального электромеханического преобразователя // *Вісник НТУ “ХПІ”*. – 2012. – № 3. – С. 61–66.
22. *Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики трубной стали 09Г2С* / Э.С. Горкунов, А.Н. Мушников, С.М. Задворкин, Е.И. Якушенко // *Научни известия на НТСМ*. – 2012. – № 1. – С. 12–15.
23. *Мирошников В.В., Завальнюк О.П.* Исследование возможности контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла // *Вісник НТУ “ХПІ”*. – 2013. – № 34. – С. 12–17.
24. *Lubarda V.A.* On the effective lattice parameter of binary alloys // *Mech. Mater.* – 2003. – № 1-2. – P. 53–68.
25. *Мамонтов Е.А., Курбатова Л.А., Воленко А.П.* Сферолиты как форма роста электролитических осадков // *Электрохимия*. – 1985. – № 9. – С. 1211–1214.
26. *Викарчук А.А.* Классификация структур, формирующихся при электрокристаллизации металлов с гранцентрированной кубической решеткой // *Электрохимия*. – 1992. – № 7. – С. 974–982.

### References

1. W.H. Safranek, *The Properties of Electrodeposited Metals and Alloy*. Orlando: American Electroplaters & Surface Finishers Society, 1986, 550 p.
2. L. Tushinsky et al., *Coated Metal Structure and Properties of Metal-Coating Compositions*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002, 446 p.
3. Y.D. Gamburg and G. Zangari, *Theory and Practice of Metal Electrodeposition*. New York: Springer, 2011, 378 p.
4. J.W. Dini, *Electrodeposition: the Materials Science of Coatings and Substrates*. Westwood: Noyes Publications, 1993, 367 p.
5. I.M. Kovenskiy and V.V. Povetkin, *Metals Science of Coatings*. Moscow, Russia: Internet Engineering, 1999, 296 p. (in Russian).
6. J. Pelle, *Mechanical Properties of Materials (Solid mechanics and its applications)*. New York: Springer, 2013, 634 p.
7. N.E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*. New Jersey: Prentice Hall, 2012, 960 p.
8. S.M. Zolotarevskiy, *Mechanical Properties of Metals*. Moscow, Russia: Metallurgiya, 1983, 352 p. (in Russian).
9. S.S. Gorelik et al., *Roentgenography and Electron-Optical Analysis*. Moscow, Russia: MISIS, 2002, 358 p. (in Russian).
10. Yu.I. Golovin, “Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers and films (review)”, *Fizika Tverdogo Tela*, no. 12, pp. 2113–2142, 2008 (in Russian).
11. Yu.I. Golovin, “Investigation of mechanical properties of materials by the method of nanoindentation (review)”, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, no. 2, pp. 37–52, 2009 (in Russian).
12. Ie.V. Kolesnyk and M.T. Velychko, “Features of structure formation of electrodeposited Fe-Cr coatings”, *Metaloznavstvo ta Termichna Obrobka Metaliv*, no. 4, pp. 64–68, 2013 (in Russian).
13. F. Wang and T. Watanabe, “Preparation and characterization of the electrodeposited Fe-Cr alloy film”, *Mat. Sci. Eng. A*, no. 1-2, pp. 183–190, 2003.
14. Ie.V. Kolesnyk, “Features of structure formation of electrodeposited alloys Fe-Ni”, *Sci. Bull. Nat. Mining Univ.*, no 5, pp. 62–66, 2013 (in Russian).
15. Ie. Kolesnyk, “Influence of metal ions in iron-plating solution on structure formation of electrodeposited iron-based coatings”, *Chimia*, no. 7-8, p. 575, 2013.
16. E.D. Pleshka, “Iron coatings from multicomponent methyl sulfate chloride electrolyte”, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, no. 4, pp. 264–270, 2008.
17. V.A. Likhachev, “Restoration of depreciated components by the method of cold iron-plating”, *Galvanotekhnika i Obrabotka Poverkhnosti*, no. 1, pp. 14–18, 2006 (in Russian).
18. Yu.N. Petrov et al., *Electrolytic Deposition of Iron*. Chisinau: Shtiintsa, 1990 (in Russian).
19. J.L. Mccrea et al., “Properties and applications for electrodeposited nanocrystalline Fe-Ni alloys”, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, no. 1, pp. 252–258, 2003.
20. H. Nakano et al., “Mechanism of anomalous type electrodeposition of Fe-Ni alloys from sulfate solutions”, *Mater. Trans.*, no. 11, pp. 3130–3135, 2004.
21. N.N. Zablodskiy et al., “Influence of mechanical strain on magnetic and electrical properties of hollow ferromagnetic rotor of polifunctional electromechanical transducer”, *Visnyk NTU “KhPI”*, no. 3, pp. 61–66, 2012 (in Russian).
22. E.S. Gorkunov et al., “Influence of elastic strain by tension (compression), torsion and internal pressure on magnetic characteristics of pipeline steel”, *Sci. Proc. NTSM*, no. 1, pp. 12–15, 2012 (in Russian).

23. V.V. Miroshnikov and O.P. Zavalniuk, "Investigation of a possibility for control of elastic strain by the value of residual magnetization of metal", *Visnyk NTU "KhpI"*, no. 34, pp. 12–17, 2013 (in Russian).
24. V.A. Lubarda, "On the effective lattice parameter of binary alloys", *Mech. Mater.*, no. 1-2, pp. 53–68, 2003.
25. E.A. Mamontov *et al.*, "Spherulites as a form of growth of electrolytic deposits", *Elektrokhimiya*, no. 9, pp. 1211–1214, 1985 (in Russian).
26. A.A. Vikarchuk, "Classification of structures being formed during electrocrystallization of metals with face-centered cubic lattice", *Elektrokhimiya*, no. 7, pp. 974–982, 1992 (in Russian).

Є.В. Колесник, О.П. Клименко, А.М. Дудка

#### ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ МІКРОТВЕРДІСТЮ І МАГНІТНИМ ОПОРОМ ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИХ СПЛАВІВ Fe-Cr І Fe-Ni

**Проблематика.** Для тонких металевих покриттів непряме визначення показників механічних властивостей є актуальною задачею, розв'язання якої потребує установлення залежностей між різними групами властивостей покриттів.

**Мета дослідження.** Метою роботи є виявлення взаємозв'язку між показниками механічних і магнітних властивостей тонких електроосаджених покриттів на прикладі сплавів на основі заліза.

**Методика реалізації.** Досліджено сплави Fe-Cr та Fe-Ni завтовшки 50 мкм, одержані за температури 55 °С і катодної щільності струму 10 А/дм<sup>2</sup> із сульфатних електролітів, що містять іони заліза (80 г/л) та іони хрому або нікелю (від 1 до 40 г/л), з визначенням мікротвердості, магнітного опору, морфології поверхні, фазового складу та переважних орієнтувань кристалів.

**Результати дослідження.** Залежності мікротвердості і магнітного опору сплавів Fe-Cr і Fe-Ni від концентрації легувальних елементів в електроліті мають спільний нелінійний характер і добре корелюють з результатами прецизійного вимірювання періоду кристалічної решітки сплавів. При цьому вміст хрому та нікелю в складі покриттів не є визначальним фактором впливу на властивості.

**Висновки.** Виявлений ідентичний характер зміни мікротвердості і магнітного опору сплавів вказує на значний вплив залишкових макронапружень на механічні та магнітні властивості сплавів Fe-Cr і Fe-Ni. Причиною нелінійної зміни макронапружень у досліджених сплавах є особливості їх структуроутворення, що простежуються у формуванні морфології поверхні та переважних орієнтувань кристалів.

**Ключові слова:** електроосаджені покриття; сплав; Fe-Cr; Fe-Ni; мікротвердість; магнітний опір; макронапруження; морфологія поверхні; переважні орієнтування кристалів.

Є.В. Колесник, А.П. Клименко, А.Н. Дудка

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МИКРОТВЕРДОСТЬЮ И МАГНИТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ СПЛАВОВ Fe-Cr И Fe-Ni

**Проблематика.** Для тонких металлических покрытий косвенное определение показателей механических свойств является актуальной задачей, решение которой требует установления зависимостей между различными группами свойств покрытий.

**Цель исследования.** Целью работы является выявление взаимосвязи между показателями механических и магнитных свойств тонких электроосажденных покрытий на примере сплавов на основе железа.

**Методика реализации.** Исследованы сплавы Fe-Cr и Fe-Ni толщиной 50 мкм, полученные при температуре 55 °С и катодной плотности тока 10 А/дм<sup>2</sup> из сульфатных электролитов, содержащих ионы железа (80 г/л) и ионы хрома или никеля (от 1 до 40 г/л), с определением микротвердости, магнитного сопротивления, морфологии поверхности, фазового состава и преимущественных ориентировок кристаллов.

**Результаты исследования.** Зависимости микротвердости и магнитного сопротивления сплавов Fe-Cr и Fe-Ni от концентрации легирующих элементов в электролите носят общий нелинейный характер и хорошо коррелируют с результатами прецизионного измерения периода кристаллической решетки сплавов. При этом содержание хрома и никеля в составе покрытий не является определяющим фактором влияния на свойства.

**Выводы.** Выведенный идентичный характер изменения микротвердости и магнитного сопротивления сплавов указывает на значительное влияние остаточных макронапряжений на механические и магнитные свойства исследованных сплавов. Причиной нелинейного изменения макронапряжений в исследованных сплавах являются особенности их структурообразования, которые прослеживаются в формировании морфологии поверхности и преимущественных ориентировок кристаллов.

**Ключевые слова:** электроосажденные покрытия; сплав; Fe-Cr; Fe-Ni; микротвердость; магнитное сопротивление; макронапряжения; морфология поверхности; преимущественные ориентировки кристаллов.

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
1 грудня 2014 року