

УДК 544.65

<https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.119>

**Вячеслав ПРОЦЕНКО, Лариса ПАВЛЕНКО, Олександр СУХАЦЬКИЙ,
Тетяна БУТИРІНА, Фелікс ДАНИЛОВ**

ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ НАНОКРИСТАЛІЧНОГО СПЛАВУ НІКЕЛЬ-ЗАЛІЗО З ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ОСНОВІ НОВОГО ТИПУ ЙОННИХ РІДИН – НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЕВТЕКТИЧНОГО РОЗЧИННИКА

*Український державний хіміко-технологічний університет,
проспект Гагаріна, 8, 49005 Дніпро, Україна
e-mail: vprotsenko7@gmail.com*

Розглянуто основні закономірності електрохімічного осадження сплаву нікель-залізо з електроліту на основі евтектичної суміші холін хлориду і етиленгліколю, що є представником нового типу йонних рідин – низькотемпературних евтектичних розчинників (deep eutectic solvents, DES). З'ясовано, що вміст заліза в осадженому сплаві зростає з підвищенням катодної густини струму, за якої проводиться електроліз, а також зі збільшенням концентрації йонів заліза в електроліті та введенні добавки води. Виявлено, що з дослідженого електроліту, що містить добавку води (до 10 мас.%), при густині струму осадження, що не перевищує $1-1,2 \text{ A/дм}^2$, можливе осадження рівномірних нанокристалічних покриттів із вмістом заліза до 10–13%, що характеризуються лускоподібним типом морфології поверхні. У цьому випадку вихід за струмом сплаву наближається до теоретичного значення (97–99%), тобто процес практично не ускладнений перебігом електрохімічних процесів за участю компонентів низькотемпературного евтектичного розчинника.

Ключові слова: електроосадження, сплав нікель-залізо, низькотемпературний евтектичний розчинник, морфологія поверхні, нанокристалічна структура.

Вступ

Електрохімічне осадження покриттів нікелем і сплавом нікель-залізо – один з найефективніших способів поліпшення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей поверхонь різних виробів і конструкцій [1, 2]. Зокрема, електролітичні покриття сплавом нікель-залізо характеризуються підвищеною стійкістю до корозії та зносостійкістю, а також відзначаються корисними магнітними й електрокаталітичними властивостями [2–6]. Традиційно електроосадження покриттів сплаву нікель-залізо проводять з водних розчинів, які поряд з очевидними перевагами мають і низку недоліків [2]. Останніми роками як альтернативу «звичайним» водним електролітам запропонували електрохімічні системи на основі так званих низькотемпературних евтектичних розчинників (deep eutectic solvents, DES) [7, 8].

DES – представники особливого типу йонних рідин і є евтектичними сумішами різноманітних неорганічних та(або) органічних компонентів, в яких завдяки сильній молекулярній взаємодії та утворення водневих зв'язків відбувається електролітична дисоціація і знижується температура плавлення порівняно з температурами плавлення індивідуальних складових суміші. Відносна дешевизна та доступність, нетоксичність, екологічна безпечність, досить широке «електрохімічне вікно», практично нульовий тиск насиченої пари, дещо високі електропровідність і плинність є перевагами, що вигідно відрізняють DES від традиційних низькотемпературних йонних рідин і від органічних розчинників [7, 8].

Протягом останніх років виявили можливість осадження нанокристалічних покриттів нікелем [9, 10] і сплавом нікель-залізо [11–13] з електролітів на основі DES. Зокрема, визначено особливості механізму спільного розряду йонів нікелю та заліза з електроліту на основі DES [11], виявлено електрокаталітичну активність осаджених покриттів сплавом стосовно реакції електровиділення водню та кисню [11, 12], а також детально охарактеризовано магнітні властивості утворюваних покриттів [12, 13]. Незважаючи на низку важливих для теорії та практики опублікованих даних, залишається нез'ясованим певне коло питань стосовно особливостей мікроструктури, морфології поверхні та впливу складу електроліту й умов електролізу на склад осаджених сплавів нікель-залізо. Саме ці проблеми є предметом розгляду у цій праці.

Методика експерименту

Для приготування електроліту використовували низькотемпературний евтектичний розчинник, що є евтектичною сумішшю холін хлориду й етиленгліколю у молярному співвідношенні компонентів 1:2, відповідно (ця суміш отримала тривіальну назву ethaline [7, 8]). Ethaline готували шляхом змішування етиленгліколю (99,9%, AR, Belgium) і холін хлориду (99%, Acros Organics) у зазначеному вище співвідношенні на магнітній мішалці протягом 1 години за 70 °C до утворення прозорої гомогенної рідини. Для приготування електролітів для осадження покриттів розраховані наважки солей нікелю і заліза (NiCl_2 – ангідрид, 99%, Termo Fisher Scientific та $\text{FeCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\geq 98\%$, Carl Roth) додавали до розчинника ethaline та перемішували протягом 7 годин за 70 °C до утворення гомогенної рідини. У певних, спеціально оговорених нижче випадках до електроліту додавали певну кількість води. Вміст води у приготованих електролітах контролювали за методом Фішера. Для запобігання окиснення йонів Fe(II) у контакті з атмосферним киснем до електролітів додавали 2 г/дм³ аскорбінової кислоти.

Електроосадження проводили на підкладку з мідної фольги (діаметр 1,5 см, товщина 0,4 мм), яку попередньо ретельно знежирювали та активували у розчині хлороводневої кислоти. Осадження проводили у гальваностатичному режимі за температури 60 °C з використанням нікелевих анодів за умов безперервного перемішування електроліту на магнітній мішалці (500 об/хв). Тривалість осадження підбирали так, щоб товщина покриттів становила приблизно 10 мкм. Для аналізу хімічного складу покриття, масу якого визначали гравіметрично, використовували метод рентгеноспектрального електронно-зондового мікроаналізу (EDX, приставка Oxford INCA Energy 350, умонтована в електронний мікроскоп). Для дослідження особливостей морфології поверхні осаджених покриттів використовували електронний сканувальний мікроскоп Zeiss EVO 40XVP. X-променеві дифрактограми отримували методом відбиття за допомогою приладу ДРОН-3.0 (монохроматизоване

CuK_α -випромінювання, товщина досліджуваних плівок електроосаджених покриттів становила приблизно 25 мкм).

Результати та обговорення

Вплив концентрації йонів заліза(II) в електроліті на основі DES на хімічний склад утворюваного покриття сплавом вивчали за сталого значення густини струму осадження та постійної концентрації йонів нікелю(II) (рис. 1). Як видно з отриманих результатів, зростання концентрації йонів Fe(II) приводить до монотонного збільшення вмісту заліза в гальваноосаді, причому ці залежності практично лінійні. Цікаво, що у разі використання електроліту, який містить певну кількість спеціально доданої води, вміст заліза у сплаві суттєво вищий (рис. 1 крива 2), ніж у разі використання електроліту без спеціально доданої води (рис. 1, крива 2). Такий ефект пояснили раніше [11] специфічним впливом води на кінетику розряду йонів заліза. Річ у тім, що присутність певної кількості води у розчині сприяє утворенню в приелектродному шарі гідросокомплексів заліза, що, як вважається [14], суттєво прискорює парціальну реакцію електроосадження залізного компонента сплаву і приводить до зростання вмісту заліза у сплаві Ni–Fe. Варто зазначити, що додавання певної кількості води до електроліту на основі DES дає змогу не тільки цілеспрямовано впливати на кінетику парціальних електродних реакцій, а отже, і на склад покриття, а й підвищити електропровідність розчину та знизити його в'язкість [15], що є позитивним ефектом з погляду потенційного використання цього процесу у промислових умовах [16].

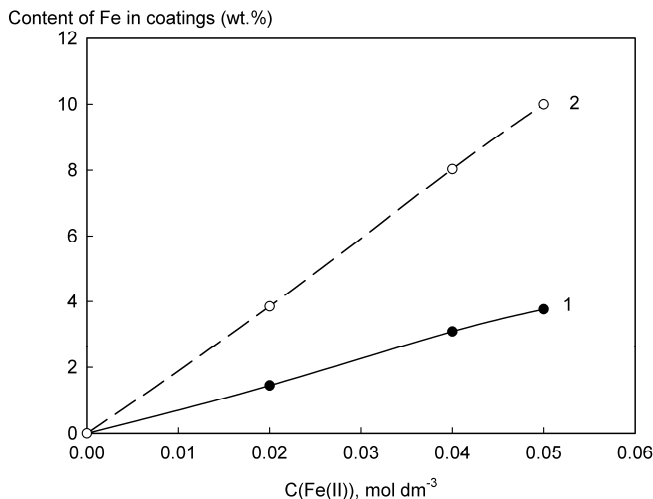


Рис. 1. Залежність вмісту заліза в покритті Ni–Fe, осадженому з електроліту на основі ethaline, що містить 0,5 М Ni(II), від концентрації йонів заліза.

Катодна густина струму 0,5 А/дм². Вміст води в електроліті (мас.%): 1 – 1,5; 2 – 10.

Fig. 1. Dependence of the content of iron in Ni–Fe coatings deposited from the electrolyte based on ethaline containing 0.5 M Ni(II) on the concentration of Fe(II) ions.

Cathode current density is 0.5 A/dm². Water content in the electrolyte (wt.%): 1 – 1.5; 2 – 10.

З'ясовано, що збільшення вмісту йонів заліза(II) в електроліті понад $0,05$ моль/дм³ є недоцільним, бо за таких умов помітно прискорюється реакція окиснення йонів Fe(II) киснем повітря навіть за наявності в розчині антиоксиданта – аскорбінової кислоти. У цьому випадку візуально спостерігається потемніння електроліту, зміна його кольору на темно-брунатний, осаджуються шорсткуваті покриття, що погано зчеплені з підкладкою.

Вміст заліза в електроосадженому сплаві зростає з підвищенням концентрації води в розчині та зі збільшенням катодної густини струму (рис. 2). Розрахунки, проведені за допомогою закону Фарадея на підставі даних гравіметричних вимірювань та аналізу хімічного складу покриття, виявили, що вихід за струмом сплаву наближається до теоретичного значення (97–99%), тобто електроосадження практично не ускладнене перебігом електрохімічних процесів за участю компонентів низькотемпературного евтектичного розчинника. Однак варто зауважити, що у разі використання електролітів, що містять більше 10 мас.% води та у високих густинах струму (більше $1\text{--}1,2$ А/дм²) вихід за струмом починає помітно знижуватись, а якість утворюваних покриттів суттєво погіршується (вони стають темними, крихкими, легко відшаровуються від основи).

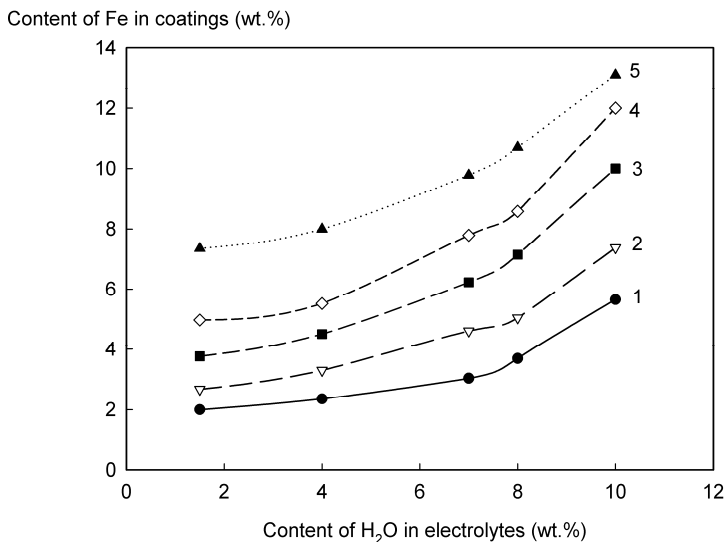


Рис. 2. Залежність вмісту заліза в покритті Ni–Fe, осадженому з електроліту на основі ethaline, що містить $0,5$ М Ni(II) і $0,05$ М Fe(II), від вмісту води у різних катодних густинах струму (А/дм²): 1 – $0,1$; 2 – $0,25$; 3 – $0,5$; 4 – $0,75$; 5 – $1,2$.

Fig. 2. Dependence of the content of iron in Ni–Fe coatings deposited from the electrolyte based on ethaline containing 0.5 M Ni(II) and 0.05 M Fe(II) on the water content at different current densities (A/dm²): 1 – 0.1 ; 2 – 0.25 ; 3 – 0.5 ; 4 – 0.75 ; 5 – 1.2 .

Отже, для осадження доброякісних покриттів сплавом Ni–Fe з високим виходом за струмом доцільно використовувати електроліт на основі ethaline, що містить добавку води (до 10 мас.%) у густині струму осадження, що не перевищує 1--

1,2 А/дм². За таких умов утворюються рівномірні світло-сірі покриття з вмістом заліза до 10–13%. Як з'ясували раніше [11], такої кількості заліза у сплаві достатньо для забезпечення суттєвого зростання електрокаталітичної активності покриття стосовно реакції електровиділення водню з водних лужних розчинів, які зазвичай використовують для синтезу водню у водневій енергетиці [17].

Дослідження особливостей морфології поверхні покриттів, осаджених з електроліту на основі ethaline, проведене методом сканувальної електронної мікроскопії, виявило, що поверхня «чистого» нікелевого покриття, одержаного з електроліту на основі DES без додатково введеної води, достатньо рівномірна з невеликою кількістю дефектів – пітингів і невеликих пор (рис. 3, *a*). Для покриттів, осаджених з електроліту, що містить добавку води, характерна зерниста морфологія поверхні з великою кількістю асиметричних сфероїдних кристалітів (рис. 3, *b*). При електроосадженні сплаву нікель-залізо вигляд поверхні помітно змінюється:

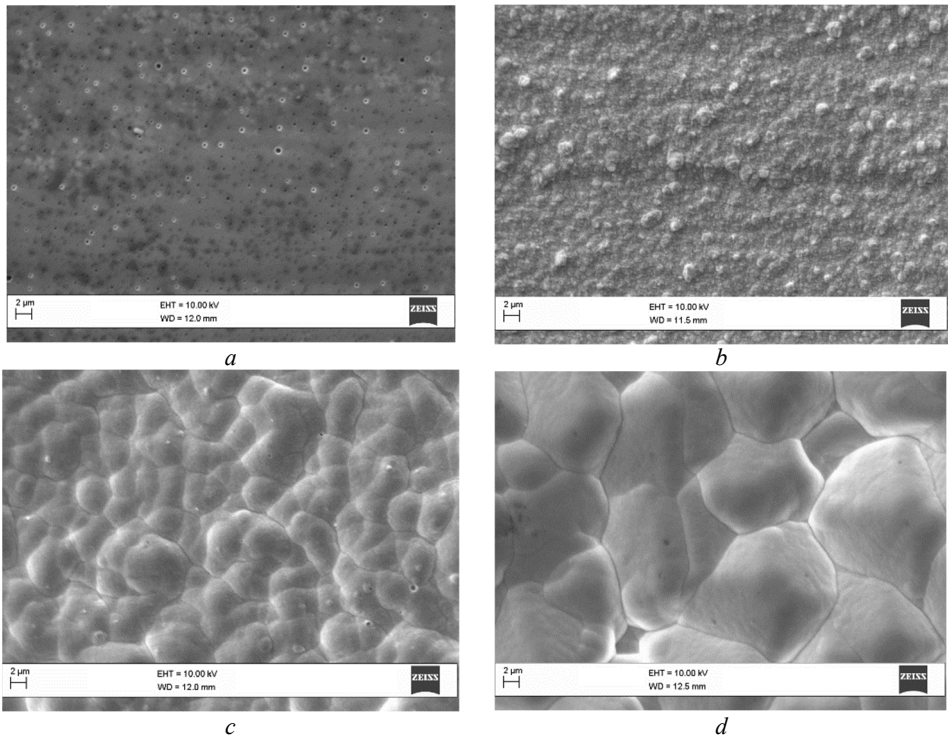


Рис. 3. Мікрофотографії сканувальної електронної мікроскопії поверхні покриттів нікелем (*a, b*) і сплавом нікель–залізо (*c, d*), осаджених з електроліту на основі ethaline, що містить 0,5 М Ni(II) і 0,05 М Fe(II) (*c, d*) у вмісті води 1,5% (*a, c*) і 10% (*b, d*). Катодна густина струму 0,75 А/дм².

Fig. 3. SEM microphotographs of the surface of nickel coatings (*a, b*) and nickel-iron coatings (*c, d*) deposited from the electrolyte based on ethaline containing 0.5 M Ni(II) and 0.05 M Fe(II) (*c, d*) at the water content of 1.5% (*a, c*) and 10% (*b, d*). Cathode current density is 0.75 A/dm².

спостерігається формування викривлених сфероїдів, що накладаються один на одного й утворюють лускоподібний тип морфології поверхні (рис. 3, *c,d*). При впровадженні додаткової води до складу електроліту, що, як з'ясовано вище, сприяє підвищенню вмісту заліза в покритті, розмір лускоподібних фрагментів мікроструктури на поверхні дещо зростає. Суттєво, що у всіх випадках на поверхні покриттів практично немає тріщин.

На X-променевих дифрактограмах покриттів нікелем і сплавом нікель–залізо (рис. 4) наявні розмиті дифракційні максимуми, що свідчить про формування нанокристалічних покриттів. Дифракційні максимуми, що спостерігаються за $2\theta = 44,7^\circ$, $51,9^\circ$ і $76,8^\circ$, відповідають площинам (111), (200) і (220) гранецентрованої кубичної (ГЦК) ґратки нікелю. Як і можна було очікувати [18], електроосаджених сплав нікель–залізо з порівняно невеликим вмістом заліза (до ~ 7 мас.%) демонструє X-променеві дифрактограми, притаманні для ГЦК ґратки індивідуального нікелю. Це означає, що на катоді утворюється твердий розчин заліза у нікелю.

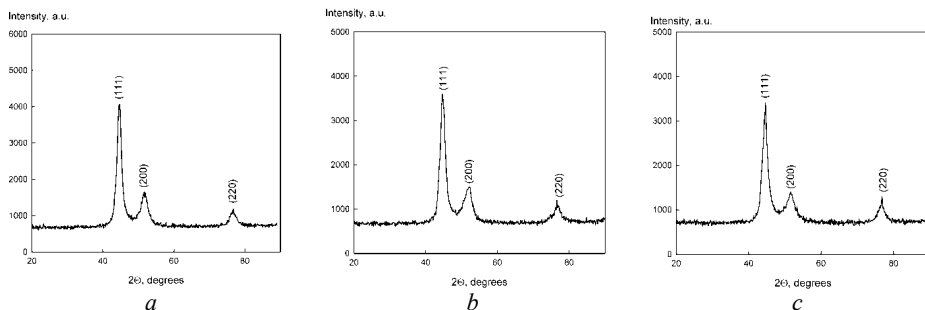


Рис. 4. X-променеві дифрактограми покриттів нікелем (*a*) і сплавом нікель–залізо (*b, c*), що містять 2 мас.% Fe (*b*) і 7,3 мас.% Fe (*c*).

Fig. 4. XRD patterns of nickel coatings (*a*) and nickel-iron coatings (*b, c*) containing 2 wt.% Fe (*b*) and 7.3 wt.% Fe (*c*).

Розмір нанокристалітів оцінювали за рівнянням Шеррера

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

де D – середній розмір кристалітів; λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання; β – ширина піка на половині його висоти (розрахунки проводили для кристаліграфічних площин (111)); θ – кут розсіювання.

Результати розрахунків D подано в табл. Видно, що середній розмір нанокристалітів перебуває у діапазоні від 6 до 15 нм, що узгоджується з відомими літературними даними, які стосуються покриттів нанокристалічного нікелю, електроосаджених з електролітів на основі DES [10, 16]. Підвищення вмісту заліза у сплаві приводить до певного зростання середнього розміру нанокристалітів.

Висновки

Визначено основні закономірності електрохімічного осадження сплаву нікель–залізо з електроліту на основі йонної рідини – евтектичної суміші холін хлориду й

етиленгліколю (ethaline). З'ясовано, що вміст заліза в електролітичному покритті зростає з підвищенням катодної густини струму, а також концентрацій іонів Fe(II) і добавки води в електроліті.

Таблиця

Обчислені значення середнього розміру кристалітів у покриттях Ni і Ni-Fe, осаджених з електроліту на основі DES

Table

Calculated values of average sizes of crystallites in Ni and Ni-Fe coatings deposited from the DES-based electrolyte

Вміст заліза у покритті, мас.%	Середній розмір кристалітів, нм	
0	6,1	
2	8,3	
7,3	14,5	

Виявлено, що шари осадженого сплаву Ni–Fe характеризуються лускоподібною морфологією поверхні. Електролітичні покриття нікель-залізо (до ~7% Fe), утворені з електроліту на основі ethaline, є нанокристалічними розчинами заліза у нікелю з гранецентрованою кубічною ґраткою нікелю і середнім розміром нанокристалітів близько 6–15 нм. До основних переваг дослідженої системи порівняно з відомими процесами осадження сплаву нікель-залізо з традиційних водних розчинів можна зачислити практичну відсутність поверхневих дефектів (тріщин і пор), а також вихід за струмом сплаву, що наближається до 100% теоретичного значення унаслідок того, що не відбувається перебігу побічних електрохімічних процесів розкладання компонентів розчинника (у водних системах таким побічним процесом є катодне виділення водню при розряді йонів водню і/або молекул води).

Подяки

Ця робота виконана за фінансової підтримки МОН України (проект «Фундаментальні засади електрохімічного синтезу електрокаталізаторів з використанням новітнього типу іонних рідин – низькотемпературних евтектичних розчинників», номер держреєстрації 0121U109551).

Автори щиро вдячні д-ру тех. наук Корнію С.А. (Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів) за проведення SEM та EDX дослідження зразків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Oriňáková R., Turoňová A., Kladeková D., Gálová M., Smith R.M. Recent developments in the electrodeposition of nickel and some nickel-based alloys. *J. Appl. Electrochem.* 2006. Vol. 36. P. 957–972. (<https://doi.org/10.1007/s10800-006-9162-7>).
2. Torabinejad V., Aliofkhaeaei M., Assareh S., Allahyarzadeh M.H., Rouhaghdam A.S. Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings – a review. *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 691. P. 841–859. (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.329>).
3. Rashmi D., Pavithra G.P., Praveen B.M., Devapal D. Development of nanocrystalline multilayer Ni–Fe alloy coatings: characterization and its corrosion behaviour at elevated

- temperature. *Bull. Mater. Sci.* 2020. Vol. 43. Art. No. 131. (<https://doi.org/10.1007/s12034-020-02087-6>).
4. *Matsui I., Kawakatsu T., Takigawa Y., Uesugi T., Higashi K.* Fabrication of bulk nanocrystalline Fe–Ni alloys with high strength and high ductility by an electrodeposition. *Mater. Lett.* 2014. Vol. 116. P. 71–74. (<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.108>).
 5. *Jinlong L., Yang M., Suzuki K., Miura H., Zhang Y.* Comparison of corrosion resistance of electrodeposited pure Ni and nanocrystalline Ni–Fe alloy in borate buffer solution. *Mater. Chem. Phys.* 2017. Vol. 202. P. 15–21. (<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.09.005>).
 6. *Buccheri B., Ganci F., Patella B., Aiello G., Mandin P., Inguanta R.* Ni–Fe alloy nanostructured electrodes for water splitting in alkaline electrolyser. *Electrochim. Acta.* 2021. Vol. 388. Art. No. 138588. (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138588>).
 7. *Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S.* Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chem. Rev.* 2014. Vol. 114. P. 11060–11082. (<https://doi.org/10.1021/cr300162p>).
 8. *Hansen B.B., Spittle S., Chen B., Poe D., Zhang Y., Klein J.M., Horton A., Adhikari L., Zelovich T., Doherty B.W., Gurkan B., Maginn E.J., Ragauskas A., Dadmun M., Zawodzinski T.A., Baker G.A., Tuckerman M.E., Savinell R.F., Sangoro J.R.* Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications. *Chem. Rev.* 2021. Vol. 121. P. 1232–1285. (<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00385>).
 9. *Abbott A.P., Ballantyne A., Harris R.C., Juma J.A., Ryder K.S., Forrest G.* A comparative study of nickel electrodeposition using deep eutectic solvents and aqueous solutions. *Electrochim. Acta.* 2015. Vol. 176. P. 718–726. (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.051>).
 10. *Gu C.D., You Y.H., Yu Y.L., Qu S.X., Tu J.P.* Microstructure, nanoindentation, and electrochemical properties of the nanocrystalline nickel film electrodeposited from choline chloride–ethylene glycol. *Surf. Coat. Technol.* 2011. Vol. 205. P. 4928–4933. (<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.04.098>).
 11. *Danilov F.I., Bogdanov D.A., Smyrnova O.V., Korniy S.A., Protsenko V.S.* Electrodeposition of Ni–Fe alloy from a choline chloride-containing ionic liquid. *J. Solid State Electrochem.* 2022. Vol. 26. P. 939–957. (<https://doi.org/10.1007/s10008-022-05137-7>).
 12. *Oliveira F.G.S., Santos L.P.M., da Silva R.B., Correa M.A., Bohn F., Correia A.N., Vieira L., Vasconcelos I.F., de Lima-Neto P.* Fe_xNi_(1-x) coatings electrodeposited from choline chloride–urea mixture: magnetic and electrocatalytic properties for water electrolysis. *Mater. Chem. Phys.* 2022. Vol. 279. Art. No. 125738. (<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125738>).
 13. *Yanai T., Akiyoshi T., Yamaguchi T., Takashima K., Morimura T., Nakano M., Fukunaga H.* Effect of primary amines on magnetic properties of Fe–Ni films electroplated in a DES-based plating bath. *AIP Adv.* 2018. Vol. 8. Art. No. 056106. (<https://doi.org/10.1063/1.5007189>).
 14. *Zech N., Podlaha E.J., Landolt D.* Anomalous codeposition of iron group metals. II. Mathematical model. *J. Electrochem. Soc.* 1999. Vol. 146. P. 2892–2900. (<https://doi.org/10.1149/1.1392025>).
 15. *Protsenko V.S., Kityk A.A., Shaiderov D.A., Danilov F.I.* Effect of water content on physicochemical properties and electrochemical behavior of ionic liquids containing choline chloride, ethylene glycol and hydrated nickel chloride. *J. Mol. Liq.* 2015. Vol. 212. P. 716–722. (<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.10.028>).
 16. *Danilov F.I., Protsenko V.S., Kityk A.A., Shaiderov D.A., Vasil'eva E.A., Pramod Kumar U., Joseph Kennedy C.* Electrodeposition of nanocrystalline nickel coatings from a deep eutectic solvent with water addition. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2017. Vol. 53. P. 1131–1138. (<https://doi.org/10.1134/S2070205118010203>).
 17. *Gong M., Wang D.Y., Chen C.C., Hwang B.J., Dai H.* A mini review on nickel-based electrocatalysts for alkaline hydrogen evolution reaction. *Nano Res.* 2016. Vol. 9. P. 28–46. (<https://doi.org/10.1007/s12274-015-0965-x>).

18. *Koo B., Yoo B.* Electrodeposition of low-stress NiFe thin films from a highly acidic electrolyte. *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. P. 740–744. (<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.076>).

SUMMARY

*Vyacheslav PROTSENKO, Larysa PAVLENKO, Olexandr SUKHATSKYI,
Tetyana BUTYRINA, Felix DANILOV*

ELECTRODEPOSITION OF NANOCRYSTALLINE NICKEL-IRON ALLOY FROM AN ELECTROLYTE BASED ON A NEW TYPE OF IONIC LIQUIDS – DEEP EUTECTIC SOLVENT

*Ukrainian State University of Chemical Technology,
Gagarin Ave., 8, 49005 Dnipro, Ukraine
e-mail: vprotsenko7@gmail.com*

The paper reports the main features of electrochemical deposition of nickel-iron alloy from electrolyte based on the eutectic mixture of choline chloride and ethylene glycol, which is a typical representative of a new type of ionic liquids, deep eutectic solvents (DES). It is found that the iron content in the deposited alloy increases with both increasing the applied cathode current density and increasing the concentration of iron ions in the electrolyte and the introduction of water additives. Thus, variation in the current density and the concentration of water additive in electrolytes based on DES is the factor of influence on the kinetics of partial electrode reactions, and hence on the composition and properties of the coating.

It is shown that it is possible to deposit uniform coatings with iron content up to 10–13% from the investigated electrolyte containing water additive (up to 10 wt.%) at the deposition current density not exceeding 1–1.2 A/dm². The current efficiency of the alloy deposition is close to the theoretical value (97–99%), i.e. the electrodeposition is practically not complicated by electrochemical processes involving components of a deep eutectic solvent.

The surface of pure nickel deposited from an electrolyte based on DES without additional water is quite uniform with a small number of defects, pitting and small pores, while coatings deposited from the electrolyte containing water additives are characterized by granular surface morphology with many asymmetric spheroidal crystallites. The electrodeposition of a nickel-iron alloy yields the surface built of irregular spheroids that overlap and form a scaly-like type of surface morphology.

Nickel-iron electrolytic coatings containing up to ~7% Fe, formed from the ethaline-based electrolyte, are nanocrystalline solutions of iron in nickel with a face-centered cubic nickel lattice and an average nanocrystallite size of about 6–15 nm.

Nickel-iron alloy coatings electrochemically deposited under the conditions established in this work may be considered as promising electrode materials for the creation of new cheap and highly efficient electrocatalysts for water electrolysis in hydrogen energy.

Keywords: electrodeposition, nickel-iron alloy, deep eutectic solvent, surface morphology, nanocrystalline structure.

Стаття надійшла: 17.06.2022.
Після доопрацювання: 03.08.2022.
Прийнята до друку: 30.09.2022.