

sul'firovannykh gumatov natriya [Influence of strong electrolytes on the aqueous solutions of Na-salt native and sulfonated sodium humates]. *Kolloidnyi Zhurnal*, 2001, vol. 63, no. 5, pp. 706-710. (in Russian).

6. Zhorobekova Sh.Zh., Mal'tseva G.M. O konformatsonnoi izmenchivosti guminovykh kislot [About the conformational variability of humic acids]. *Khimiya Tverdogo Topliva*, 1987, no. 3, pp. 34-37. (in Russian).

7. Kucher R.V., Kompaniyets V.A., Butuzova L.F., *Struktura iskopayemykh uglei i ikh sposobnost' k okisleniyu* [The structure of coals and their ability to oxidize]. Naukova Dumka, Kyiv, 1980. 168 p. (in Russian).

8. Rebachuk M.N., Stepanenko L.S., Maksimov O.B. O molekulyarnykh vesakh guminovykh kislot [On the molecular weights of humic acids]. *Khimiya Tverdogo Topliva*, 1972, no. 2, pp. 10-17. (in Russian).

9. Skut D., Uest D., *Osnovy analiticheskoy khimii* [Fundamentals of analytical chemistry]. Mir, Moscow, 1979. Vol. 1. 453 p. (in Russian).

10. Emanuel' N.M., Zaikov G.Ye., Mayzus Z.K., *Rol' sredi v radikal'no-tsepnnykh reaktsiyakh okisleniya organicheskikh soyedineniy* [The role of environment in the radical-chain reac-

tions of organic compounds oxidation]. Nauka, Moscow, 1973. 297 p. (in Russian).

11. Armarego W.L.F., Chai Ch.L.L., *Purification of laboratory chemicals*. Elsevier Science, 2003. 608 p.

12. Efimova I.V., Khil'ko S.L., Smirnova O.V. Antioksidantnaya aktivnost' guminovykh kislot v protsessakh radikal'no-tsepnogo okisleniya [Antioxidant activity of humic acids in the processes of radical chain oxidation]. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, 2012, vol. 85, no. 9, pp. 1436-1439. (in Russian).

13. Rybachenko V.I., Red'ko A.N., Shreder G., Chotiy K.Yu. Inversionnyi mezhfaznyi kataliz. 1. Izucheniye kataliziruyemoy n-oksidami piridina reaktsii benzoilkhlorida i 4-nitrobenzoat iona v dvukhfaznoi srede voda-dikhlorometan [Vapor phase transfer catalysis. 1. Study on n-catalyzed reaction of benzoyl chloride with oxides of pyridine and 4-nitrobenzoate ion in a biphasic water-dichloromethane medium]. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu*, 2007, vol. 119, no. 9, pp. 72-78. (in Russian).

14. Iliescu S., Pascariu A., Plesu N., Popa A., Macarie L., Iliu G. Unconventional method used in synthesis of polyphosphoesters. *Polymer Bulletin*, 2009, vol. 63, no. 4, pp. 485-495.

УДК 621.357

Д.А. Шайдеров <sup>а</sup>, А.А. Кітик <sup>а</sup>, В.С. Проценко <sup>а</sup>, Ф.Й. Данилов <sup>а</sup>, У. Прамод Кумар <sup>б</sup>, К. Джозеф Кеннаді <sup>б</sup>

## ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ОСНОВІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕВТЕКТИЧНОЇ СУМІШІ ДЛЯ ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ ТВЕРДИХ НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

<sup>а</sup> ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

<sup>б</sup> Інститут технології та науки Карунья, м. Коїмбетор, Індія

У роботі досліджено вплив добавки води до електроліту нікелювання, що містить низькотемпературний евтектичний розчинник Ethaline (евтектичну суміш холіну хлориду і етиленгліколю) і нікель хлорид, на деякі фізико-хімічні властивості та на електроосадження нікелю з цієї системи. Показано, що введення додаткової води сприяє суттєвому підвищенню електропровідності, а також зниженню в'язкості, що наближаються до величин, притаманних для «звичайних» водних електролітів нікелювання. Встановлено, що з рідкої системи, що містить хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду (у молярному співвідношенні 1:2:1:х, відповідно, де х=6, 9, 12, 15 або 18), при катодних густинах струму до ~4 А/дм<sup>2</sup> та температурі 303 К можливе електроосадження рівномірних, добре зчеплених з підкладкою нікелевих покриттів з виходом за струмом від 90 до 100%. Нікелеві осаді, одержані з досліджених іонних рідин, мають нанокристалічну структуру з середнім розміром кристалітів від 5 до 7,5 нм. Показано, що мікротвердість одержаних нікелевих осадів зростає при підвищенні кількості води у системі і знаходиться в межах від 420 кг/мм<sup>2</sup> (при х=6) до 503 кг/мм<sup>2</sup> (при х=18).

**Ключові слова:** низькотемпературні евтектичні розчинники, електроосадження, нікель, нанокристалічні покриття, мікротвердість.

### Вступ

Електроосадження металів і сплавів із електролітів на основі низькотемпературних іонних рідин є одним з найактуальніших напрямів розвитку сучасної прикладної електрохімії та інже-

нерії поверхні [1–3]. До основних переваг іонних рідин слід віднести їх високу електрохімічну стійкість (широке «електрохімічне вікно»), відносно високу електропровідність (у порівнянні з органічними розчинниками) і прак-

тично нульовий тиск насиченої пари. Відзначається [3], що електрохімічні системи на основі іонних рідин беззастережно вписуються у сферу так званої «зеленої хімії».

Серед різноманітних металів, які можна одержувати з іонних рідин, нікель обіймає особливе місце завдяки низці його унікальних властивостей: висока мікротвердість, корозійна стійкість та зносостійкість, привабливий зовнішній вигляд, виражені каталітичні та електрокаталітичні властивості нікелевих осадів тощо. У літературі вже неодноразово описані процеси електроосадження нікелю з іонних рідин [4–8]. Так, наприклад, у роботі [8] були зіставлені закономірності осаження нікелю з «традиційного» сульфатно-хлоридного водного електроліту (електроліт Уоттса) та з електроліту на основі низькотемпературного евтектичного розчинника, що містить етиленгліколь та хлорид холіну (так званий «Еталайн» (Ethaline)). Показано, що покриття, отримані з цих двох типів електролітів нікелювання, суттєво відрізняються за морфологією поверхні. Крім того, нанокристалічні осадки, утворені з системи, яка містить Еталайн, відрізняються підвищеною твердістю у порівнянні з покриттями з водних електролітів.

Незважаючи на відзначені позитивні риси процесів нікелювання на основі іонних рідин, деякі їх експлуатаційні характеристики все ж залишаються незадовільними з огляду на потенційне практичне застосування. Так, слід відмітити невисоку електропровідність і значну в'язкість цих іонних рідин у порівнянні з широко використовуваними у промисловості водними розчинами.

Раніше нами встановлено [9], що введення добавки води до іонної рідини, яка містить хлорид холіну, етиленгліколь та гексагідрат хлориду нікелю, дозволяє підвищити питому електричну провідність і знизити в'язкість, густину й поверхневий натяг рідкої суміші. Вольтамперні вимірювання показали, що введення додаткової води має наслідком гальмування парціального електрохімічного процесу електроосадження нікелю.

У той же час, нез'ясованим залишається питання про вплив води на вихід за струмом реакції електроосадження нікелю, мікроструктуру одержуваних покриттів, їх фізико-хімічні та експлуатаційні властивості (наприклад, мікротвердість). Дана робота присвячена розгляду цих залежностей, які мають ключове значення у контексті прикладного застосування електролітів нікелювання на основі іонних рідин.

#### **Методика експерименту**

Для електроосадження нікелю використовували низькотемпературний евтектичний роз-

чинник Еталайн, отриманий шляхом змішування етиленгліколю й хлориду холіну (останній був перекристалізований із ізопропанолу) у молярному співвідношенні 2:1, відповідно [1]. Цю евтектичну суміш ретельно перемішували за допомогою мішалки при 70°C до утворення прозорої гомогенної рідини. Далі додавали необхідну кількість твердої солі  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  та додаткової води й перемішували суміш за зазначеної вище температури до формування гомогенної зеленої рідини, яка далі не твердіє за температур, близьких до кімнатної [1,10].

В'язкість іонних рідин вимірювали за допомогою капілярного віскозиметра ВПЖ-1 (діаметр капіляра 2,10 мм). Електропровідність визначали з використанням реохордного містка Кольрауша Р-38 при частоті змінного струму 510 Гц у скляній комірці з платиновими платинованими електродами (стала комірки дорівнювала  $42,86 \text{ м}^{-1}$ ).

Електроосадження нікелю виконували у скляній термостатованій комірці (303 К) на катоді з мідної фольги, що був розташований у пластиковій касеті. Перед електроосадженням поверхню катода обробляли суспензією віденського вапна, декапували у розчині хлороводневої кислоти й ретельно промивали дистильованою водою. Електроосадження здійснювали у гальваностатичному режимі з використанням стабілізованого джерела живлення «Electronics» без розділення електродних просторів із розчинними нікелевими анодами. Вихід за струмом нікелю обчислювали на підставі гравіметричних вимірювань шляхом зіставлення зростання маси катодів, розташованих у ванні нікелювання та у послідовно ввімкненому у електричний ланцюг мідному кулонометрі. Тривалість електролізу становила 20 хв.

Морфологію поверхні нікелевих осадів досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа JSM-360 (JEOL). Хімічний склад поверхні осаду визначали з використанням енерго-дисперсійного рентгенівського мікроаналізатора (EDX), вбудованого в електронний мікроскоп. Мікроструктуру покриття досліджували методом X-променевої дифракції з використанням XRD спектрометра Shimadzu XRD 6000 ( $\text{Cu-K}_\alpha$  випромінювання). Середній розмір кристалітів оцінювали за рівнянням Шеррера. Мікротвердість осадів визначали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 100 г і товщині осадів не менше 20 мкм.

#### **Результати та обговорення**

Як впливає з отриманих експериментальних даних (рис. 1), при підвищенні кількості доданої води спостерігається помітне зниження в'язкості та підвищення питомої електропровідності для рідкої системи, що містить хлорид

холіну (ChCl), етиленгліколь, хлорид нікелю та воду (у молярному співвідношенні 1:2:1:х, відповідно, де  $x=6, 9, 12, 15$  або  $18$ ). У роботі [9] було доведено, що ці ефекти знаходять задовільну інтерпретацію у рамках так званої діркової теорії (hole theory) перенесення мікрочастинок у іонних рідинах. Згідно з цими уявленнями у розплавлених іонних середовищах (у тому числі й у низькотемпературних іонних рідинах) існують вакансії (дірки), які утворюються за рахунок флуктуацій локальної густини. Ці дірки знаходяться у безперервному тепловому русі, їх середній розмір і концентрація мають статистичний розподіл. Іон (а, відповідно, і електричний заряд) може переміщатися лише у найближчу до нього дірку. Введення додаткової води приводить до зменшення середнього розміру вакансії, що суттєво полегшує іонний рух. При зростанні вмісту води знижується енергія активації в'язкої течії й електропровідності досліджуваної системи [9].

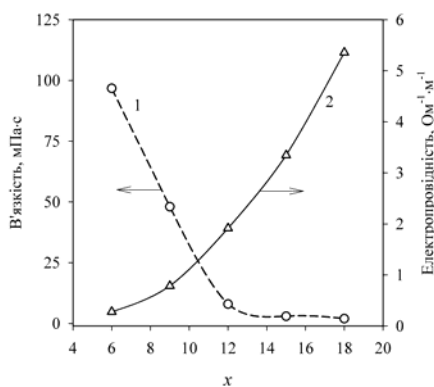


Рис. 1. Вплив кількості води (x) на динамічну в'язкість (1) та питому електропровідність (2) іонної рідини, що містить хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду при молярному співвідношенні 1:2:1:х, відповідно. Температура 303 К

Без додатково введеної води (при  $x=6$ ) в'язкість рідкої системи, що містить хлорид холіну, етиленгліколь і хлорид нікелю, практично на два порядки перевищує величини зазвичай притаманні водним системам (рис. 1). Очевидно, що це перешкоджатиме практичному впровадженню таких систем для використання при електроосадженні нікелевих гальванопокриттів. Але вже при вмісті води, що відповідає  $x=12$ , в'язкість сягає значень, близьких до водних електролітів. При цьому відповідним чином збільшується питома електропровідність іонної рідини.

В інтервалі густин струму до  $4 \text{ А/дм}^2$  вихід за струмом реакції електроосадження нікелю знаходиться у межах від 90% до 100%, дещо знижуючись при зростанні катодної густини стру-

му (табл. 1). Очевидно, що отримані значення близькі за порядком до величин, які спостерігаються у «звичайних» водних електролітах нікелювання. Слід зазначити, що при катодній густині струму до  $4 \text{ А/дм}^2$  осаджуються рівномірні світло-сірі осади з добрим зчепленням до підкладки. При перевищенні вказаної величини спостерігається різке зниження виходу за струмом, а покриття стають темними й шорсткими, що, очевидно, пов'язано із досягненням граничної густини струму осадження металу.

Таблиця 1  
Вплив густини струму на вихід за струмом реакції електроосадження нікелю при різному вмісті води у системі. Температура 303 К

Густина струму, А/дм <sup>2</sup>	Вихід за струмом, %		
	x=6	x=12	x=18
0,1	100	100	100
0,5	98,1	97,4	96,4
1,0	97,3	96,6	95,7
2,0	94,7	94,7	94,2
3,0	92,8	94,9	93,8
4,0	90,0	94,4	93,7

Поверхня нікелевих осадів, одержаних з досліджуваних іонних рідин, за даними сканувальної електронної мікроскопії (рис. 2) не містить тріщин і включає окремі сферіди, середній діаметр яких коливається у межах від 0,1 до 1 мкм. Введення додаткової води не приводить до принципової зміни характеру морфології поверхні. При будь-якому значенні x за даними рентгеноспектрального електронно-зондового мікроаналізу (рис. 3) поверхня покриття являє собою нікель (не менше 96 мас.%) з невеликою кількістю домішок інших елементів (переважно – оксиген, що з'являється, напевно, за рахунок часткового окиснення поверхні атмосферним киснем). Хімічний аналіз покриття після його повного розчинення з підкладки показує, що покриття не менше, ніж на 99%, складається з нікелю (за будь-якого вмісту доданої до електроліту нікелювання води).

На дифрактограмах нікелевих покриттів, одержаних з електролітів з різним вмістом води, (рис. 4) фіксуються дифракційні максимуми від ґраток ГЦК нікелю (111), (200) та (220) при значеннях кута розсіяння  $2\theta=44,6^\circ, 51,9^\circ$  та  $76,5^\circ$ , відповідно. Розмитий (дифузний) характер максимумів свідчить про нанокристалічність (рентгеноаморфність) мікроструктури. Середній розмір кристалітів був розрахований за допомогою класичного рівняння Шеррера для найбільш інтенсивного дифракційного максимуму (111). Отримані результати (табл. 2) показують, що середній розмір кристалітів знаходиться в межах від 5 до 7,5 нм. Ці величини близькі до зна-

чень, які отримали автори роботи [5] для нікелевих покриттів, осаджених з електроліту на основі Еталайн при схожих умовах електрохімічного синтезу. Хоч чіткої й однозначної залежності середнього розміру кристалітів від кількості доданої води не встановлено, все ж можна відзначити тенденцію до деякого зростання розміру нанокристалітів при підвищенні значення  $x$ .

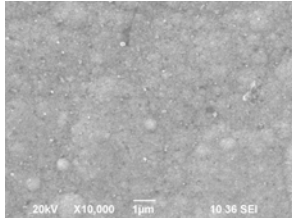


Рис. 2. Типова мікрофотографія сканувальної електронної мікроскопії поверхні покриття, одержаного з електроліту, що містить хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду при молярному співвідношенні 1:2:1:9, відповідно.

Катодна густина струму 0,5 А/дм<sup>2</sup>, температура 303 К

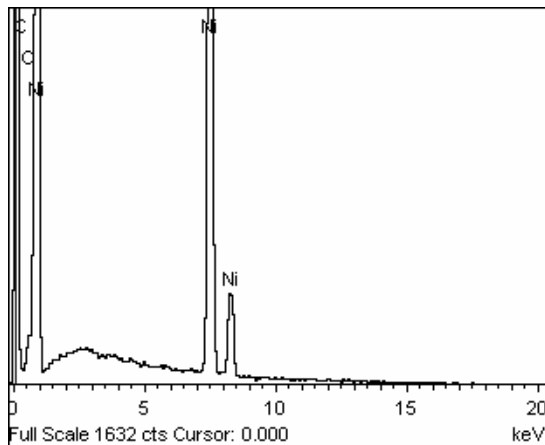


Рис. 3. Типовий рентгенівський енерго-дисперсійний спектр поверхні покриття, одержаного з електроліту, що містить хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду при молярному співвідношенні 1:2:1:9, відповідно.

Катодна густина струму 0,5 А/дм<sup>2</sup>, температура 303 К

Зростання вмісту води у електроліті нікелювання приводить до збільшення мікротвердості осадів (табл. 3). Порівняння отриманих величин з наведеними раніше у літературі показує, що мікротвердості, визначені у нашій роботі, суттєво менші, ніж наведені у роботі [5], але практично співпадають зі значеннями, які одержали Еббот зі співавторами [8]. В цілому мікротвердість нікелевих покриттів, електроосаджених із досліджених іонних рідин, що містять хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду, не поступається величинам, притаманним «твердим» нікелевим осадам, що одержують із традиційних водних електролітів нікелювання.

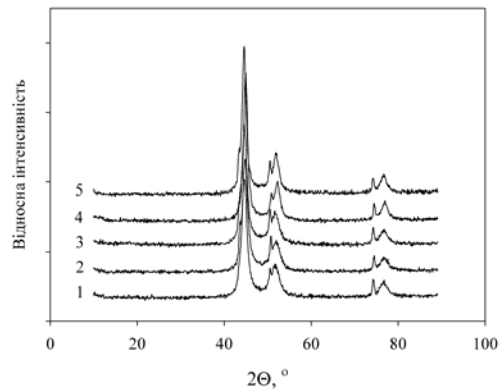


Рис. 4. Рентгенівські дифрактограми нікелевих покриттів, одержаних з електролітів, що містять хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду при молярному співвідношенні 1:2:1: $x$ , відповідно. Катодна густина струму 0,5 А/дм<sup>2</sup>, температура 303 К, Cu-K<sub>α</sub> випромінювання.

(1)  $x=6$ , (2)  $x=9$ , (3)  $x=12$ , (4)  $x=15$ , (5)  $x=18$

Таблиця 2

Вплив вмісту води на середній розмір нанокристалітів нікелю. Катодна густина струму 0,5 А/дм<sup>2</sup>, температура 303 К

$x$	Середній розмір кристалітів, нм
6	5,5
9	5,1
12	5,7
15	7,5
18	7,2

Таблиця 3

Вплив вмісту води на мікротвердість нікелевих покриттів, осаджених з електроліту, який містить різну кількість води, при катодній густині струму 0,5 А/дм<sup>2</sup> і температурі 303 К

$x$	Мікротвердість, кг/мм <sup>2</sup>
6	420
9	433
12	446
15	473
18	503

### Висновки

1. Введення додаткової води до іонних рідин, що містять хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю (тобто, Еталайн+NiCl<sub>2</sub>· $x$ H<sub>2</sub>O) дозволяє суттєво підвищити питому електричну провідність та знизити в'язкість. Вже при  $x=12$  вказані фізико-хімічні характеристики наближаються до значень, притаманних для водних електролітів, що відкриває перспективи для їх практичного використання при електроосадженні нікелевих покриттів.

2. В інтервалі густини струму до ~4 А/дм<sup>2</sup> (при 303 К) із досліджуваних електролітів мож-

ливе отримання рівномірних, компактних, добре зчеплених з мідною підкладкою осадів з виходом за струмом в інтервалі від 90 до 100%.

3. З іонних рідин, що містять хлорид холіну, етиленгліколь, хлорид нікелю та воду, осаджуються нанокристалічні покриття з середнім розміром кристалітів 5–7,5 нм.

4. Мікротвердість нікелевих осадів, одержаних із досліджених іонних рідин, зростає при підвищенні кількості доданої води і не поступається за абсолютною величиною значенням, характерним для «звичайних» осадів Ni, які одержують з широко розповсюджених водних електролітів нікелювання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications // Chem. Rev. – 2014. – Vol.114. – P.11060-11082.
2. Abbott A.P., Ryder K.S., Konig U. Electrofinishing of metals using eutectic based ionic liquids // Trans. Inst. Met. Finish. – 2008. – Vol.86. – P.196-204.
3. Ионные жидкости в электрохимических процессах / О.К. Лебедева, Д.Ю. Кульгин, Л.М. Кустов, С.Ф. Дунаев // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2004. – Т.48. – № 6. – С.59-73.
4. Electrodeposition of nickel using eutectic based ionic liquids / A.P. Abbott, K. El Ttaib, K.S. Ryder, E.L. Smith // Trans. Inst. Met. Finish. – 2008. – Vol.86. – P.234-240.
5. Microstructure, nanoindentation, and electrochemical properties of the nanocrystalline nickel film electrodeposited from choline chloride-ethylene glycol / C.D. Gu, Y.H. You, Y.L. Yu, S.X. Qu, J.P. Tu // Surf. Coat. Technol. – 2011. – Vol.205. – P.4928-4933.
6. Gu C., Tu J. One-step fabrication of nanostructured Ni film with Lotus effect from deep eutectic solvent // Langmuir. – 2011. – Vol.27. – P.10132-10140.
7. Srivastava M., Yoganandan G., William Grips V.K. Electrodeposition of Ni and Co coatings from ionic liquid // Surf. Eng. – 2012. – Vol.28. – P.424-429.
8. A comparative study of nickel electrodeposition using deep eutectic solvents and aqueous solutions / A.P. Abbott, A. Ballantyne, R.C. Harris, J.A. Juma, K.S. Ryder, G. Forrest // Electrochim. Acta. – 2015. – Vol.176. – P.718-726.
9. Effect of water content on physicochemical properties and electrochemical behavior of ionic liquids containing choline chloride, ethylene glycol and hydrated nickel chloride / V.S. Protsenko, A.A. Kityk, D.A. Shaiderov, F.I. Danilov // J. Mol. Liq. – 2015. – Vol.212. – P.716-722.
10. Властивості суміші низькотемпературної евтектики на основі холіну хлориду і етиленгліколю з нікелем(II) хлоридом / А.А. Кітик, Д.А. Шайдеров, В.С. Проценко, Ф.І. Данилов // Вопр. химии и хим. технологии. – 2015. – Т.5. – С.24-28.

Надійшла до редакції 10.06.2016

## THE APPLICATION OF ELECTROLYTE BASED ON A DEEP EUTECTIC MIXTURE FOR THE ELECTRODEPOSITION OF HARD NICKEL COATINGS

D.A. Shaiderov <sup>a</sup>, A.A. Kityk <sup>a</sup>, V.S. Protsenko <sup>a</sup>, F.I. Danilov <sup>a</sup>, U. Pramod Kumar <sup>b</sup>, C. Joseph Kennady <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>b</sup> Karunya Institute of Technology and Sciences, Coimbatore, India

The paper reports the results of our experimental study on the effect of water addition to a nickel plating bath containing deep eutectic solvent Ethaline (i.e. eutectic mixture of choline chloride and ethylene glycol) and nickel chloride upon some physicochemical properties of liquid mixtures and nickel electrodeposition process in these systems. The introduction of extra water is shown to promote a substantial increase in conductivity and a decrease in viscosity which reach the values typical of «common» aqueous nickel baths. The liquid mixtures containing choline chloride, ethylene glycol, nickel chloride and water (in the molar ratio of 1:2:1:x, respectively, where x=6, 9, 12, 15 or 18) allow electrodepositing uniform and well adherent nickel coatings with the current efficiency of 90 to 100% at current density of ~4 A/dm<sup>2</sup> and temperature of 303 K. Nickel coatings obtained from the investigated ionic liquids have a nanocrystalline structure with an average crystallite size of 5 to 7.5 nm. The microhardness of the nickel electrodeposits increases when increasing the water content in the system and is in the range from 420 kg/mm<sup>2</sup> (at x=6) to 503 kg/mm<sup>2</sup> (at x=18).

**Keywords:** deep eutectic solvents; electrodeposition; nickel; nanocrystalline coatings; microhardness.

## REFERENCES

1. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical Reviews*, 2014, vol. 114, pp. 11060-11082.
2. Abbott A.P., Ryder K.S., Konig U. Electrofinishing of metals using eutectic based ionic liquids. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2008, vol. 86, pp. 196-204.
3. Lebedeva O.K., Kul'tin D.Yu., Kustov L.M., Dunayev S.F. Ionnye zhidkosti v elektrokhimicheskikh protsessakh [Ionic liquids in electrochemical processes]. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal*, 2004, vol. 48, pp. 59-73. (in Russian).
4. Abbott A.P., El Ttaib K., Ryder K.S., Smith E.L. Electrodeposition of nickel using eutectic based ionic liquids. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2008, vol. 86, pp. 234-240.
5. 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. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 4928-4933.
6. Gu C., Tu J. One-step fabrication of nanostructured Ni film with Lotus effect from deep eutectic solvent. *Langmuir*, 2011, vol. 27, pp. 10132-10140.
7. Srivastava M., Yoganandan G., William Grips V.K. Electrodeposition of Ni and Co coatings from ionic liquid. *Surface Engineering*, 2012, vol. 28, pp. 424-429.
8. 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. *Electrochimica Acta*, 2015, vol. 176, pp. 718-726.
9. 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. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, vol. 212, pp. 716-722.
10. Kityk A.A., Shaiderov D.A., Protsenko V.S., Danilov F.I. Vlastyosti sumishi nyz'kotemperaturnoyi evtektiki na osnovi kholinu khlorydu i etylenglikolyu z nikellem(II) khlorydom [Properties of the mixture of deep eutectic solvent on the basis of choline chloride and ethylene glycol with nickel(II) chloride]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2015, vol. 5, pp. 24-28. (in Ukrainian).