

УДК 621.357

doi: 10.20998/2413-4295.2024.04.07

**СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОТРІЙНИХ СПЛАВІВ
З ВИСОКОЮ МІКРОТВЕРДІСТЮ****Т. О. НЕНАСТІНА^{1*}, М. Д. САХНЕНКО², В. О. ПРОСКУРИНА³, Л. В. ГАПОНОВА⁴**¹ кафедра хімії та хімічної технології, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА² кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА³ кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА⁴ кафедра комп'ютерної графіки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА

* e-mail: nenastina@ukr.net

АНОТАЦІЯ Електроосадження електролітичних сплавів, що складаються з металів підгрупи заліза і цирконію, дозволяє отримувати покриття з унікальним поєднанням фізико-хімічних властивостей, які не можуть бути досягнуті іншими методами нанесення покриттів. Однією з причин, що обмежують використання електролітичних покриттів на основі таких сплавів, є складність керування процесом та прогнозування складу. Властивості сплавів підгрупи заліза, що містять тугоплавкі метали, та їх композитів залежать не тільки від хімічного складу, тобто вмісту тугоплавкого компонента, але й від умов осадження. Варіювання густини струму поляризації дозволяє осаджувати покриття різного складу, а відповідно, і різних функціональних властивостей. Метою роботи було вивчення впливу параметрів електролізу на хімічний склад, структуру, морфологію поверхні та фізико-механічні властивості покриттів потрійними сплавами CoNiZr. Досліджено формування потрійних сплавів CoNiZr з цитратного електроліту на поверхні міді в імпульсному режимі. Встановлено вплив рН електроліту, перемішування та густини струму на склад, морфологію поверхні та вихід за струмом і мікротвердість потрійних електролітичних сплавів. Отримані покриття характеризуються рівномірно розвиненою поверхнею без тріщин і достатньо високою та відтворюваною мікротвердістю. За результатами проведених експериментів встановлено, що мікротвердість покриття CoNiZr залежить від умов електролізу та властивостей електроліту, а вміст цирконію суттєво не впливає. На підставі проведених досліджень щодо визначення впливу параметрів електролізу на мікротвердість гальванічних покриттів виявлено, що властивості тернарних CoNiZr покриттів залежать від рН електроліту, температури та густини імпульсного струму. Проведені дослідження дозволяють визначити умови отримання якісних покриттів із заданими функціональними властивостями.

Ключові слова підгрупа заліза; електроосадження; тугоплавкі метали; електролітичні покриття; мікротвердість; густина струму.

SYNTHESIS OF ELECTROLYTIC TERNARY ALLOYS WITH HIGH MICROHARDNESS**T. NENASTINA¹, M. SAKHNENKO², V. PROSKURINA³, L. HAPONOVA⁴**¹ Department of Chemistry and Chemical Technology, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE² Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE³ Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE⁴ Department of Computer Graphics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Electrodeposition of electrolytic alloys consisting of metals of the iron subgroup and zirconium allows obtaining a coating with a unique combination of physical and chemical properties that cannot be achieved by other coating methods. One of the reasons limiting the use of electrolytic coatings based on such alloys is the complexity of process control process and composition forecasting. The properties of alloys of the iron subgroup containing refractory metals and their composites depend not only on the chemical composition, that is, the content of the refractory component, but also on the deposition conditions. Varying the polarization current density allows the deposition of coatings of different composition and, accordingly, different functional properties. The aim of the work was to study the influence of electrolysis parameters on the chemical composition, structure, surface morphology and physical and mechanical properties of CoNiZr ternary alloy coatings. The formation of CoNiZr ternary alloys from citrate electrolyte on the copper surface in pulse mode was studied. The influence of electrolyte pH, mixing and current density on the composition, surface morphology and current yield and microhardness of ternary electrolytic alloys of the iron and zirconium subgroup was determined. The resulting coatings are characterized by a uniformly developed surface without cracks and sufficiently high and reproducible microhardness. Based on the results of the experiments, it can be concluded that the zirconium content does not affect the microhardness of the CoNiZr coating, but depends on the conditions of electrolysis and the properties of the electrolyte. Based on the conducted studies to determine the influence of electrolysis parameters on the microhardness of electroplated coatings, it was found that the properties of ternary CoNiZr coatings depend on the pH of the electrolyte, temperature and pulse current density. The conducted studies allow us to determine the conditions for obtaining high-quality coatings with specified functional properties.

Keywords: subgroup of iron; electrodeposition; refractory metals; electrolytic coatings; microhardness; current density.

Вступ

Енергетична безпека будь-якої країни базується на декількох факторах, серед яких мережа

національних енергогенеруючих підприємств та розвинене виробництво зовнішніх джерел струму (батареєнок, акумуляторів та паливних елементів).

Екологічно чисті паливні елементи (ПЕ) відносяться до перспективних джерел енергії, однак дорожнеча благородних металів, з яких виготовляються електроди, обмежує їх поширення і подальше використання [1]. При розробці протічних редокс акумуляторів (ПРА) також необхідно використовувати ефективні каталітично активні електроди на основі перехідних металів [2]. Серед найважливіших вимог до електродних матеріалів ПЕ і ПРА є хімічна стійкість поверхні та неактивність до компонентів технологічного середовища; широке вікно поляризаційних потенціалів, в якому електроди залишаються неактивними; висока селективність і каталітична активність в цільових електродних реакціях; значна питома площа поверхні. Навіть короткий огляд ПРА та ПЕ створює враження, що електродні матеріали, які використовуються в них, не оптимізовані [3]. Зокрема, одним з найпоширеніших електродних матеріалів є ряд модифікацій вуглецю: графіт, вуглецеві волокна, поруватий і пресований вуглець, вуглецеві тканини, а також спінений нікель, платина або платиніди, оксиди титану тощо [4]. Але варто зазначити, що в науковій літературі останніх років відсутні публікації стосовно високотехнологічних електродних матеріалів, таких як наноструктуровані та нанокристалічні матеріали на основі корозійностійких аморфних металевих сплавів (металеве скло), або наноструктуровані осади синергетичними сплавами [5]. Найбільш ефективним напрямком розробки каталітичних матеріалів вбачаються електрохімічні технології, які забезпечують можливість гнучкого керування вмістом компонентів, швидкістю осадження, станом поверхні за рахунок варіювання складу електроліту і режимів поляризації (стаціонарний або імпульсний, зворотний струм або зниження потенціалу) [6]. Використання електрохімічних методів сприяють утворенню ланцюга: параметри процесу → склад і структура матеріалу → властивості → галузі застосування. Завдяки цьому можливе виготовлення електродних матеріалів відмінних за якістю, складом та з бажаними функціональними властивостями (синергетичні або адитивні), такими як мікротвердість, зносостійкість, термо-, хімічна та корозійна стійкість, каталітична активність тощо [7]. При синтезі нових і удосконаленні існуючих каталізаторів необхідно визначити фактори, що впливають на каталітичну активність і особливо природа каталізатора, оскільки електрокаталітична активність залежить від хімічного складу і стану поверхні (аморфна, кристалічна, розмір зерен тощо). Раніше було показано перспективи застосування електролітичних сплави кобальту з молібденом або вольфрамом для отримання водню лужним електролізом [8,9], а також окиснення вуглеводнів [10]. З огляду на такий стан проблеми вельми актуальним вбачається створення каталітичних матеріалів на основі потрібних синергетичних сплавів кобальту з цирконієм.

Мета роботи

Мета роботи полягає у вивченні впливу параметрів електролізу на хімічний склад, структуру, морфологію поверхні та фізико-механічні властивості покриттів потрійними сплавами CoNiZr.

Методика виконання експерименту

Електрохімічне осадження композиційних покриттів CoNiZr проводили з цитратного електроліту наступного складу, моль/дм³: кобальту (II) сульфат 0,1 – 0,3; цирконію (IV) сульфат 0,01 – 0,05; цитрат натрію 0,1 – 0,5. Для підвищення електропровідності до електроліту додавали натрій сульфат в кількості 0,5 моль/дм³. Підкладку з міді попередньо обробляли за методикою, описаною в роботі [8]. Електроосадження проводили імпульсним струмом при варіюванні рН, густини струму $i = 1-12$ А/дм², частоти та шпаруватості імпульсів [11]. Об'єм електроліту та співвідношення площ катода та анода (1:10) вибирали таким чином, щоб об'ємна густина струму для осадження сплавів не перевищувала 2 А/дм³. Імпульсні режими електроосадження задавали за допомогою потенціостату ПІ-50-1.1 та програматора ПР-8. Як анодний матеріал при електроосадженні сплавів Co-Ni-Zr використовували пластини з нержавіючої сталі розміром 4x5 см, розташовані копланарно і з'єднані між собою для забезпечення жорсткої фіксації. Електроліт для осадження сплаву Co-Ni-Zr готували з аналітично чистих реактивів, які розчиняли в невеликій кількості дистильованої води, після чого розчин змішували у певній послідовності, ґрунтуючись на результатах дослідження іонних рівноваг [12,13].

Хімічний склад покриттів визначали рентгенофлуоресцентним методом з використанням портативного спектрометра «СПРУТ» [6].

Кислотність розчинів змінювали в межах від 5 до 11, причому нижнє значення рН розчину обмежено гідролізом солей, що входять до складу електролітів. Зміну рН електроліту проводили шляхом додавання розчину NaOH. Величину рН електролітів контролювали приладом рН-150М з використанням скляного електрода ЕСЛ-6307. Для рівномірного перемішування розчинів використовували магнітну мішалку марки ММ-5

Мікротвердість покриттів сплавами кобальт-нікель-цирконій, а також матеріалу підкладки (мідь) визначали методом вдавлення 136-градусної алмазної піраміди з квадратною основою на твердомірі ПМТ-3 при навантаженні $P = 0,1$ кг і часу витримки 10 с. Великою перевагою приладу є пряме навантаження індентора наважками, що забезпечує високу точність і стабільність величин прикладеного навантаження. Експеримент проводили після 24 годин старіння покриттів при кімнатній температурі. З метою усунення впливу підкладки на результат

вимірювання мікротвердість вимірювали на покриттях товщиною не менше 20 мкм.

Обговорення результатів

Відомо, що механічні властивості тонкоплівкових систем і внутрішні напруження покриттів визначаються макроструктурою [14,15]. Варіюванням умов електролізу можна формувати покриття з різним ступенем дисперсності структури і, відповідно, різними властивостями [16,17]. Кристалічна структура осаджених сплавів залежить від двох процесів: утворення центру кристалізації на катоді і подальшого росту кристалів з центру кристалізації. Властивості формування структури покриття безпосередньо впливають на морфологію поверхні, що утворюється під час осадження, причому найсуттєвіший вплив має катодна густина струму. Експериментально встановлено, що в гальваностатичному режимі при кімнатній температурі цирконій не осаджується разом з кобальтом і нікелем. Однак в імпульсному режимі з комплексного цитратного електроліту в інтервалі густини струму $i = 2-10 \text{ A/дм}^2$ формуються рівномірні дрібнокристалічні покриття сплавами CoNiZr.

В інтервалі амплітуди імпульсного струму 2 – 10 A/дм^2 та постійним співвідношенням тривалості імпульс/пауза $t_i/t_n = 2 \text{ мс}/2 \text{ мс}$ вміст цирконію у сплаві CoNiZr лінійно зростає (рис. 1) і досягає максимуму 2,0% мас., а подальше підвищення густини струму призводить до зменшення вмісту перехідного металу в сплаві.

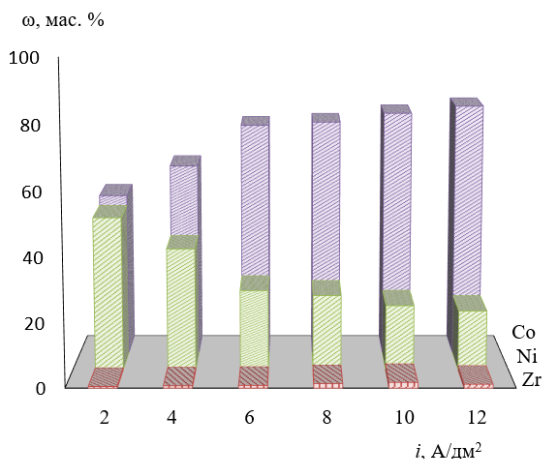


Рис. 1 – Вплив густини струму на вміст цирконію в електролітичному покритті CoNiZr при імпульсному режимі електролізу: $i = 10 \text{ A/дм}^2$, $t_i = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, $t_n = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Температура $T = 25^\circ\text{C}$.

Залежність мікротвердості H_v електролітичного сплаву CoNiZr від катодної густини струму (рис. 2) лінійно зростає і сягає максимуму 315 кг/м^2 . Залежність виходу за струмом від катодної густини

струму має екстремальний характер, в діапазоні 2-6 A/дм^2 H_v зростає і досягає максимального значення 62%. Це пов'язано зі зменшенням розміру зерен і агломератів на поверхні покриття. Також при менших густинах струму покриття більш рівномірно розподіляється на поверхні підкладки через меншу швидкість кристалізації.

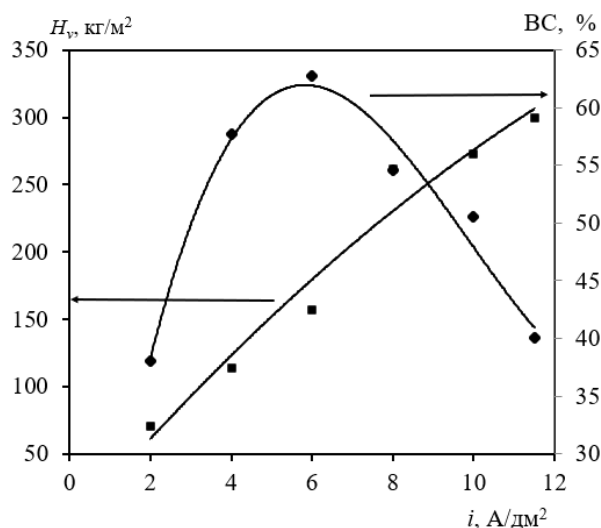


Рис. 2 – Вплив густини струму на вихід за струмом та мікротвердість покриття CoNiZr. Імпульсний режим електролізу: $i = 10 \text{ A/дм}^2$, $t_s = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, $t_n = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Температура $T = 25^\circ\text{C}$.

Встановлено, що перемішування електроліту істотно впливає на морфологію поверхні, а також на хімічний склад сплавів. Так, при кімнатній температурі без перемішування формуються покриття з невеликими мікротріщинами (рис. 3).

Для електролітичного сплаву CoNiZr при перемішуванні масова частка цирконію становить не більше 0,4 мас.% при 200 об/хв і зменшується з підвищенням кількості обертів (рис. 4). З іншого боку перемішування позитивно впливає на мікротвердість покриттів, що пов'язано зі зростанням швидкості транспортування електродноактивних частинок, яке дозволяє збільшити густину струму без утворення дендритів і губчастих осадів, а відтак, напружених покриттів.

З практики відомо, що кислотність електроліту істотно впливає на продуктивність процесу електроосадження – вихід за струмом (BC), якість і склад (рис. 5) покриттів, а, отже, їхні фізико-механічні властивості. Навіть незначна зміна pH електроліту може призвести до порушення процесу електролізу та осадження неякісних покриттів.

Однією з основних причин зниження стабільності цитратного електроліту є залуження приелектродного шару в результаті суміщеної побічної реакції виділення водню ($2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2$). На основі досліджень встановлено, що оптимальний діапазон pH для формування покриттів сплаву CoNiZr становить 7,5-8,5.

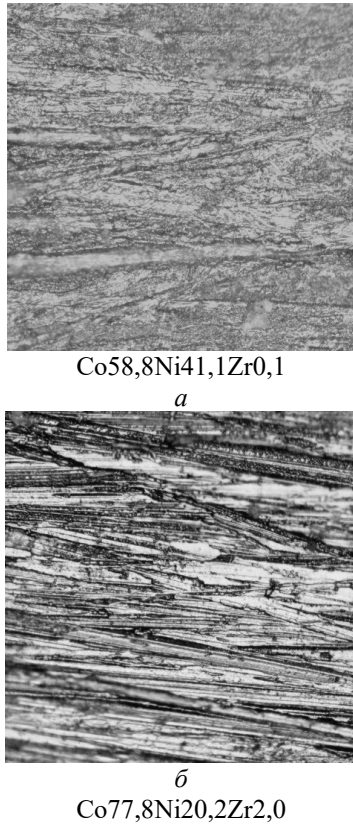


Рис. 3 – Морфологія (x200) і склад ω (мас. %) покриттів Co-Ni-Zr, осаджених уніполярним імпульсним струмом з перемішуванням 500 об/хв (а) та без перемішування (б)

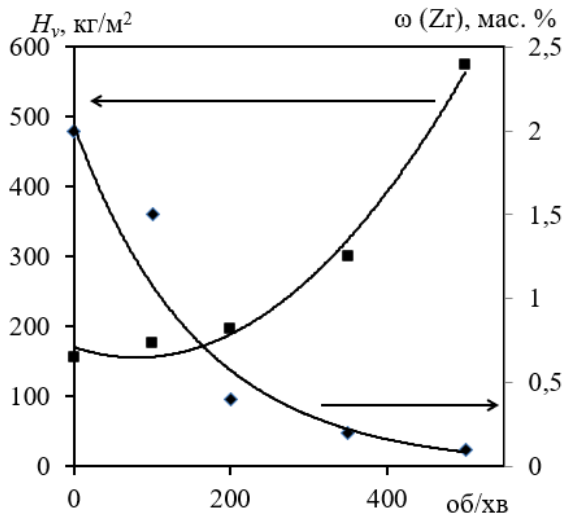


Рис. 4 – Вплив перемішування на склад та мікротвердість електролітичного покриття CoNiZr

При збільшенні рН електроліту вихід за струмом сплавів CoNiZr суттєво зменшується, а при досягненні рН 10 в електроліті та приелектродному шарі утворюються нерозчинні осадки. Це є результатом утворення гідроксидів кобальту і нікелю, які знижують якість покриття і, таким чином, мікротвердість.

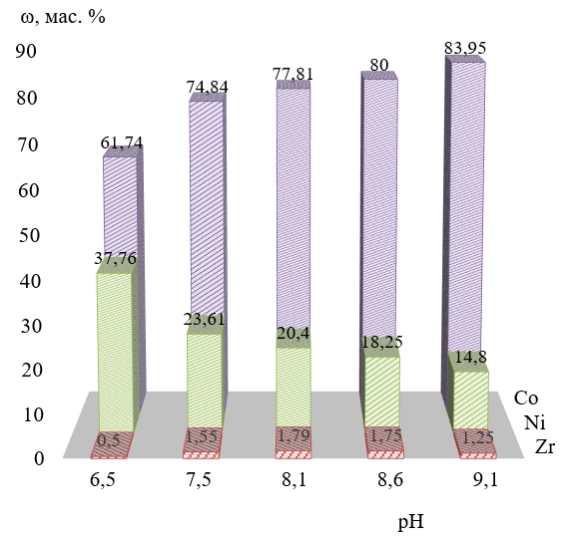


Рис. 5 – Вплив кислотності електроліту на склад покриття сплавом CoNiZr. Імпульсний режим електролізу: $i=10$ А/дм², $t_i=2 \cdot 10^{-3}$ с, $t_n=2 \cdot 10^{-3}$ с. Температура $T=25^\circ\text{C}$.

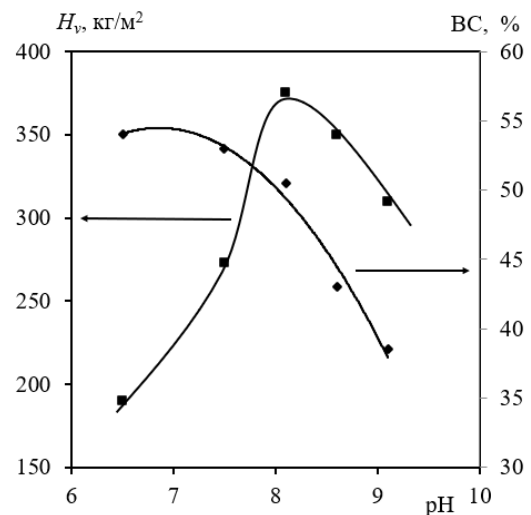


Рис. 6 – Вплив кислотності електроліту на вихід за струмом та склад покриття сплавом CoNiZr. Імпульсний режим електролізу: $i=10$ А/дм², $t_i=2 \cdot 10^{-3}$ с, $t_n=2 \cdot 10^{-3}$ с. Температура $T=25^\circ\text{C}$.

При аналізі отриманих результатів слід враховувати той факт, що вихід за струмом визначається за збільшенням маси сплаву, а також те, що покриття містить вуглець і кисень, вміст яких змінюється залежно від умов електролізу.

Висновки

Тернарні сплави CoNiZr, осаджені в імпульсному режимі з цитратного електроліту, відрізняються рівномірно розвинутою поверхнею і відсутністю на поверхні сітки тріщин, що забезпечує досить високу мікротвердість покриттів.

На підставі проведених досліджень щодо визначення впливу параметрів електролізу на мікротвердість гальванічних покриттів виявлено, що властивості тернарних CoNiZr покриттів залежать від рН електроліту, температури та густини імпульсного струму. Проведені дослідження дозволяють визначити умови отримання якісних покриттів з заданими функціональними властивостями.

Список літератури

1. Skyllas-Kazakos M., Chakrabarti M. H., Hajimolana S. Progress in flow battery research and development. *J. Electrochem. Soc.* 2011. Vol.158. R55–R79.
2. Ponce de Leon C., Frias-Ferrer A., Gonsales-Garcia A. Redox flow cells for energy conversion. Review. *J. Power Sources*. 2006. Vol. 160. P. 716–732.
3. Weber A. Z., Mench M. M., Mejers J. P. et al. Redox flow batteries: a review. *J. Appl. Electrochem.* 2011. Vol. 41. P. 1137–1164.
4. Tsai H. M., Yang S. Y., Ma C. M., Xie X. Preparation and electrochemical properties of graphene-modified electrodes for all-vanadium redox flow batteries. *Electrocatalysis*. 2011. Vol. 23. P. 2139–2143.
5. 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. doi: 10.1016/j.electacta.2021.138588
6. Nenastina T. A., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Proskurina V. O. Effect of Electrolysis Conditions on the Composition and Microhardness of Ternary Cobalt Alloy Coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. Vol. 57. P. 59–66. doi.org/10.3103/S1068375521010099
7. Danilov F. I., Sknar I. V., Sknar Yu. E., Pavlenko L. M. Electrodeposition of Ni–Fe alloy from solutions based on deep eutectic solvent ethaline. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. № 6. P. 11–16. doi: 10.32434/0321-4095-2021-139-6-11-16
8. Ved M., Sakhnenko M., Nenastina T. Corrosion and catalytic properties of galvanic binary d6–8 metal alloys. *Phys. Chem. Mech. Mater.* 2008. P 346-353.
9. Bersirova O., Kublanovsky V. Nickel–rhenium electrolytic alloys: synthesis, structure, and corrosion properties. *Materials Science*. 2019. Vol. 54, № 4. P. 506–511. doi: 10.1007/s11003-019-00211-4
10. Nenastina T. A., Ved M. V., Proskurina V. O., Zyubanova S. I. Electrochemical deposition of Co-Mo-W and Co-Mo-Zr coatings from complex electrolytes. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry*. 2019. P. 60–66.
11. Yar-Mukhamedova G., Sakhnenko N., Nenastina T. Electrodeposition and properties of binary and ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten. *Applied Surface Science*. 2018. № 445 P. 298–307. doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.171.
12. Jiang L., Lu J., Pan S. and other. Effect of rare earth salt and perpendicular magnetic field on corrosion resistance and microstructure of CoMoP film in chloride solution. *International Journal of Electrochemical Science*. 2012. № 7. P. 2188–2200.
13. Esther P., Kennady J., Saravanan P., Venkatachalam T. Structural and Magnetic Properties of Electrodeposited Ni-Fe-W Thin Films. *Journal of Non-Oxide Glasses*. 2009. № 3. P. 301–309.

14. Ozdemir H. C., Nazarahari A., Yilmaz B., Canadinc D., Bedir E., Yilmaz R., Unal U., Maier H. J. Machine learning –informed development of high entropy alloys with enhanced corrosion resistance. *Electrochimica Acta*. 2024. Vol. 476. 143722. doi: 10.1016/j.electacta.2023.143722.
15. Kushnerov O. I., Ryabtsev S. I., Bashev V. F. Metastable states and physical properties of Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy thin films. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2023. Vol. 750 (1). P. 135. doi: 10.1080/15421406.2022.2073043.
16. Nenastina T. O., Ved M. V., Sakhnenko M. D., Proskurina V. O., Zyubanova S. I. Corrosion Resistance of Composite Coatings Based on the alloys of cobalt with refractory metals. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. № 1. P. 634–641. doi: 10.1007/s11003-021-00475-9
17. Yapontseva Y. S., Dikumar A. I., Kyblanovskii V. S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 50. P. 330–337. doi: 10.3103/S1068375514040139
18. Wang R., Lu Ya., Ma Ye., Sun Z., Gopalan S. Experimental validation of solid oxide fuel cell polarization modeling: An LSM-YSZ/YSZ/Ni-YSZ case study. *Electrochimica Acta*. Vol. 361. P. 137052. doi: 10.1016/j.electacta.2020.137052
19. Nenastina T. O., Berezhna K. B., Sakhnenko M. D., Buhaievskiy S. O. Degradation of reinforced concrete construction of bridge structures: corrosion aspect. *Materials Science*. 2024. Vol. 59. № 5. P. 538–545. doi 10.1007/s11003-024-00809-3

References (transliterated)

1. Skyllas-Kazakos M., Chakrabarti M. H., Hajimolana S. Progress in flow battery research and development. *J. Electrochem. Soc.*, 2011, Vol. 158, R55-R79.
2. Ponce de Leon C., Frias-Ferrer A., Gonsales-Garcia A. Redox flow cells for energy conversion. Review. *J. Power Sources*, 2006, Vol. 160, pp.716–732.
3. Weber A. Z., Mench M. M., Mejers J. P. et al. Redox flow batteries: a review. *J. Appl. Electrochem.*, 2011, Vol. 41, pp. 1137–1164.
4. Tsai H. M., Yang S. Y., Ma C. M., Xie X. Preparation and electrochemical properties of graphene-modified electrodes for all-vanadium redox flow batteries. *Electrocatalysis*, 2011, Vol. 23, pp. 2139–2143.
5. 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, No. 138588, doi:10.1016/j.electacta.2021.138588
6. Nenastina T. A., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Proskurina V. O. Effect of Electrolysis Conditions on the Composition and Microhardness of Ternary Cobalt Alloy Coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2021, Vol. 57, pp. 59–66, doi: 10.3103/S1068375521010099
7. Danilov F. I., Sknar I. V., Sknar Yu. E., Pavlenko L. M. Electrodeposition of Ni–Fe alloy from solutions based on deep eutectic solvent ethaline. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2021, no. 6, pp. 11–16, doi:10.32434/0321-4095-2021-139-6-11-16
8. Ved M., Sakhnenko M., Nenastina T. Corrosion and catalytic properties of galvanic binary d6–8 metal alloys. *Phys. Chem. Mech. Mater.*, 2008, pp. 346–353.
9. Bersirova O., Kublanovsky V., Nickel–rhenium electrolytic alloys: synthesis, structure, and corrosion properties.

- Materials Science*, 2019, Vol. 54, no. 4, pp. 506–511, doi: 10.1007/s11003-019-00211-4
10. Nenastina T. A., Ved M. V., Proskurina V. O., Zyubanova S.I. Electrochemical deposition of Co-Mo-W and Co-Mo-Zr coatings from complex electrolytes. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry*, 2019, pp. 60–66.
 11. Yar-Mukhamedova G., Sakhnenko N., Nenastina T. Electrodeposition and properties of binary and ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten. *Applied Surface Science*, 2018, no. 445, pp. 298–307, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.171.
 12. Jiang L., Lu J., Pan S. and other. Effect of rare earth salt and perpendicular magnetic field on corrosion resistance and microstructure of CoMoP film in chloride solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 2012, no. 7, pp. 2188–2200.
 13. Esther P., Kennady J., Saravanan P., Venkatachalam T. Structural and Magnetic Properties of Electrodeposited Ni-Fe-W Thin Films. *Journal of Non-Oxide Glasses*, 2009, no. 3, pp. 301–309.
 14. Ozdemir H. C., Nazarahari A., Yilmaz B., Canadinc D., Bedir E., Yilmaz R., Unal U., Maier H. J. Machine learning –informed development of high entropy alloys with enhanced corrosion resistance. *Electrochimica Acta*, 2024, Vol. 476, 143722, doi: 10.1016/j.electacta.2023.143722
 15. Kushnerov O. I., Ryabtsev S. I., Bashev V. F. Metastable states and physical properties of Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy thin films. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2023, Vol. 750 (1), pp. 135, doi: 10.1080/15421406.2022.2073043
 16. Nenastina T. O., Ved M. V., Sakhnenko M. D., Proskurina V. O., Zyubanova S. I. Corrosion Resistance of Composite Coatings Based on the Alloys of Cobalt With Refractory Metals. *Materials Science*, 2021, Vol. 57, no.1, pp. 634–641, doi: 10.1007/s11003-021-00475-9
 17. Yapontseva Y. S., Dikuser A. I., Kyblanovskii V. S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, Vol. 50, pp. 330–337, doi: 10.3103/S1068375514040139
 18. Wang R., Lu Ya., Ma Ye., Sun Z., Gopalan S. Experimental validation of solid oxide fuel cell polarization modeling: An LSM-YSZ/YSZ/Ni-YSZ case study. *Electrochimica Acta*, Vol. 361, pp. 137052, doi: 10.1016/j.electacta.2020.137052
 19. Nenastina T. O., Berezhna K. B., Sakhnenko M. D., Buhaievskiy S. O. Degradation of reinforced concrete construction of bridge structures: corrosion aspect. *Materials Science*, 2024, Vol. 59, no. 5, pp. 538–545, doi 10.1007/s11003-024-00809-3

Відомості про авторів (About authors)

Ненастіна Тетяна Олександрівна – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри хімії та хімічної технології; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6108-4023; e-mail: nenastina@ukr.net.

Tetiana Nenastina – Dr. Sci., Prof., department of Chemistry and Chemical Technology, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6108-4023; e-mail: nenastina@ukr.net.

Сахненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Mikola Sakhnenko – Dr. Sci., Prof., department of physical chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Проскуріна Валерія Олегівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри загальної та неорганічної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com.

Valeria Proskurina – Ph.D., Associate Professor, department of general and inorganic chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com.

Гапонова Людмила Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри комп'ютерної графіки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6038-2624; e-mail: gaplyudmila@gmail.com

Ljudmila Lyudmila – candidat of sciences, associate professor, department of Computer Graphics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6038-2624; e-mail: gaplyudmila@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Ненастіна Т. О., Сахненко М. Д., Проскуріна В. О., Гапонова Л. В. Синтез електролітичних потрійних сплавів з високою мікротвердістю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 4 (22). С. 56-61. doi:10.20998/2413-4295.2024.04.07.

Please cite this article as:

Nenastina T., Sakhnenko M., Proskurina V., Haponova L. Synthesis of electrolytic ternary alloys high microhardness. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 4(22), pp. 56–61, doi:10.20998/2413-4295.2024.04.07.

*Надійшла (received) 30.10.2024
Received 02.12.2024*