

УДК 621.35

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.12

МОДЕЛЮВАННЯ ВМІСТУ КОМПОНЕНТІВ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ ВІД ГУСТИНИ СТРУМУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Т. О. НЕНАСТІНА^{1*}, М. Д. САХНЕНКО², В. О. ПРОСКУРИНА³, Н. В. ГОРОХІВСЬКА²

¹ кафедра хімії та хімічної технології, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА

² кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

³ кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: nenastina@ukr.net

АНОТАЦІЯ Електроосадження композиційних покриттів тугоплавкими металами та цирконієм з кобальтом дозволяє отримувати покриття з унікальним поєднанням фізико-хімічних властивостей, недосяжних при використанні інших методів нанесення. Однією з причин обмеженого використання електролітичного способу нанесення покриттів такими композитами є складність керування процесом. Властивості сплавів підгрупи заліза з тугоплавкими металами та їх композитами залежить не тільки від хімічного складу, тобто вмісту тугоплавкого компонента, але і від умов осадження. Варіювання густини струму поляризації дозволяє осаджувати покриття різного складу, а відповідно, і різних функціональних властивостей. Основу роботи становили експериментальні дослідження фізико-хімічних закономірностей електролітичного осадження композиційних покриттів на основі кобальта в гальваностатичному режимі. Метою роботи було розроблення математичної моделі залежності формування кобальтвмісних композиційних покриттів від густини струму поляризації. Проблема опису електрохімічного осадження металів, сплавів і композиційних покриттів є актуальною, оскільки математичне моделювання являє собою невід'ємну складову розробки нових та вдосконалення існуючих систем. Для керування складом композиційних електролітичних покриттів на основі кобальту запропонована математична модель, що дозволяє отримувати покриття напередзаданого складу при варіюванні густини робочого струму. Встановлено, що керування складом покриттів, зокрема вмістом Co, Mo, W, можна шляхом варіювання густини струму електролізу, використовуючи розроблені досить прості математичні моделі. Включення Zr до складу композиційних покриттів описується більш складною моделлю, в якій значення параметрів залежать як від концентрації компонентів електроліту, так і умов електролізу.

Ключові слова: кобальт; електрохімічний синтез; тугоплавкі метали; композиційні електролітичні покриття; математична модель; густина струму.

MODELING THE CONTENT OF COMPONENTS OF COMPOSITE ELECTROLYTIC COVER FROM THE POLARIZATION CURRENT

T. NENASTINA¹, M. SAKHNENKO², V. PROSKURINA³, N. HOROKHIVSKA²

¹ Department of Technologies of Road-Building Materials and Chemistry, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE

² Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The composite coatings electrodeposition with the refractory metals and zirconium with cobalt makes it possible to obtain a coating with a unique combination of physicochemical properties that are unattainable when using other application methods. One of the reasons for the limited use of the electrolytic method of coating with such composites is the difficulty of controlling the process. The properties of alloys of the iron subgroup with refractory metals and composites depend not only on the chemical composition (the content of the refractory component) but also on the deposition conditions. Varying the polarization current density allows the creation of coatings of different compositions and, accordingly, different functional properties. The basis of the work was experimental research on the physicochemical patterns of electrolytic deposition of cobalt-based composite coatings by the galvanostatic current. The purpose of the work was to develop a mathematical model of the dependence of the cobalt-containing composite coatings formation on the polarization current density. The problem of describing the electrochemical deposition of metals, alloys and composite coatings is relevant since mathematical modeling is an integral part of the development of new and improvement of existing systems. A mathematical model is proposed to control the composition of composite electrolytic coatings based on cobalt, which allows obtaining coatings of a predetermined composition when varying the density of the operating current. It has been established that the composition of coatings, in particular the content of Co, Mo, W, can be controlled by varying the electrolysis current density, using quite simple developed mathematical models. The inclusion of Zr in the composition of composite coatings is described by a more complex model, in which the parameter values depend on both the concentration of the electrolyte components and the electrolysis conditions.

Keywords: cobalt; electrochemical synthesis; refractory metals; composite electrolytic coatings; mathematical model; current density

Вступ

Композиційні матеріали з металевою матрицею знаходять застосування в багатьох галузях

промисловості [1]. Комбінування металів з речовинами іншої природи дозволяє значно підвищити їх експлуатаційні властивості. В цьому зв'язку створення і застосування композиційні

покриття є технологічно і економічно вигідною умовою виробництва. Використання сучасних методів отримання композиційних матеріалів з поліпшеними фізико-механічними і фізико-хімічними властивостями надало можливість суттєво підвищити функціональні властивості виробів шляхом нанесення на їх поверхню композиційних покриттів з високим експлуатаційними показниками [2,3].

Електрохімічне співосадження кобальту з тугоплавкими металами – вольфрамом, молібденом, ванадієм, цирконієм та/або їх сполуками в композиційні покриття ускладнено значною відмінністю стандартних електродних потенціалів сплавотвірних компонентів [4]. Використання полілігандних електролітів дозволяє зблизити електродні потенціали і, відповідно, отримати покриття високої якості, проте обґрунтування вибору ліганда для згаданих комплексотвірних елементів є досить актуальним і складним завданням. За останні роки накопичено значний фактичний матеріал, що висвітлює результати дослідження умов електроосадження сплавів металів родини феруму [5-7], однак практичне застосування мають поки лише деякі з них. Однією з причин обмеженого використання електролітичного способу нанесення покриттів такими сплавами є складність управління процесом.

Проблема математичного моделювання електрохімічного осаження металів, сплавів і композиційних покриттів є актуальною, оскільки являє собою невід'ємну складову розробки нових та вдосконалення існуючих систем. В поточний час перебудова промислового виробництва має здійснюватись відповідно до вимог Індустрії 4.0, як світового тренду сучасності, тому розробка новітніх технологій здійснюється за участі кіберфізичних систем, які створюють віртуальні копії фізичних об'єктів, здійснюють контроль і керування перебігом процесів і приймають децентралізовані рішення.

Мета роботи

Метою роботи було розроблення математичної моделі формування осаження кобальтвмісних композиційних покриттів з тугоплавкими металами та/або їх сполуками від густини струму поляризації.

Методика виконання експерименту

Електрохімічне осаження композиційних покриттів на основі кобальту з тугоплавкими металами і цирконієм проводили з полілігандних цитратно-дифосфатних електролітів [8,9] в гальваностатичному та імпульсному режимах поляризації при варіюванні густині струму в інтервалі $i = 1-10$ А/дм². В ролі анодів використовували компланарні пластини з кобальту або нержавіючої сталі. Електроліти для осаження композиційних покриттів готували з аналітично чистих реактивів, які розчиняли в невеликій кількості дистильованої води, після чого розчин змішували в певній послідовності,

ґрунтуючись на результатах дослідження іонних рівноваг [10]. Покриття композиційними покриттями наносили на підкладки з міді М0.

Хімічний склад покриттів визначали рентгенофлуоресцентним методом з використанням портативного спектрометра «СПРУТ» [11]. Аналіз проводили мінімум в 3 точках з подальшим усередненням отриманих значень. Елементний склад і морфологію поверхні покриттів аналізували на сканівному електронному мікроскопі (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP. Зображення отримували за допомогою реєстрації вторинних електронів шляхом сканування електронним пучком, що дало змогу дослідити топографію з високою роздільною здатністю і контрастністю [9]. Похибка вимірювання вмісту компонентів становила ± 1 мас. %.

Обговорення результатів

Відомо, що вміст тугоплавкого металу в складі покриттів ω_M є багатопараметричною функцією і залежить від значного числа чинників, до яких можна віднести компонентний склад електроліту, який визначає хімічні потенціали складових (μ_i), зокрема вміст оксометалатів (c_{MOx}); співвідношення комплексотвірних компонентів (k_{μ}), амплітудні і часові параметри електролізу – густину струму поляризації (i), тривалість імпульсу (t_i) і паузи (t_n), час (t_k) і температуру (T) електролізу, товщину осаду (δ) та ряд інших чинників

$$\omega_M = f(\mu_i, k_{\mu}, c_{MOx}, t_i, t_k, T, i, t_k, \delta \dots). \quad (1)$$

За умови, що параметри (1), за виключенням i , під час формування покриттів залишаються незмінними, можна припустити існування функціонального зв'язку, який відображає зміну вмісту тугоплавкого компоненту у складі композиційних покриттів від густини струму поляризації [12].

Так, зокрема, вміст Co, Mo, W у покриттях Co-Mo-WO_x та Co-W-ZrO₂ (табл. 1) з урахуванням асимптотичного характеру залежності $\omega_M = f(i)$ дозволяє зробити висновок, що вона у першому наближенні може бути описана двопараметричним рівнянням, які зазвичай використовують для опису динаміки електрохімічних систем іншого характеру [13, 14]:

$$\omega_M = a(i)^b, \quad (2)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, так званий параметр масштабу, b – параметр форми залежності.

Після логарифмування рівняння (2) можна надати у формі, що дозволяє представити взаємозв'язок у вигляді лінійної залежності з кутовим коефіцієнтом b у білогарифмічних координатах $\lg \omega_M - \lg i$. Будемо вважати, що залежності (рис. 1, 2) відбивають саме лінійний характер взаємозв'язку досліджуваних параметрів, а рівняння

$$\lg \omega_M = \lg a + b \lg i \quad (3)$$

дозволяє розрахувати коефіцієнти a і b . В результаті графоаналітичної обробки одержано значення параметрів, які наведені на візках рис. 1, 2.

Таблиця 1 – Вплив густини струму на вміст металів у кобальтвмісних композиційних покриттях

i , А/дм ²	ω , мас.%					
	Co-Mo-WO _x			Co-W-ZrO ₂		
	Co	Mo	W	Co	W	Zr
2	83,7	12,1	4,2	83,3	16,2	0,5
4	80,2	14,0	5,8	83,0	16,0	1,0
6	78,5	15,8	5,7	84,9	13,1	2,0
8	78,1	16,1	5,8	86,8	12,2	1,0
10	76,9	16,7	6,4	89,0	10,5	0,5

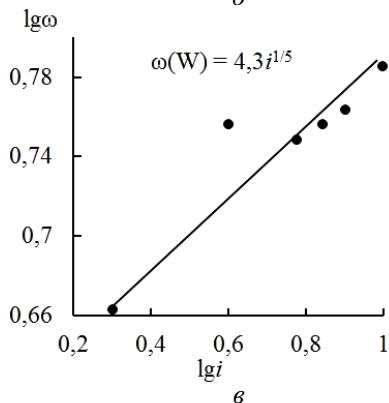
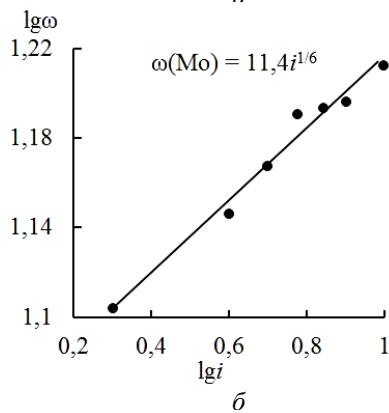
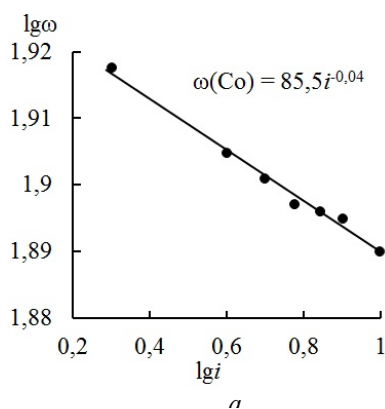


Рис. 1 – Лінеаризація експериментальних залежностей розподілу тугоплавких металів від густини струму (А/дм²) Co-Mo-WO_x для Co (а), Мо (б), W (в). Точки – результати експерименту, суцільна лінія – розрахунок

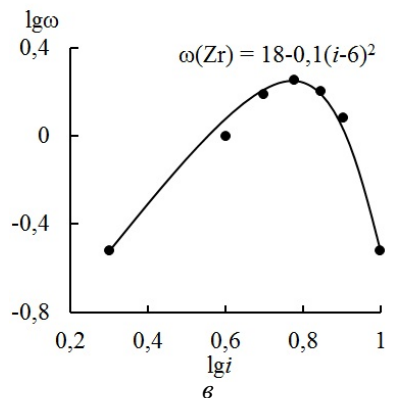
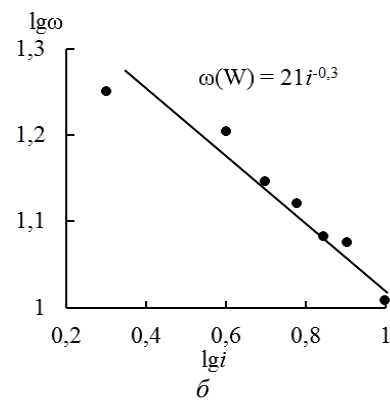
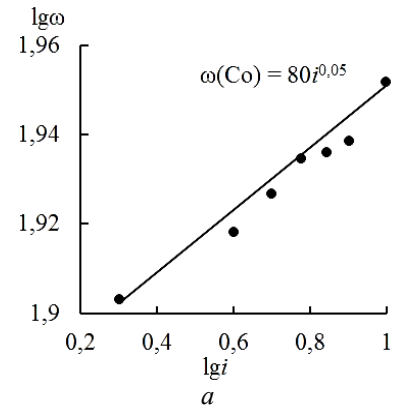


Рис. 2 – Лінеаризація експериментальних залежностей вмісту тугоплавких металів (мас.%) в складі композиту Co-W-ZrO₂ від густини струму (А/дм²) для Co (а), W (б), Zr (в). Точки – результати експерименту, суцільна лінія – розрахунок

Експериментальна залежність вмісту цирконію в покритті Co-W-ZrO₂ від енергетичного параметру процесу має форму оберненої параболи, максимум якої припадає на густину струму 6 А/дм² (рис. 3). Аналіз цієї залежності свідчить, що оскільки парабола є оберненою, показник ступеня має бути парним, крім того, центр параболи зсунутий стосовно вісі ординат. За такої форми залежність можна апроксимувати рівнянням

$$\omega_M = a + m \cdot (i-d)^b \quad (4)$$

Цілком істотно, що параметр a відповідає максимальному значенню вмісту цирконію в покритті Co-W-ZrO₂ у досліджуваному діапазоні густин струму, а d – зсув центру параболи по вісі абсцис. Для визначення

параметрів рівняння (4) застосовано метод лінеаризації, за яким після перетворення означеного рівняння до

$$y - a = m(i-d)^b \quad (5)$$

деу-вмістцирконію, танаступногологарифмування

$$\lg(y - a) = \lg m + b \lg(i-d) \quad (6)$$

маємо лінійне рівняння (7).

Дійсно, якщо ввести заміну $Y = \lg(y-a)$, $A = \lg m$, $X = \lg(i-d)$, то рівняння (6) матиме наступний вигляд

$$Y = A + bX \quad (7)$$

Результати розрахунку параметрів апроксимацій, що візуалізують очікувані залежності (суцільна лінія на рис. 3), дозволяють дійти наступних висновків. По-перше, відзначимо доволі незначне розсіювання експериментальних результатів від розрахункових залежностей, що надає підстави для їх застосування з метою прогнозування складу, а відтак – і властивостей покривів. По-друге, параметр b , так званий параметр форми, відбиває кінетичні особливості формування складу композиційних покривів.

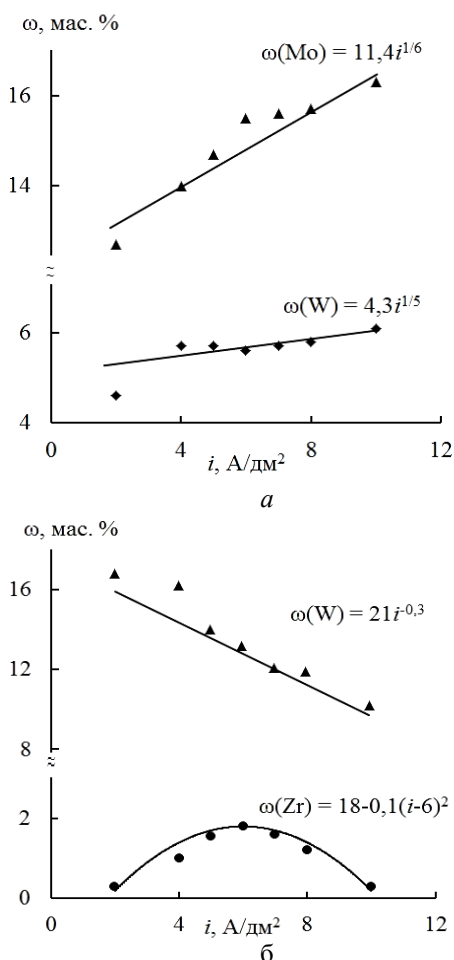


Рис. 3 – Вміст металів (мас.%) у композиційних покриттях Co-Mo-WO_x (а), Co-W-ZrO₂ (б) залежно від густини струму поляризації (А/дм²). Точки – результати експерименту, суцільна лінія – розрахунок

Висновки

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що керування складом покриттів, зокрема вмістом Со і сполук тугоплавких металів Мо, W, можна здійснювати шляхом варіювання густини струму електролізу, використовуючи розроблені досить прості математичні моделі. Включення Zr до складу композиційних покривів описується більш складним рівнянням, в якому значення параметрів апроксимації залежать як від умов електролізу, так і концентрації компонентів електроліту.

Список літератури

1. 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.
2. Huang J. M., Li Y., Zhang G. F., Hou X. D., Deng D. W. Electroplating of Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings on 40CrNiMo7 alloy. *Surface Engineering*. 2013. Vol. 29. P. 194–199. doi: 10.1179/1743294412Y.0000000108.
3. 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. P. 11-16. doi: 10.32434/0321-4095-2021-139-6-11-16.
4. Danilov F. I., Sknar Yu. E., Amirulloeva N. V., Sknar I. V. Kinetics of electrodeposition of Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings from methanesulfonate electrolytes. *Journal of Electrochemistry*. 2016. Vol. 52. P. 494–499. doi: 10.1134/S1023193516050037.
5. 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.
6. Jiang L., Lu J., Pan S. et al. 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.
7. Bersirova O., Kublanovsky V. Nickel-rhenium electrolytic alloys: synthesis, structure, and corrosion properties. *Materials Science*. 2019. Vol. 54, No. 4. P. 506–511. doi: 10.1007/s11003-019-00211-4
8. Esther P., Kennady J., Saravanan P., Venkataehalam T. Structural and Magnetic Properties of Electrodeposited Ni-Fe-W Thin Films. *Journal of Non-Oxide Glasses*. 2009. №3. P. 301-309.
9. Nenastina T. O., Ved M. V., Sakhnenko M. D., Proskurina V. O., Zyubanov S. I. Corrosion Resistance of Composite Coatings Based on the Alloys of Cobalt With Refractory Metals. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. No.1. P. 634-641. doi: 10.1007/s11003-021-00475-9.
10. 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: 10.3103/S1068375521010099.
11. Yapontseva Y. S., Dikusar 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.
12. Mikhailov I. F., Baturin A. A., Mikhailov A. I., Fomina L. P. Perspectives of development of X-ray analysis for material composition. *Functional materials*. 2016. No. 1. P.

5-14. doi: 10.15407/fm23.01.005.

13. Ведь М. В., Богоявленская Е. В. Принципы повышения коррозионной стойкости сплавов алюминия: режимы оксидирования. *Украинский химический журнал*. 2010. Т. 76. № 5. С. 42–48.
14. 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*. 2020. Vol. 361. P. 137052. doi: 10.1016/j.electacta.2020.137052.

References (transliterated)

1. 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.
2. Huang J. M., Li Y., Zhang G. F., Hou X. D., Deng D. W. Electroplating of Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings on 40CrNiMo7 alloy. *Surface Engineering*, 2013, 29, pp. 194–199, doi: 10.1179/1743294412Y.0000000108.
3. 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.
4. Danilov F. I., Sknar Yu. E., Amirulloeva N. V., Sknar I. V. Kinetics of electrodeposition of Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings from methanesulfonate electrolytes. *Journal of Electrochemistry*, 2016, 52, pp. 494–499, doi: 10.1134/S1023193516050037.
5. 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.
6. Jiang L., Lu J., Pan S. et al. 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, pp. 2188-2200.
7. Bersirova O., Kublanovsky V. Nickel-rhenium electrolytic alloys: synthesis, structure, and corrosion properties. *Materials Science*, 2019, 54, 4, pp. 506–511, doi: 10.1007/s11003-019-00211-4.
8. Esther P., Kennady J., Saravanan P., Venkataehalam T. Structural and Magnetic Properties of Electrodeposited Ni-Fe-W Thin Films. *Journal of Non-Oxide Glasses*, 2009, 3, pp. 301-309.
9. Nenastina T. O., Ved M. V., Sakhnenko M. D., Proskurina V. O., Zyubanov S. I. Corrosion Resistance of Composite Coatings Based on the Alloys of Cobalt With Refractory Metals. *Materials Science*, 2021, 57, 1, pp. 634-641, doi: 10.1007/s11003-021-00475-9.
10. 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, 57, pp. 59-66, doi: 10.3103/S1068375521010099.
11. Yapontseva Y. S., Dikusar 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, 50, pp. 330-337, doi: 10.3103/S1068375514040139.
12. Mikhailov I. F., Baturin A. A., Mikhailov A. I., Fomina L. P. Perspectives of development of X-ray analysis for material composition. *Functional materials*, 2016, 1, pp. 5–14, doi: 10.15407/fm23.01.005.
13. Ved M. V., Bogoyavlenskaya E. V. Printsipy povysheniya korrozionnoy stoykosti splavov alyuminiya: rezhimiy oksidirovaniya. *Ukrainskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, 76, 5, pp. 42-48.
14. 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*, 2020, 361, pp. 137052, doi: 10.1016/j.electacta.2020.137052.

Сведения об авторах (About authors)

Ненастіна Тетяна Олександрівна – доктор технічних наук, доцент, 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., The department of technology of road-construction materials and chemistry, Kharkov 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

Nikolai 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, асистент, 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., assistant, department of general and inorganic chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4215-4190; e-mail: voproskurina@gmail.com

Горохівська Наталія Валентинівна – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри фізичної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7494-175X; e-mail: natagor989@gmail.com

Natalia Horokhivska – graduate student, department of physical chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7494-175X; e-mail: natagor989@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ненастіна Т. О., Сахненко М. Д., Проскуріна В. О., Горохівська Н. В. Моделювання вмісту компонентів композиційних електролітичних покриттів від густини струму поляризації. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 3 (13). С. 81-85. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.12.

Please cite this article as:

Nenastina T., Sakhnenko M., Proskurina V., Horokhivska N. Modeling the content of components of composite electrolytic cover from the polarization current. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 81–85, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.12.

Надійшла (received) 18.07.2022