

М. Д. САХНЕНКО, Ю. А. ЖЕЛАВСЬКА, І. Ю. ЄРМОЛЕНКО, С. І. РУДНЕВА, О. П. ПОСПЕЛОВ

ВАРІАТИВНІСТЬ ВПЛИВУ ІОННИХ ФОРМ СПЛАВОТВІРНИХ КОМПОНЕНТІВ НА СКЛАД ПОКРИТТІВ КОБАЛЬТ-ВАНАДІЙ

Досліджено вплив іонних форм сплавотвірних компонентів в розчині на склад покриттів кобальт-ванадій. Покриття осаджувались з цитратного електроліту, який містить 0,2 моль/дм³ ванадію (в перерахунку на метал) у формі оксиду ванадію (V) або ванадил (IV) сульфату. Процес проводили за допомогою стаціонарного або імпульсного режимів електролізу з густиною струму 6–12 А/дм² та 2–10 А/дм² відповідно. Використання ванадил сульфату VOSO₄ дозволило отримати електроліт з більш високим вмістом іонів оксованадію (IV) [VO(C₆H₅O₇)₂]⁴⁻ ніж при застосуванні оксиду ванадію V₂O₅. Це досягнуто завдяки високій розчинності ванадил сульфату у воді та полегшеному утворенню ванадієм комплексів з іонами цитрату. Такий електроліт легший в приготуванні, так як дозволяє уникнути багатостадійності при отриманні цитратного комплексу оксованадію (IV) внаслідок зміни ступеня окиснення ванадію в сполуках, та стабільніший під час роботи. Електроосаджені покриття з електроліту, що містить ванадил сульфат мають більш однорідну та мікрокристалічну структуру в порівнянні з покриттями, отриманими з електроліту з оксидом ванадію. Використання ванадил сульфату також дозволяє отримувати покриття з більш високим вмістом ванадію в порівнянні з вмістом ванадію у покриттях, отриманих з електроліту, що містить оксид ванадію при реалізації обох режимів електролізу. Застосування імпульсного режиму електролізу призводить до осадженню покриттів з більшим вмістом ванадію в порівнянні з вмістом ванадію у покриттях, осаджених за допомогою стаціонарного режиму електролізу. Цей факт вказує на додаткове хімічне відновлення в період паузи ванадію з ванадил-аніонів, адсорбованими атомами водню, які утворилися в електрохімічному процесі протягом періоду імпульсу. Доведено, що використання ванадил сульфату сумісно з імпульсним режимом електролізу дозволяє отримувати покриття кобальт-ванадій з найбільшим вмістом ванадію (> 2.5 мас.%). Ванадил сульфат можна рекомендувати для приготування електролітів для нанесення ванадійвмісних покриттів з прогнозованими функціональними властивостями.

Ключові слова: іонні форми, оксид ванадію, ванадил сульфат, покриття Co-V, режим електролізу, морфологія поверхні

M. D. SAKHNENKO, Yu. A. ZHELAVSKA, I. Yu. YERMOLENKO, S. I. RUDNYEVA, O. P. POSPELOV

IONIC FORMS OF ALLOY-FORMING COMPONENTS VARIABLE IMPACT ON THE COBALT-VANDIUM COATING COMPOSITION

The influence of the ionic forms of alloying components in solution on the composition of cobalt–vanadium coatings was investigated. The coatings were electrodeposited from a citrate electrolyte containing 0.2 mol dm⁻³ vanadium (calculated as metal) in the form of either vanadium(V) oxide or vanadyl (IV) sulfate. The electrodeposition process was performed under stationary and pulsed electrolysis modes at current densities of 6–12 A dm⁻² and 2–10 A dm⁻², respectively. The use of vanadyl sulfate (VOSO₄) resulted in an electrolyte containing a higher concentration of oxovanadium (IV) ions, [VO(C₆H₅O₇)₂]⁴⁻, compared with electrolytes prepared using vanadium oxide (V₂O₅). This is attributed to the higher solubility of vanadyl sulfate in water and the facilitated formation of vanadium–citrate complexes. In addition, such an electrolyte is easier to prepare, as it eliminates the multistep formation of oxovanadium (IV) citrate complexes associated with changes in the oxidation state of vanadium in the precursor compounds. The resulting electrolyte also demonstrates improved operational stability. Coatings electrodeposited from electrolytes containing vanadyl sulfate exhibit a more uniform and microcrystalline structure than those obtained from electrolytes containing vanadium oxide. Furthermore, the use of vanadyl sulfate enables the deposition of coatings with a higher vanadium content compared with coatings produced from vanadium oxide–based electrolytes under both electrolysis modes. The application of pulsed electrolysis leads to coatings with a higher vanadium content than those obtained under stationary electrolysis conditions. This observation suggests that additional chemical reduction of vanadium occurs during the pause period due to the interaction of vanadyl anions with adsorbed hydrogen atoms generated during the electrochemical process in the pulse period. It was demonstrated that the combined use of vanadyl sulfate and pulsed electrolysis enables the deposition of cobalt–vanadium coatings with the highest vanadium content (>2.5 mass.%). Therefore, vanadyl sulfate can be recommended as a precursor for the preparation of electrolytes intended for the electrodeposition of vanadium-containing coatings with predictable functional properties.

Keywords: ionic forms, vanadium oxide, vanadyl sulfate, Co-V coating, electrolysis mode, surface morphology

Вступ. Для сплавів металів підгрупи групи заліза з ванадієм, молібденом та вольфрамом можна передбачити низку функціональних властивостей, таких як каталітична активність у реакції виділення водню [1], підвищена мікротвердість та корозійна стійкість [2]. Осадження таких покриттів може здійснюватися в стаціонарному або імпульсному режимах електролізу з використанням електролітів, що містять складні або прості іони [3-5].

Особливістю хімії ванадію (V) є те, що його стан у водних розчинах залежить від рН середовища, концентрації та потенціалу в системі [6].

У кислих розчинах ванадій (V) існує у формі моноядерного оксо-катиона, в нейтральному та слабкокислом середовищі – як моноядерний оксо-

аніон. Подальше збільшення концентрації ванадію призводить до утворення поліядерних аніонних частинок з максимальним ступенем конденсації, що дорівнює 10 [7].

Так при осадженні в стаціонарному режимі покриття нікель-ванадій з сульфатного електроліту нікелювання, що містить 0,1–0,3 г/дм³ ванадію (в перерахунку на метал) у вигляді ванадат-іона, який синтезовано з використанням оксиду ванадію V₂O₅, вміст ванадію у покритті становить 0,3–0,45 мас. % [8]. При збільшенні вмісту ванадію в електроліті, покриття не осаджуються внаслідок того, що в слабкокислих неорганічних розчинах при концентрації ванадію більше ніж 0,01 моль/дм³ утворюються

поліванадат-іони, які перешкоджають електроосадженню покриття.

Органічні кислоти відновлюють п'ятивалентний ванадій до тривалентного та чотиривалентного ванадію з утворенням ванадил-іонів [9].

Для вивчення спектральних властивостей були синтезовані ванадилні комплекси винної, молочної, яблучної та лимонної кислот [10].

Електроосадження сплавів підгрупи заліза (Fe, Co, Ni) – ванадій може бути виконано з водних розчинів цитрату та тартрату, які містять ванадій у формі ванадату амонію NH_4VO_3 . Присутність NH_4 -іону призводить до збільшення вмісту ванадію у сплавах Fe-V, Ni-V та Co-V [5], але робить використання таких розчинів екологічно небезпечним.

Викладене вище, склало підґрунтя для проведення дослідження впливу іонних форм сплавотвірних компонентів розчину, на склад покриттів кобальт-ванадій, що осаджуються з цитратного електроліту при різних режимах електролізу.

Мета роботи. Дослідити вплив іонних форм сплавотвірних компонентів на склад покриттів кобальт-ванадій, що осаджуються з цитратного електроліту в стаціонарному або імпульсному режимах електролізу. Для досягнення поставленої мети необхідно визначити вміст ванадію у покриттях, отриманих з електроліту, який містить ванадій у формі оксиду ванадію (V) або ванадил (IV) сульфату.

Експериментальна частина. Покриття сплавом кобальт-ванадій наносили в цитратному електроліті, що містив, моль/дм³: 0,4 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0,1 $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та 0,2 моль/дм³ ванадію (в перерахунок на метал) у формі V_2O_5 або VOSO_4 . Електроосадження проводили при температурі 35–40 °C та pH = 2,8–3,5 з використанням кобальтового анода в гальваностатичному режимі з густиною струму 6–12 А/дм² та однополярним імпульсним струмом з амплітудою 2–10 А/дм², тривалість імпульсу та паузи становила $5 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ с. Товщина покриттів становила 9–12 мкм. Перед електроосадженням поверхню сталевих електродів площею 2 см² полірували та знежирювали.

Хімічний склад покриттів визначали за результатами енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії з використанням мікроаналізатора Oxford INCA Energy 350, інтегрованого в систему скануючого електронного мікроскопа (SEM).

Електроліз у гальваностатичному режимі проводили з використанням стабілізованого джерела постійного струму B5-47, в імпульсному режимі – з використанням імпульсного потенціостата ПІ-50-1.1 з програматором PR-8.

Результати експерименту та їх обговорення. Різноманітність іонних форм ванадію в розчинах призводить до утворення великої кількості сполук з іншими металами, де співвідношення метали-ванадій значно варіюється. Крім того, іони ванадію відомі своєю здатністю утворювати комплексні сполуки з неорганічними та органічними лігандами [7, 9].

Високий заряд та малий радіус іона V^{4+} унеможливають його присутність у водних розчинах, тому сполуки ванадію (IV) являють собою оксосолі. У водних розчинах солей ванадію (IV) присутній єдиний тип катіонів – іони оксованадію (IV), або ванадилу VO^{2+} , як правило, у вигляді аквакомплексів $[\text{VO}(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$, $[\text{VO}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$. В іоні ванадилу присутній подвійний зв'язок $\text{V}=\text{O}$ (0,155 – 0,168 нм), який значно коротший за одинарний зв'язок (–0,23 нм). У кристалогідратах солей ванадилу, як правило, присутні ізольовані іони ванадилу, що мають форму октаедра або квадратної піраміди з одним укороченим зв'язком $\text{V}=\text{O}$. В слабкислому, нейтральному та лужному середовищах солі ванадилу можуть бути окислені до оксиду ванадію (V) або ванадатів (V), що і використано у даному дослідженні. Зокрема, водний розчин VOSO_4 внаслідок гідролізу має кислу реакцію, проте ступінь гідролізу незначна та може бути пригнічена надлишком іонів H^+ . Для ванадію (IV) характерно утворення комплексних сполук з кисневодонорними лігандами, такими як кислотні залишки органічних кислот.

Додавання оксиду ванадію (V) до розчину цитрату натрію призводить до утворення жовтого розчину, що містить іони ванадату, до складу якого входить п'ятивалентний ванадій. З часом колір змінюється на зелений, а потім на темно-синій, що може свідчити про відновлення сполук ванадію (V) до ванадію (III) з утворенням комплексних іонів ванадію (III) $[\text{V}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2]^{3-}$. Цей розчин з комплексним іоном ванадію (III) окислюється повітрям з утворенням комплексів цитратів оксованадію (IV) $[\text{VO}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2]^{4-}$ [4].

Для приготування цитратного електроліту замість оксиду ванадію (V) V_2O_5 [11] було використано ванадил сульфат VOSO_4 , що дозволило отримати електроліт з високим вмістом іонів ванадію. Це досягнуто завдяки високій розчинності ванадил сульфату у воді та полегшеному утворенню ванадієм комплексів з іонами цитрату. Цитратні комплекси оксованадію (IV) $[\text{VO}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2]^{4-}$ утворюються одразу після додавання ванадил сульфату до розчину цитрату натрію. Обробка отриманого розчину сульфатом кобальту призводить до отримання електроліту, що містить як кобальтові, так і цитратні комплекси оксованадію (IV). Цей електроліт легший в приготуванні та стабільніший під час роботи.

Отримані електроосаджені покриття з такого електроліту задовільної якості: світло-сірі, шорсткі, мають більш однорідну та мікрокристалічну структуру в порівнянні з покриттями, отриманими з електроліту з оксидом ванадію (рис. 1,2).

Використання ванадил сульфату також дозволяє отримувати покриття з більш високим вмістом ванадію в порівнянні з вмістом ванадію у покриттях, отриманих з електроліту, що містить оксид ванадію [11] (рис. 3, 4).

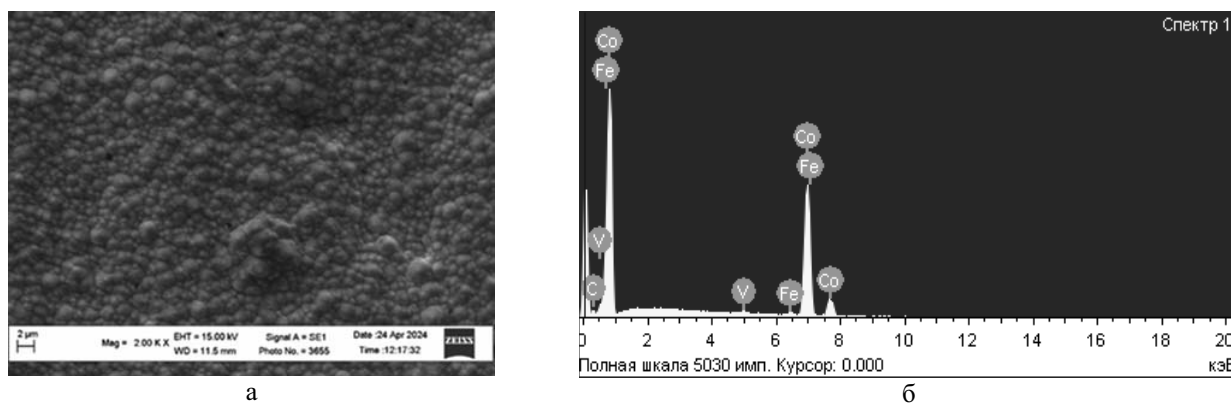


Рисунок 1 – Морфологія поверхні покриття Co-V (а) та рентгенівський спектр (б) для електроліту, що містить V_2O_5

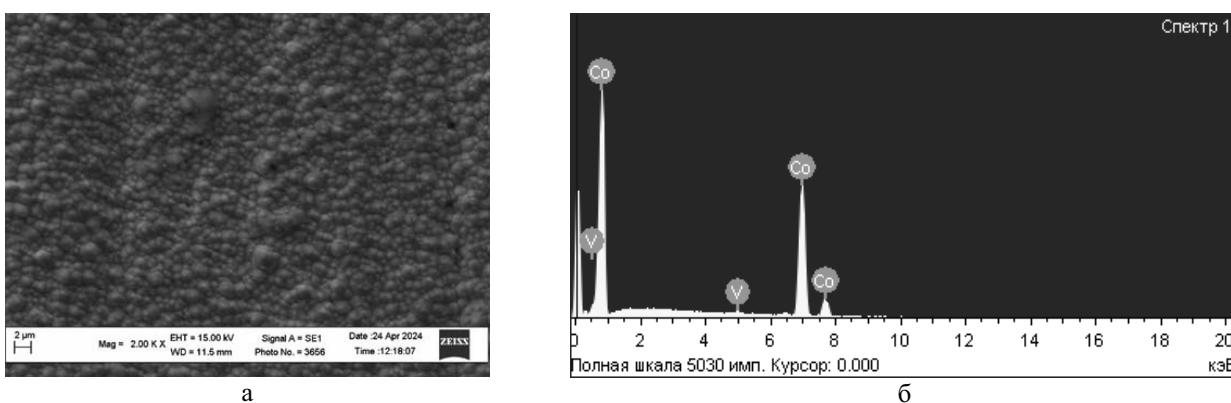


Рисунок 2 – Морфологія поверхні покриття Co-V (а) та рентгенівський спектр (б) для електроліту, що містить $VOSO_4$

При реалізації стаціонарного режиму електролізу максимальний вміст ванадію в кобальт-ванадієвих покриттях був досягнутий при густині струму 10

A/dm^2 для обох електролітів: 0,17 та 1,0 мас.% для електролітів, що містять V_2O_5 або $VOSO_4$ відповідно (рис. 3).

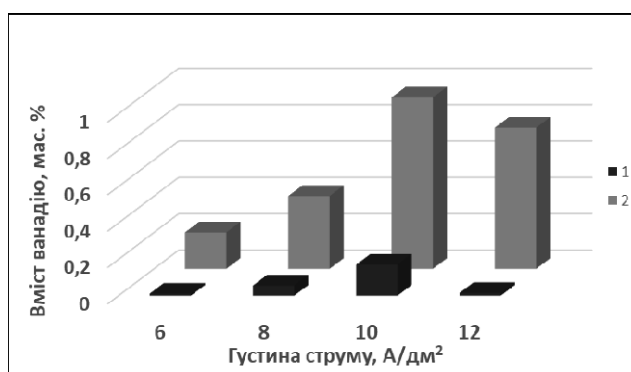


Рисунок 3 – Залежність вмісту ванадію у покритті Co-V від густині струму (стаціонарний режим) для електроліту, що містить: 1 – V_2O_5 ; 2 – $VOSO_4$

Отримані залежності вмісту ванадію у сплаві кобальт-ванадій від амплітуди уніполярного імпульсного струму та співвідношення тривалості

імпульсу і паузи відображені в формі 2D-графіків на рис. 4.

Як видно з 2D-графіку максимальний вміст ванадію у сплаві 1,45–1,5 мас.% спостерігається при

густинах струму 6–7 А/дм² (рис.4, а) та 2,3–2,6 мас.% електролітів з V₂O₅ та VOSO₄ відповідно. при густинах струму 8–10 А/дм² (рис.4, б) для

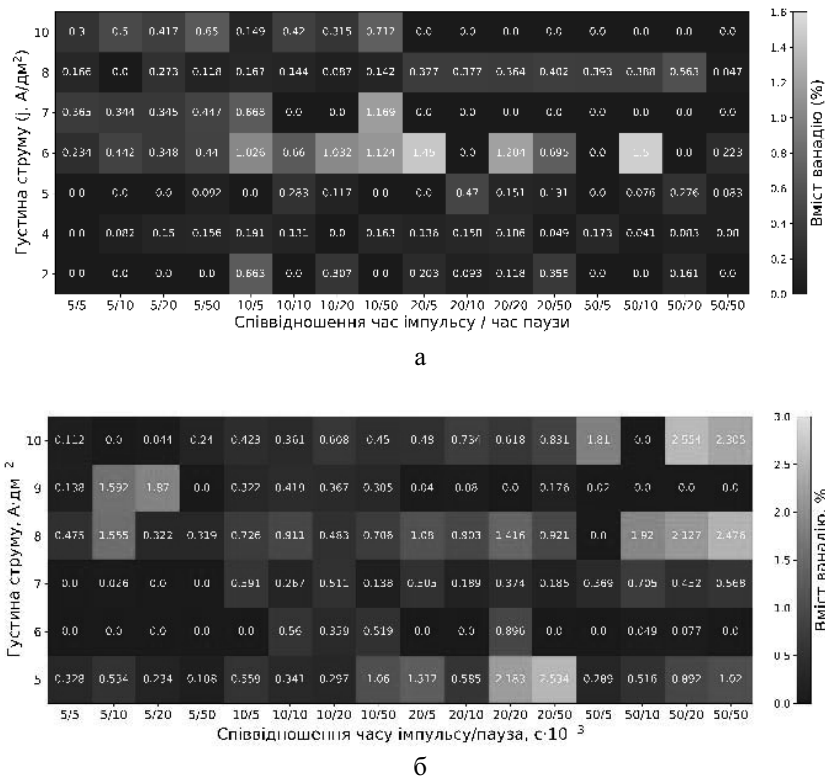


Рисунок 4 – Залежність вмісту ванадію у покритті Co-V від густини струму (імпульсний режим) для електроліту, що містить: V₂O₅ (а) та VOSO₄ (б)

Застосування імпульсного режиму електролізу дозволяє отримувати покриття з більшим вмістом ванадію в порівнянні з вмістом ванадію у покриттях, отриманих за допомогою стаціонарного режиму електролізу [12]. Цей факт вказує на додаткове хімічне відновлення в період паузи ванадію з ванадил-аніонів, адсорбованими атомами водню, які утворилися в електрохімічному процесі протягом періоду імпульсу [4].

Враховуючи швидкості електрохімічних (k_s) та хімічних (k_f) реакцій, іонний добуток води (k_w), утворення адсорбованих атомів ($)_{ads}$ або атомів кристалічної решітки ($)_{cr}$, перебіг часткових реакцій **a** та **b** під час осадження кобальт-ванадієвого покриття з отриманого електроліту можна представити схемою (рис. 5):

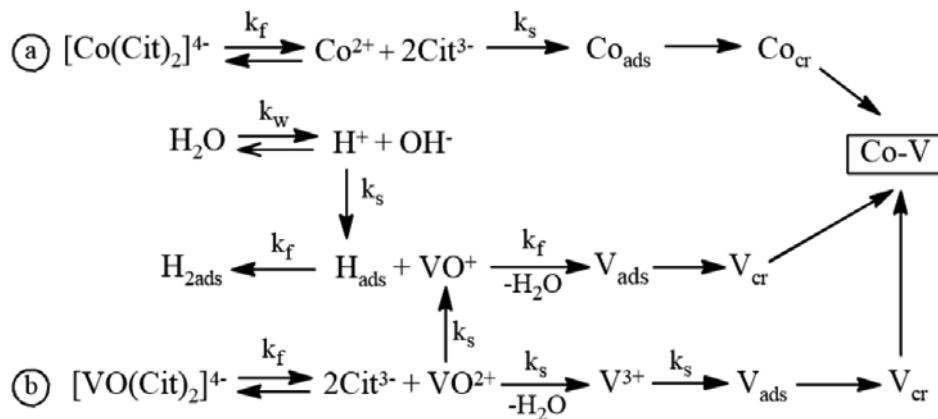


Рисунок 5 – Схема перебігу парціальних реакцій під час осадження кобальт-ванадієвого покриття

Важливо зазначити, що протягом періоду імпульсу відбувається електрохімічне відновлення іонів кобальту, водню та оксованадію (IV) VO^{2+} . Іони VO^{2+} можуть бути відновлені до тривалентного ванадію у формі катіона V^{3+} або оксокатіону VO^+ . Протягом періоду паузи VO^+ додатково хімічно відновлюється адсорбованими атомами водню, які утворилися в електрохімічному процесі протягом попереднього періоду імпульсу [4].

Таким чином, використання ванадил сульфату дозволяє отримувати покриття з вмістом ванадію в рази більше ніж при використанні оксиду ванадію при реалізації як стаціонарного так і імпульсного режимів електролізу (табл. 1). Ванадил сульфат можна рекомендувати для приготування електролітів для нанесення ванадійвмісних покриттів.

Таблиця 1 – Вміст ванадію у покриттях кобальт-ванадій

Сполука	Вміст ванадію, мас.%	
	Стаціонарний режим	Імпульсний режим
V_2O_5	0,1–0,17	0,7–1,5
VO_2	0,2–1,0	1,3–2,6

Список літератури

1. Вєдь М. В. Каталітичні та захисні покриття сплавами і складними оксидами: електрохімічний синтез, прогнозування властивостей: монографія / М. В. Вєдь, М. Д. Сахненко – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 272 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1443>
2. Nenastina T.O., Sakhnenko M.D., Proskurina V.O., Buhaievskiy S.O. Technological parameters of galvanic processes of formation of cobalt-based metal oxide composites // Journal of Chemistry and Technologies, 2023, 31(2), 224-230. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i2.275741>
3. Gamburg Yu. D, Zangari G. Theory and practice of metal electrodeposition. – New York: Springer, 2011. – 378 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9669-5>
4. Sakhnenko M.D., Zhelavska Yu.A., Ziubanov S.I. Horokhivska N.V., S.I. Rudneva S.I. Cobalt-vanadium coating deposition via programmed electrolysis mode // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2024. – Vol. 3. – P. 165–170. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-165-170>
5. Bongyoung Y., Schwartz M., Nobe K. Aqueous electrodeposition of iron group–vanadium binary alloys // Electrochimica Acta. – 2005. – Vol. 50 (22). – P. 4335-4343. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.01.047>
6. Livage J. Synthesis of polyoxovanadates via “chimie douce” // Coordination Chemistry Reviews. – 1998. – Vol. 178–180, P. 2. – P. 999-1018. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(98\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(98)00105-2)
7. Lica, V. Study of the Structure and Mechanism of Formation through Self-Assembly of Mesostructured

Kрім того, застосування імпульсного режиму електролізу, де короткі імпульси з високою густиною струму чергуються з паузами, що дозволяє іонам металу відновлюватися, але не встигати утворювати дендрити, також полегшує осадження елементів (як ванадій), що важко осаджуються.

Імпульси сприяють формуванню дрібнокристалічних, щільних та однорідних покриттів, знижуючи пористість та внутрішні напруження, покращується якість поверхні, адгезія до підкладки, а також мікротвердість та зносостійкість покриттів, що особливо важливо для сплавів, де ванадій часто є зміцнюючим елементом.

Висновки. Досліджено вплив іонних форм сплавотвірних компонентів в розчині на склад покриттів кобальт-ванадій.

Електроліт, що містить ванадил сульфат, легший при приготуванні та стабільніший при експлуатації, дозволяє отримувати покриття кобальт-ванадій з більшим вмістом ванадію ніж електроліт з оксидом ванадію при аналогічних умовах електролізу.

Доведено, що використання ванадил сульфату сумісно з імпульсним режимом електролізу дозволяє осаджувати покриття кобальт-ванадій з найбільшим вмістом ванадію (> 2.5 мас.%).

Vanadium Oxide / V. Lica, J. M. Hook // Chem. Mater. – 1997. – Vol. 9, Iss. 12. – P. 2731–2744. <https://doi.org/10.1021/cm960641m>

8. Bairachniy B., Zhelavska Yu., Smirnova O., Pilipenko A., Finohenov O. Study of electrocatalytic activity of the vanadium-containing materials for the hydrogen evolution reaction. Materials Today: Proceedings .Vol. 50, Part 4, 2022, Pages 448-451 0,5 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.289>

9. Колеснік К.В., Мисов О.П., Калашніков С.Г. Рівноважні процеси утворення поліванадатів. Рівновага у системі $V_2O_5-H_2O-H_2C_2O_4$. // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2013. – № 4. – С. 119-123. <https://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2013/5/Kolesnik.pdf>

10. Ling Y., Wa-Ting J., Zhao-Hui Zh. Synthesis, spectral and structural characterization of vanadium lactate, malate and citrate with large counter cation // Journal of Molecular Structure. – 2020. – Vol. 1207. – 127805. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127805>

11. Sakhnenko M.D., Zhelavska Yu.A., Proskurina V.O., Yermolenko I.Yu., Korohodska A.M. Vanadium-containing coatings: functional properties // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2025. –No. 6 – pp. 57-62. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2025-163-6-57-62>

12. Sakhnenko M.D., Zhelavska Yu.A., Proskurina V.O., Dzheniuk A.V., Rudneva S.I. Functional cobalt-vanadium coatings deposition via programmed

electrolysis mode // Functional Materials, 32, No.1 (2025), p. 63-66 <https://doi.org/10.15407/fm32.01.63>

References (transliterated)

1. Ved M. V. Katalitychni ta zakhysni pokryttia splavamy i skladnymy oksydamy: elektrokhimichniy syntez, prohnozuvannya vlastyvoستي [Catalytic and protective coatings with alloys and complex oxides: electrochemical synthesis, property prediction]: monograph / M. V. Ved, M. D. Sakhnenko – Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. – 272 p. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1443>

2. Nenastina T.O., Sakhnenko M.D., Proskurina V.O., Buhaievskiy S.O. Technological parameters of galvanic processes of formation of cobalt-based metal oxide composites // Journal of Chemistry and Technologies, 2023, 31(2), 224-230. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i2.275741>

3. Gamburg Yu. D, Zangari G. Theory and practice of metal electrodeposition. – New York: Springer, 2011. – 378 p. <https://doi:10.1007/978-1-4419-9669-5>

4. Sakhnenko M.D., Zhelavska Yu.A., Ziubanov S.I. Horokhivska N.V., S.I. Rudneva S.I. Cobalt-vanadium coating deposition via programmed electrolysis mode // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2024. – Vol. 3. –P. 165–170. <https://doi:10.32434/0321-4095-2024-154-3-165-170>

5. Bongyoung Y., Schwartz M., Nobe K. Aqueous electrodeposition of iron group–vanadium binary alloys // Electrochimica Acta. – 2005. – Vol. 50 (22). – P. 4335-4343. <https://doi:10.1016/j.electacta.2005.01.047>

6. Livage J. Synthesis of polyoxovanadates via “chimie douce” // Coordination Chemistry Reviews. –

1998. – Vol. 178–180, P. 2. – P. 999-1018. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(98\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(98)00105-2)

7. Lica, V. Study of the Structure and Mechanism of Formation through Self-Assembly of Mesostructured Vanadium Oxide / V. Lica, J. M. Hook // Chem. Mater. – 1997. – Vol. 9, Iss. 12. – P. 2731–2744. <https://doi.org/10.1021/cm960641m>

8. Bairachniy B., Zhelavska Yu., Smirnova O., Pilipenko A., Finohenov O. Study of electrocatalytic activity of the vanadium-containing materials for the hydrogen evolution reaction. Materials Today: Proceedings.Vol. 50, Part 4, 2022, Pages 448-451 0,5 2022. <https://doi:10.1016/j.matpr.2021.11.289>

9. Kolesnik K.V., Mysov O.P, Kalashnikov S.H. Rivnovazhni protsesy utvorennia polivanadativ. Rivnovaha u systemi V₂O₅-H₂O-H₂C₂O₄ [Equilibrium processes of polyvanadate formation. Equilibrium in the V₂O₅-H₂O-H₂C₂O₄ system] // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2013. – № 4. – P. 119-123. <https://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2013/5/Kolesnik.pdf>

10. Ling Y., Wa-Ting J., Zhao-Hui Zh. Synthesis, spectral and structural characterization of vanadium lactate, malate and citrate with large counter cation // Journal of Molecular Structure. – 2020. – Vol. 1207. – 127805. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127805>

11. Sakhnenko M.D., Zhelavska Yu.A., Proskurina V.O., Yermolenko I.Yu., Korohodska A.M. Vanadium-containing coatings: functional properties // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2025. –No. 6 – pp. 57-62. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2025-163-6-57-62>

12 Sakhnenko M.D., Zhelavska Yu.A., Proskurina V.O., Dzheniuk A.V., Rudneva S.I. Functional cobalt-vanadium coatings deposition via programmed electrolysis mode // Functional Materials, 32, No.1 (2025), p. 63-66 <http://dx.doi.org/10.15407/fm32.01.63>

Відомості про авторів / About the Authors

Сахненко Микола Дмитрович (Sakhnenko Mykola) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: [0000-0002-5525-9525](https://orcid.org/0000-0002-5525-9525); E-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua

Желавська Юлія Анатоліївна (Zhelavska Yulia) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: [0009-0004-5741-5669](https://orcid.org/0009-0004-5741-5669), E-mail: juliazhelavska@gmail.com

Єрмоленко Ірина Юріївна (Yermolenko Iryna) – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри фізичної хімії «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; Україна, ORCID: [0000-0002-5496-9621](https://orcid.org/0000-0002-5496-9621), E-mail: Iryna.Yermolenko@khp.edu.ua

Руднева Світлана Іванівна (Rudnyeva Svitlana) – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: [0000-0003-4215-4190](https://orcid.org/0000-0003-4215-4190); e-mail: Svitlana.Rudnyeva@khp.edu.ua

Поспелов Олександр Петрович (Pospelov Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: [0000-0002-1534-2180](https://orcid.org/0000-0002-1534-2180), E-mail: Oleksandr.Pospelov@khp.edu.ua

Дата надходження статті: 18.02.26 р.

Дата прийняття до друку: 20.03.26 р.