

UDC 544.654.2

ELECTROREDUCTION OF COBALT (II) AQUA COMPLEXES IN THE PRESENCE OF ACRYLIC ACID

Larissa V. Borshcheych, Viktor F. Vargalyuk, Timur O. But, Nadiia V. Stets, Kateryna A. Plyasovskaya*

Oles Honchar Dnipro National University, 72, Sciences Ave., Dnipro 49010, Ukraine

Received 12 November 2024; accepted 2 December 2024; available online 25 January 2025

Abstract

The material presented in this article is a logical continuation of the study of the peculiarities of the electroreduction process of complex compounds of 3d-metals. One of the 3d-metals that has recently been widely used in engineering is cobalt. Cobalt coatings have unique physical, mechanical and physico-chemical properties. They are produced from electrolytes of various compositions. Buffer mixtures are widely used to improve the quality of cobalt coatings. This is due to the fact that hydrogen is released during the electroreduction reaction of cobalt cations. In this work, the kinetics of the electroreduction of Co^{2+} aqua complexes from perchlorate solutions was investigated. The results of chronovoltametric measurements were analysed in conjunction with quantum chemical modelling of the possible mechanisms of the cathodic process. It is shown that at potentials below -1.0 V relative to the chloride-silver reference electrode, the reaction $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + 2\bar{e} = \text{Co} + 6\text{H}_2\text{O}$ is not only accompanied by the reaction $2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = 2\text{OH}^- + \text{H}_2$. There is also a more electropositive process of hydrogen release due to the electroreduction of intraspherical water molecules polarised by the central atom: $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + \bar{e} = [\text{Co}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^+ + \frac{1}{2}\text{H}_2$. Acrylic acid has been successfully used to suppress this type of reaction during nickel electroplating. It was of interest to investigate the effect of acrylic acid on the cathodic water reduction processes in cobalt electrolytes. To this end, appropriate kinetic measurements were carried out. Quantum chemical calculations have shown that all possible stages of the electroreduction process of cobalt acrylate complexes are accompanied by a decrease in energy and are therefore energetically most favourable. Based on the results obtained, it is proposed to use monosubstituted acrylate complexes instead of homogeneous cobalt aqua complexes to inhibit even a slight hydroxide formation. Shiny homogeneous metallic cobalt films were obtained from acrylate electrolytes in the range of operating current densities from 2 to 8 mA/cm².

Keywords: complex compounds; electroreduction of cobalt(II); acrylate electrolytes.

ЕЛЕКТРОВІДНОВЛЕННЯ АКВАКОМПЛЕКСІВ КОБАЛЬТУ (II) В ПРИСУТНОСТІ АКРИЛОВОЇ КИСЛОТИ

Лариса В. Борщевич, Віктор Ф. Варгалюк, Тімур О. Бут, Надія В. Стець, Катерина А. Плясовська

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна

Анотація

Представлена стаття є логічним продовженням досліджень особливостей процесу електровідновлення комплексних сполук 3d-металів. У роботі досліджено кінетику електровідновлення аквакомплексів Co^{2+} з перхлоратних розчинів. На основі аналізу хроновольтамперометричних вимірювань у сукупності з квантово-хімічним моделюванням ймовірних механізмів катодного процесу показано, що реакція $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + 2\bar{e} = \text{Co} + 6\text{H}_2\text{O}$ супроводжується не лише реакцією $2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ за потенціалів негативніше -1.0 В, а й більш електропозитивним процесом виділення водню за рахунок електровідновлення поляризованих центральним атомом внутрішньосферних молекул води $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + \bar{e} = [\text{Co}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^+ + \frac{1}{2}\text{H}_2$. Для гальмування гідроксидоутворення пропонується використовувати замість однорідних аквакомплексів кобальту монозаміщені акрилатні. Було встановлено, що введення акрилат-йону у внутрішню координаційну сферу аквакомплексу кобальту(II) приводить до того, що весь негативний заряд, який послідовно вводиться у комплекс зосереджується тільки на атомі металу. З акрилатних електролітів в інтервалі робочих густин струму від 2 до 8 мА/см² виділяються блискучі однорідні плівки металевого кобальту.

Ключові слова: комплексні сполуки; електровідновлення кобальту(II); акрилатні електроліти.

*Corresponding author: e-mail: pea041975@gmail.com

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University;

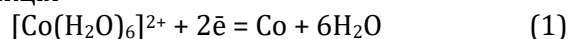
doi: 10.15421/jchemtech.v32i4.316572

Вступ

Кобальтові покриття широко використовуються в техніці завдяки наявності у них унікальних фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей [1; 2]. Зокрема, це висока корозійна та механічна стійкість навіть в сірковмісному середовищі [3–5], значна відбивна здатність, потужний феромагнетизм [6; 7]. Останнє обумовлює використання нанодисперсій кобальту в пристроях для магнітного запису інформації. Очевидно, що в даному випадку якість матеріалу має вирішальне значення.

Кобальтові покриття отримують із різних електролітів – сульфатнокислих [3–5], хлоридних [8], аміачнохлоридних [9; 10], метилсульфонатних [11] тощо.

Особливістю процесу електрохімічного виділення кобальту з водних розчинів є те, що реакція

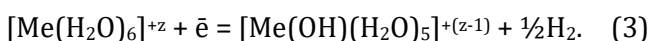


супроводжується виділенням водню і, відповідно, – підлюговуванням приелектродного шару електроліту. Тому, навіть у буферованих розчинах на поверхні негативного електрода утворюється нерозчинний гідроксид $\text{Co}(\text{OH})_2$, який у деякій кількості може вrostати в катодний осад, суттєво змінюючи його властивості. Для покращення якості кобальтових плівок активно використовувались добавки деяких органічних речовин тетраетиламоній броміду [12], бензолсульфонової кислоти, тетрабутиламоній броміду та бутиндіолу [13–16] тощо.

Реакцію виділення водню



прийнято вважати паралельною до основного процесу осадження електронегативного металу [17]. Однак, в роботах [18] було показано, що більш енергетично вигідним є процес електровідновлення молекул води, поляризованих центральним атомом у внутрішній координаційній сфері аквакомплексів 3d-металів:



В такому випадку ефективним способом гальмування реакції виділення водню може бути введення до складу реагуючого комплексу лігандів-інгібіторів. Одним з таких лігандів, застосованих для поліпшення характеристик процесу виділення нікелю [19; 20], є аніон акрилової кислоти.

Представляло інтерес дослідити вплив акрилової кислоти на електроосадження кобальту з водних розчинів. Для цього були проведені відповідні кінетичні вимірювання та квантово-хімічне моделювання вірогідних механізмів електродного процесу.

Методика експерименту

Для дослідження електрохімічних властивостей комплексів Co^{2+} з різним складом внутрішньої координаційної сфери у якості вихідного ми використовували розчин кобальт(II) перхлорату, що містить тільки аквакомплекс $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. Синтез $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$ здійснювали в дві стадії. На першій азотнокислу сіль $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ марки «хч» переводили у нерозчинний карбонат дією розчину NaHCO_3 марки «хч». На другій – ретельно промитий свіжеосаджений CoCO_3 розчиняли в HClO_4 марки «хч» до рівня $\text{pH} = 2,0$. Величина pH контролювалась йонметром EB-74, каліброваним за допомогою стандартних буферних розчинів.

Розведенням концентрованого розчину готували робочий електроліт з заданим рівнем концентрації $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$. Контроль концентрації $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$ здійснювали спектрофотометрично (СФ 46) за $\lambda = 510$ нм, яка відповідала максимуму поглинання.

Акрилова кислота мала кваліфікацію «ч.д.а.».

Поляризаційні вимірювання проводили за допомогою потенціостата ПІ-50-1 з використанням триелектродної комірки. Електродом порівняння слугував насичений хлоридносрібний напівелемент. Допоміжний електрод – платиновий. Реєстрацію i, E -залежностей здійснювали через USB-осцилограф, підключений до комп'ютера Pentium Celeron. Усі потенціали на рисунках наведені відносно хлоридносрібного напівелементу.

Робочий електрод представляв собою платинову пластинку ($S = 0,6$ см²), впаяну у скло, на яку перед відповідними дослідженнями наносили шляхом електрохімічного осадження плівки міді, або кобальту.

Для оцінки потенційних технологічних характеристик електролітів була використана комірка Хулла, робочим об'ємом 270 мл, у якій катод знаходився під кутом 50° до бокової стінки. Оцінку розподілу густини струму по довжині катода здійснювали згідно з [25]. В

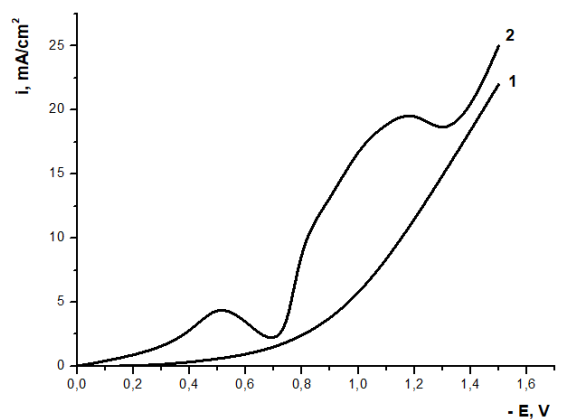
усіх дослідів підтримували температуру 20 ± 1 °С.

Квантово-хімічні розрахунки виконувались за методикою, детально описаною в [21].

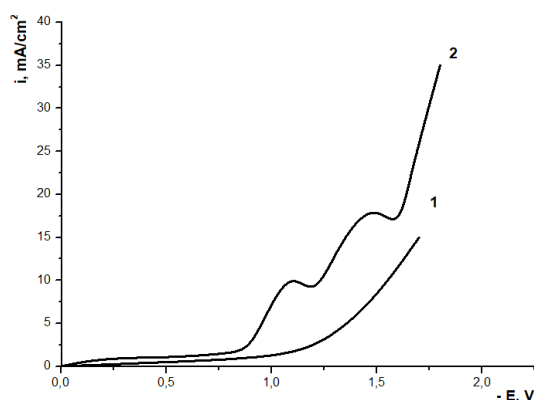
Результати дослідження та їх обговорення

На рисунках 1 *a*, *b* і *c* представлені i, E -залежності, виміряні у розчині $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$ на

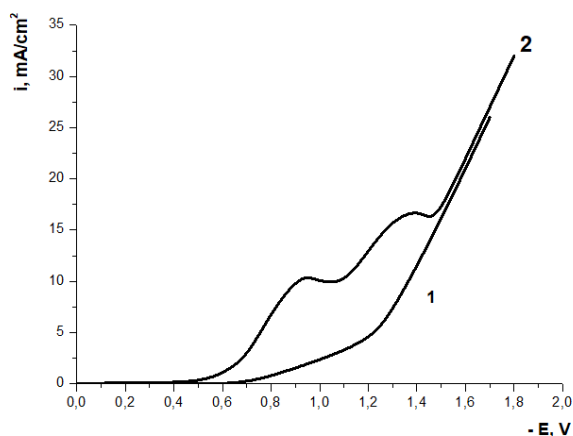
різних робочих електродах. Як видно з цих рисунків, незалежно від природи матеріалу катода поляризаційні криві характеризуються наявністю двох хвиль, після яких фіксується стрімке зростання струму, пов'язане з досягненням перенапруги реакції виділення водню. Про це свідчать поляризаційні залежності, виміряні у фоновому електроліті (1М NaClO_4): криві №1 рисунків 1 *a*, *b* і *c*.



a



b



c

Fig. 1. Potentiodynamic ($v=100$ mV/s) i, E -dependencies measured at pH = 2 in a solution of 1M NaClO_4 (№1) and 0.1 M $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$, 1M NaClO_4 (№2) on different electrodes:

a - platinum; b - copper; c - cobalt

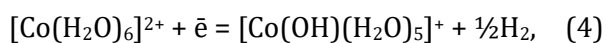
Рис. 1. Потенціодинамічні ($v=100$ mV/s) i, E -залежності, виміряні за pH = 2 в розчині 1M NaClO_4 (№1) та 0.1 M $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$, 1M NaClO_4 (№2) на різних електродах:

a - платина; b - мідь; c - кобальт

Оскільки крім молекул води в робочому розчині 0.1 М $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$, 1М NaClO_4 потенційно катодно активними частинками є лише аквакомплекси $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, то саме вони можуть приймати участь у двох різних електродних реакціях, що відповідають двом зареєстрованим хвилям на i, E -кривих.

Вочевидь, крім електровідновлення катіонів Co^{2+} до атомарного стану, відчувається також і електровідновлення молекул води за механізмом, описаним в [18; 19] і притаманним для процесів розряду інших катіонів 3d-металів [20; 21].

Таким чином, можна припустити, що в області потенціалів до $-1,0$ В перебігає реакція



а за більш негативних потенціалів – реакція (1).

Оскільки реакція (4) може гальмуватись на стадії розпаду інтермедіата



ми виміряли поляризаційні залежності за різних швидкостей сканування потенціалу (v , мВ/с) та визначили критерій Семерано [22]. На рис. 2 представлена у білогарифмічних координатах залежність струму піку першої хвилі на i, E -кривій від величини v . Найдене з цієї залежності значення критерію Семерано становить $x = \Delta \lg i / \Delta \lg v = 0.19$, що суттєво менше 0.5 і, тим самим, однозначно вказує на наявність кінетичних обмежень катодного процесу на цій ділянці поляризаційної кривої. Це, певною мірою, підтверджує припущення про природу електродних реакцій (1) і (4), які позиціонуються нами з відповідними хвилями на i, E -кривій.

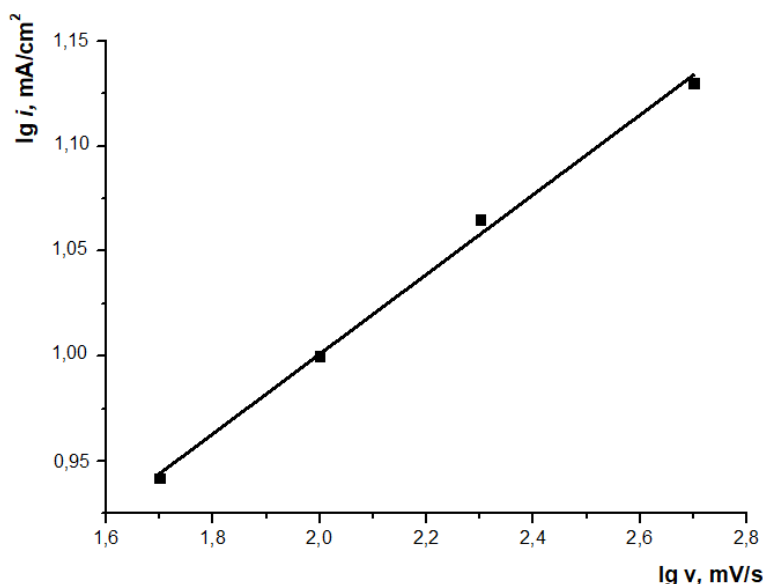


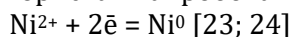
Fig. 2. Logarithmic i, v -dependence obtained for the first wave of the i, E -curve.

Electrolyte: 0.1M $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$, 1M NaClO_4 , pH=2. Electrode: copper

Рис. 2. Логарифмічна i, v -залежність, отримана для першої хвилі i, E -кривої.

Електроліт: 0.1М $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$, 1М NaClO_4 , pH=2. Електрод – мідь

Виходячи з того, що реакція (4) є край небажаною в технологіях електролітичного виділення металевго кобальту, для її гальмування ми зважили за доцільне використати апробований нами в реакції



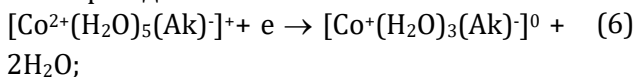
інгібітор – акрилову кислоту (HAc).

Проведені квантово-хімічні розрахунки підтвердили можливість ефективного застосування аніонів акрилової кислоти (Ak⁻) для процесу $\text{Co}^{2+} + 2\bar{e} = \text{Co}^0$.

Було встановлено, що введення акрилат-йону у внутрішню координаційну сферу

аквакомплексу кобальту(II) приводить до того, що весь негативний заряд, який послідовно вводиться в комплекс, зосереджується тільки на атомі металу (табл. 1).

Виходячи із отриманих нами енергетичних характеристик монозаміщених аквакомплексів кобальту були розраховані енергетичні ефекти можливих стадій їх електровідновлення:



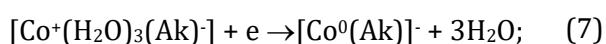
Results of quantum chemical modeling of cobalt acrylate complexes

Таблиця 1

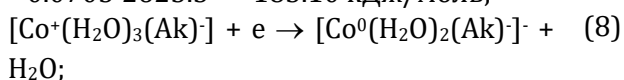
Результати квантово-хімічного моделювання акрилатних комплексів кобальту

Частинка	E _e , Хартрі	Заряди на структурних одиницях, e						Ak
		Co	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	
[Co ²⁺ (H ₂ O) ₅ (Ak) ⁻]	-793.6515	1.607	0.031	0.006	0.001	0.032	0.04	-0.718
[Co ⁺ (H ₂ O) ₃ (Ak) ⁻]	-640.9051	0.749	0.072	-0.15	-0.006			-0.799
[Co ⁰ (H ₂ O) ₂ (Ak) ⁻]	-564.5214	-0.166	0.005	-0.011				-0.830
[Co ⁰ (Ak) ⁻]	-411.7450	-0.178						-0.823

$$\Delta E_e = -640.9051 - (2 \cdot 76.4102) + 793.6515 = -793.7255 + 793.6515 = -0.074 \cdot 2625.5 = -194.3 \text{ кДж/моль};$$



$$\Delta E_e = -411.745 - (3 \cdot 76.4102) + 640.9051 = -0.0705 \cdot 2625.5 = -185.10 \text{ кДж/моль};$$



$$\Delta E_e = -564.5214 - 76.4102 + 640.9051 = -640.9316 + 640.9051 = -0.0265 \cdot 2625.5 = -63.6 \text{ кДж/моль}.$$

Як видно, всі можливі стадії процесу електровідновлення акрилатних комплексів кобальту супроводжуються зменшенням енергії, а отже, є енергетично вигідними.

В результаті заміни реакції (4) реакцією (6) на поляризаційній залежності, виміряній в акрилатному електроліті, фіксується одна хвиля (рис. 3). Це дає можливість рекомендувати акрилову кислоту до практичного застосування в технології електролітичного виділення кобальтових плівок.

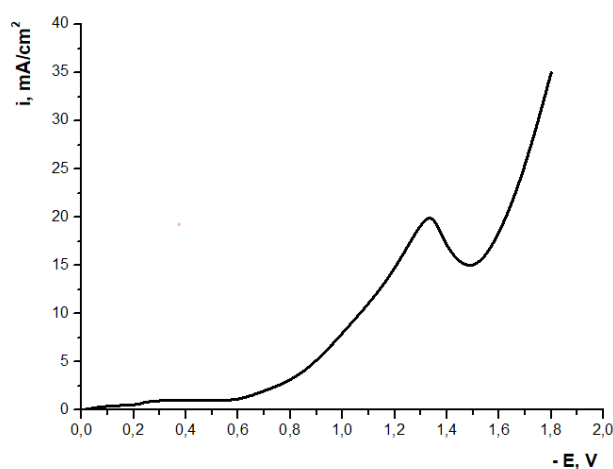


Fig. 3. Potentiodynamic ($v = 100 \text{ mV/s}$) i - E -dependence measured at $\text{pH} = 2$ in a solution of $0.1 \text{ M Co}(\text{ClO}_4)_2$, 0.1 M HAc , 1 M NaClO_4 on a copper electrode

Рис. 3. Потенціодинамічна ($v=100 \text{ mV/s}$) i - E -залежність, виміряна за $\text{pH} = 2$ в розчині $0.1 \text{ M Co}(\text{ClO}_4)_2$, 0.1 M HAc , 1 M NaClO_4 на мідному електроді

З метою визначення деяких технічних характеристик акрилатного електроліту кобальтування, електроосадження кобальту з нього проводили у комірці Хулла. В таблиці 2 наведені результати цих дослідів.

Як видно з табл. 2, за умови використання електроліту без акрилової кислоти на поверхні мідного катоду за низьких густин струму спостерігається утворення гідроксиду кобальту. Під час збільшення густини струму

до 25 mA/cm^2 виділяється лише чорний осад суміші оксиду CoO з металевим кобальтом.

В акрилатному електроліті в інтервалі густин струму $2\text{--}8 \text{ mA/cm}^2$ осаджується блискуче рівномірне кобальтове покриття. Збільшення густини струму приводить до погіршення якості кобальтової плівки внаслідок того, що досягається потенціал відновлення молекул води і, як наслідок, – підлучення приелектродного шару електроліту.

Cobalt coatings obtained in a Hull cell from perchlorate electrolyte (I = 150 mA)

Таблиця 2

Кобальтові покриття, отримані в комірці Хулла з перхлоратного електроліту (I = 150 mA)

№	Склад електроліту, моль/л	Розподілення густини струму по довжині зразка, мА/см ²									
		24.1	15.8	12.1	11.2	9.7	8.0	7.2	5.7	4.3	2.2
1	0.1 M Co(ClO ₄) ₂ , 1 M NaClO ₄ , pH = 2,0										
2	0.1 M Co(ClO ₄) ₂ , 1 M NaClO ₄ , 0.1 M AK, pH = 2.0										

*Примітка:

Чорне – чорний поруватий осад;

Штрих діагональ – темний матовий осад;

Пунктир – світлий матовий осад;

Біле – однорідний блискучий осад.

Висновок

Показано, що реакція $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + 2\bar{e} = \text{Co} + 6\text{H}_2\text{O}$ супроводжується не лише реакцією $2\text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} = 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ за потенціалів, негативніше $-1,0$ В, а й більш електропозитивним процесом виділення водню за рахунок електровідновлення поляризованих центральним атомом внутрішньосферних молекул води $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + \bar{e} = [\text{Co}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^+ + \frac{1}{2}\text{H}_2$.

Для гальмування гідроксидоутворення пропонується використовувати замість

однорідних аквакомплексів кобальту монозаміщені акрилатні. Було встановлено, що введення акрилат-йону у внутрішню координаційну сферу аквакомплексу кобальту(II) приводить до того, що весь негативний заряд, який послідовно вводиться у комплекс зосереджується тільки на атомі металу. Встановлено, що з акрилатного електроліту в інтервалі робочих густин струму від 2 до 8 мА/см² виділяються блискучі однорідні плівки металевого кобальту.

References

- [1] Shpetnyi, I.O., Kondrakhova, D.M., Vorobiov, S.I., Scheibe, B., Grebinaha, V.I., Derecha, D.O., Gorobets, Yu.I., Protsenko, I.Yu. (2019). The structural-phase state and magnetoresistive properties of thin film alloys obtained by co-evaporated Cu and Co. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 474(15), 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.013>.
- [2] Nenastina, T. O., Vozd, M. V., Sakhnenko, M. D., Proskurina, V. O. (2020). [Electrocatalytic oxidation of ethanol in alkaline medium on cobalt alloy-based composite coatings]. *Questions of chemistry and chemical engineering*, 4, 106–114 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-131-4-106-114>.
- [3] Patnaik, P., Padhy, S. K., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N., Paramguru, R. K. (2015). Electrodeposition of cobalt from aqueous sulphate solutions in the presence of tetra ethyl ammonium bromide. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25, 2047–2053. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63814-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63814-6).
- [4] Kafumbila, K. (2023). *Design of Cobalt electrowinning unit operation*. Project metallurgist. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32666.00968>.
- [5] Siswoyo, S., Istimahillah, M., Yudi, A. S. (2023). Electrodeposition of Cobalt on the Carbon Surface from Cobalt Sulfate Solution by Cyclic and Linear Voltammetry in Developing Selective Electrodes for Phosphate Ion. *Proceedings of the 4th International Seminar on Science and Technology. Series Advances in Physics Research*, 183–191. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-228-6_21.
- [6] Yundan, Yu., Zhenlun, S., Hongliang, Ge, Guoying W., Li, J. (2015). Effects of magnetic fields on the electrodeposition process of cobalt. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 10, 4812–4819. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)06667-1](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)06667-1).
- [7] Pan, B., Zhang, Q., Liu, Z., Yang Ya. (2019). Influence of butynediol and tetrabutylammonium bromide on the morphology and structure of electrodeposited cobalt in the presence of saccharin. *Materials Chemistry and Physics*, 228, 37–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.12.065>.

- [8] Subagja, R., Setiawan, I., Ahmad, R. R., Irawan, J. (2022). Effect of Technological Parameters on the Electrowinning of Cobalt from Cobalt(II) Chloride Solutions. *J. Electrochem. Sci.*, 17, 220959. <https://doi.org/10.20964/2022.09.66>.
- [9] Mendoza Huizar, L.H., Rios-Reyes, C.H., Rivera M. (2017). Electrodeposition of cobalt nanoclusters from ammonical chloride solutions onto HOPG electrodes. A kinetical and morphological study. *J. Chil. Chem. Soc.*, 62(3), 3621–3626. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-97072017000303621>.
- [10] Corona-Castro, J. A., Álvarez-Romero, G. A., Rivera, M., Rios-Reyes, C. H., Bañuelos-García, L.E., García-Sánchez, E., Mendoza Huizar, L. H. (2022). An Electrochemical study of the cobalt electrodeposition onto a carbon fiber ultramicroelectrode. *J. Chil. Chem. Soc.*, 67(2), 5500–5502. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072022000205500>.
- [11] Sknar, Yu. E., Amirulloeva, N. V., Sknar, I.V., Danylov, F.I. (2016). Influence of methylsulfonate anions on the structure of electrolytic cobalt coatings. *Materials Science*, 52(3), 396–401. <http://dx.doi.org/10.1007/s11003-016-9970-9>.
- [12] Patnaik, P., Padhy, S. K., Tripathy, B. Ch. (2015). Electrodeposition of cobalt from aqueous sulphate solutions in the presence of tetra ethyl ammonium bromide. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(6), 2047–2053. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63814-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63814-6).
- [13] Mengyun, Z., Chang, P., Chen, P., Hang, T., Li, M., Wu, Yu. (2024). Super-flat and uni-oriented cobalt film electrodeposited by modulating the crystal nucleation and growth behavior. *Applied Surface Science*, 645, 158795. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158795>.
- [14] Abishova, N. R., Gurbanova, U. M., Huseynova, R. G., Aliyev, A. Sh. (2022). Electrodeposition of cobalt from alkaline glycine electrolyte. *Azerbaijan Chemical Journal*, 2, 113–120. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2022-2-113-120>.
- [15] Juma Jamil, A. The effect of organic additives in electrodeposition of Co from deep eutectic solvents. (2021). *Arabian Journal of Chemistry*, 14(4), 103036. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103036>.
- [16] Qiushi, S., Xinyu, Du, Changlu, Sh., Hongwei, X., Zhiqiang, N. (2023). Oriented growth of cobalt electrodeposits assisted by an interfacial flow of bubbles. *Minerals Engineering*, 194, 108018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108018>.
- [17] Nusheh, M., Yoozbashizadeh, H. (2009). Study on electrowinning of cobalt by cyclic voltammetry technique. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 7(2), 45–48.
- [18] Seredyuk, V. O. (2014). [Influence of the nature of ligands on electrochemical reactions involving complexes of chromium cations]. (Candidate of Chemical Sciences dissertation), Dnipropetrovsk National University, Dnipropetrovsk, Ukraine (in Ukrainian).
- [19] Vargalyuk, V. F., Demchyshyna, O. V. (2010). [Quantum chemical analysis of electronic transitions in some Nickel complexes]. *Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series Chemistry*, 16, 183–187 (in Ukrainian).
- [20] Vargalyuk, V. F., Polonsky, V. A., Demchyshyna, O. V. (2014). The mechanism of electroreduction of aquacomplexes Nickel. Quantum-chemical analysis. *Canadian Journal of Science, Education and Culture. Series Chemistry, Biology, Medicine*, 2(6), 171–177. <http://dx.doi.org/10.13189/ujc.2015.030202>.
- [21] Vargalyuk, V. F., Borshchevych, A. O. & Borshchevych, L. V. (2017). [Quantum-chemical analysis of the electrowinning process of aqua complexes Co²⁺]. *Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series Chemistry*, 25(1), 24–30 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/081703>.
- [22] Danylov, F. I., Protsenko, V. S. (2016). [Linear and cyclic voltammetry]. (Vol. 1). Dnipro: Lira. (in Ukrainian).
- [23] Vargalyuk, V. F., Polonsky, V. A., Demchyshyna, O. V. (2015). Electrochemical Reduction of Nickel Acrylic Acid Complexes: Quantum-chemical Analysis. *Universal Journal of Chemistry*. 3(2), 55–59. <http://dx.doi.org/10.13189/ujc.2015.030202>.
- [24] Vargalyuk, V. F., Polonsky, V. A., Demchyshyna, O. V., Borshchevych, L. V. (2015). [Electrochemical properties of monosubstituted nickel aquacomplexes]. *Modern problems of electrochemistry: education, science, production*, 149–151 (in Ukrainian).
- [25] Gapon, Y. K., Slepuzhnikov, E. D., Chirkina-Kharlamova, M. A., Grytsyna, I. M., Gaponenko, Y. I. (2023). [Galvanochemical functional coatings with ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten: monograph], Kh.: FOP Panov A. M. (in Ukrainian).