Ю.С.Японцева*, Т.В.Мальцева, В.С.Кублановський

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ СПЛАВА КОБАЛЬТ–ВОЛЬФРАМ–РЕНІЙ*Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І.Вернадського НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Київ, 03142, Україна*** e-mail: juliya_yar@ukr.net*

Методами стаціонарної вольтамперометрії та хроновольтамперометрії досліджено катодні процеси осадження сплавів CoWRe при варіюванні вмісту ренію в електроліті і густини струму осадження. Встановлено, що граничні струми мають дифузійну природу і пропорційні концентрації перренат-іонів. Показано, що вихід за струмом сплавів сягає 93 % за рахунок високої перенапруги виділення водню на поверхні сплаву. За результатами досліджень каталітичних властивостей сплавів у реакції виділення водню виявлено, що при збільшенні вмісту ренію в електроліті і сплаві спостерігається зростання перенапруги виділення водню. Знайдені величини корозійного опору складають: 1–2 кОм·см⁻² у 0.01 М Н₂SO₄; 20–110 кОм·см⁻² у 2.5 % NaCl; 10–30 кОм·см⁻² у 1.0 М КОН. Оптимальна величина густини струму осадження для отримання найбільш корозійностійких сплавів дорівнює 10 мА·см⁻².

К л ю ч о в і с л о в а: сплав, кобальт, вольфрам, реній, електроосадження, опір корозії.

ВСТУП. Суперсплави, тобто сплави тугоплавких металів — вольфраму, молібдену та ренію з металами підгрупи заліза дуже важливі для сучасної техніки, оскільки мають широкий спектр цінних механічних та фізико-хімічних властивостей: високу корозійну стійкість, твердість, стійкість до тертя та зносу, жароміцність, магнітні та електрокаталітичні властивості [1, 2]. Суперсплави розглядаються як основна альтернатива електролітичному хрому, електроосадження якого проводять з токсичної ванни, що містить Cr(VI) [3].

Дослідження електроосадження сплавів Re з металами групи заліза почалося ще в 50-х роках XX століття [4] і найбільшу увагу дослідників привернуло співосадження ренію з нікелем, а електроосадженню сплавів CoRe присвячено невелику кількість робіт. У статті [5] вивчено співосадження ренію з металами групи заліза з цитратних і цитратно-гліцинатних розчинів у залежності від рН, а отже, від складу електроактивних комплексів, і висловлено припущення, що електрохімічне осадження сплавів ренію з металами групи заліза пов'язане

зі створенням на електроді поверхневих гетероядерних полілігандних комплексів і їх спільним розрядом. Авторами роботи [6] наведені дані про склад і виходи за струмом сплавів ренію з металами групи заліза, осаджених з полілігандного цитратно-сульфаматно-амонійного електроліту. Встановлено, що утворення сплаву CoRe відбувається з максимальним для даних систем виходом за струмом — 96 % і вмістом ренію до 45 % ат.

Нами було досліджено [7] електроосадження потрійного сплаву CoMoRe з кислого цитратного електроліту і виявлено можливість отримання покриттів різної морфології з різним співвідношенням молібдену і ренію в залежності від рН електроліту і умов електролізу. Ефективність полілігандного цитратно-пірофосфатного електроліту для співосадження кобальту з вольфрамом була показана нами раніше [8], а в роботі [9] вивчено умови електроосадження потрійного сплаву CoWRe та корозійну стійкість покриття в сантимольярній сірчаній кислоті. Знайдено область значень сумар-

ної концентрації вольфраму і ренію у сплаві (23–36 % ат.), для якої густина струму корозії є найменшою (до $2 \cdot 10^4$ А·см⁻²).

Метою даної роботи є дослідження катодного процесу осадження покриттів суперсплавом CoWRe методами стаціонарної вольтамперометрії та хроновольтамперометрії, вивчення впливу хімічного складу електроліту та густини струму осадження на склад та вихід за струмом сплаву, каталітичних властивостей осаджених сплавів у реакції відновлення водню, а також розрахунок показників корозії покриттів CoWRe в різних корозійних середовищах математичною обробкою анодної і катодної ділянок вольтамперограм згідно з відповідними рівняннями: логарифмічного — для коефіцієнту b рівняння Тафеля і лінійного — для корозійного опору з метою порівняння результатів з даними роботи [9].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА. Електролітичні покриття потрібного сплаву CoWRe були осажені з полілігандних цитратно-пірофосфатних електролітів, склад яких наведено у табл. 1. Умови осадження сплавів аналогічні викладеним в роботі [9]: термостатування електрохімічної комірки при температурі 50 °С, гальваностатичний режим осадження, примусова конвекція при швидкості обертання магнітної мішалки 300 об·хв⁻¹. Робочим електродом була мідна пластина площиною 0.25 см², на поверхню якої нанесений шар електролітичного кобальту, електроосаджений з кислого сульфатно-хлоридного електроліту.

Катодний процес осадження сплавів у цитратно-пірофосфатному електроліті досліджували методами стаціонарної вольтамперометрії та хроновольтамперометрії при швидкості розгортки потенціалу 1–100 мВ·см⁻¹. Вольтамперометричні вимірювання каталітичних властивостей сплавів у реакції виділення водню проводили у розчині 1.0 моль·л⁻¹ КОН у потенціостатичному режимі з інтервалом 20 мВ.

Дослідження корозії здійснювали у розчинах: 0.01 моль·л⁻¹ H₂SO₄, 3.5 % NaCl, 1.0 моль·л⁻¹ КОН при температурі 20 ± 1 °С у трьох-

Т а б л и ц я 1

Склад електролітів для осадження сплавів CoWRe (моль·л⁻¹)

Електроліт	CoSO ₄ ·7H ₂ O	Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O	KReO ₄	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ ·5.5H ₂ O	K ₄ P ₂ O ₇	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
1	0.1	0.2	0.01	0.2	0.2	0.3
2	0.1	0.2	0.03	0.2	0.2	0.3
3	0.1	0.2	0.05	0.2	0.2	0.3

електродній комірці, електродом порівняння був насичений хлорсрібний електрод. Катодні і анодні поляризаційні криві отримували зі швидкістю задавання потенціалу 1.0 мВ·с⁻¹. Для розрахунку коефіцієнту b рівняння Тафеля окремі гілки вольтамперограм моделювали за допомогою логарифмічного рівняння. Обрано ділянки, для яких описування за цим рівнянням має найменшу похибку. Коефіцієнт b обчислювали за рівнянням:

$$\Delta E = a + b \cdot \lg j. \quad (1)$$

Корозійний опір у сірчаній кислоті розраховано згідно з моделлю Стерна–Гірі [10] як відношення поляризації до прирощення густини струму на початкових від потенціалу корозії лінійних ділянках вольтамперограм для порівняння з даними роботи [9], де значення опору розраховано за програмою AVTOLAB GPES 4.7.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. На рис. 1, *a* представлені експериментальні j – E залежності для процесів електровідновлення сплаву в електролітах 1–3. При зсуві потенціалу в катодний бік спостерігається невеличка ділянка початкового гальмування, збільшення струму до одного чітко вираженого майданчику граничного струму, діапазон потенціалів існування якого зменшується, а величина збільшується при зростанні концентрації перренату ренію у розчині. Подальше збільшення струму обумовлено процесом виділення водню. Оскільки єдиним змінним параметром в умовах експерименту була концентрація ренію (VII) у розчині, можна припустити, що величина граничних струмів пов'язана саме з доставкою до поверхні перренат-іонів. Результати обчислення по-

Рис. 1. Стационарні вольт-амперні криві електроосадження сплавів CoWRe з електролітів 1–3 відповідно (а), залежність граничних струмів від концентрації перрената калію в електроліті (а, вбудований рисунок); хроновольт-амперометричні залежності при швидкості розгортки 5 (1), 10 (2), 20 (3), 50 (4), 100 (5) (б) і залежність піку струму від швидкості розгортки (б, вбудований рисунок).

казали, що граничний струм є дійсно прямо пропорційним концентрації перрената калію.

З хроновольт-амперометричних залежностей (рис. 1, б) було знайдено, що залежність піку струму від швидкості розгортки у координатах $I_p - v^{-1/2}$ — це пряма, що проходить через початок координат, а залежність потенціалу піку в координатах $E - \lg v$ є прямолінійною. Така форма залежностей свідчить про те, що граничні струми контролюються дифузією [11].

У табл. 2 наведені одержані показники електролітичного осадження покриттів сплавами CoWRe, зокрема, хімічний склад (вміст в атомних процентах) та вихід за струмом корозійностійких компонентів сплавів вольфраму і ренію, а також сплаву в цілому. У порівнянні з подвійним сплавом CoW, що був осаджений з аналогічного цитратно-пірофосфатного електроліту [8], де вміст вольфраму при зміні робочої густини струму є практично постійним — 20–22 % ат., у разі електроосадження потрібного сплаву кількість вольфраму в ньому приблизно в 2 рази менше — 3–11 % ат. Значна зміна хімічного складу покриттів при збільшенні густини струму осадження спостерігається в діапазоні 5.0–20.0 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, при подальшому підвищенні цієї величини він залишається майже незмінним.

Виходячи із прийнятого дослідниками механізму індукованого сумісного осадження подвійного сплаву NiW [12] і з того, що нікель і кобальт є аналогами, можна припустити, що оса-

Таблиця 2

Вміст компонентів W, Re та вихід за струмом B_c електролітичних покриттів сплавом CoWRe

$j, \text{ mA cm}^{-2}$	Вміст компонентів, % ат.		$B_c, \%$		B_c (CoWRe), %
	W	Re	W	Re	
Електроліт 1					
5	8.88	12.7	13.9	23.4	78.4
10	6.26	17.7	10.3	33.8	85.7
20	6.32	27.0	7.4	36.6	69.7
30	7.08	27.6	6.9	31.3	59.2
Електроліт 2					
5	8.93	16.3	12.9	25.4	76.2
10	5.93	22.5	9.1	40.1	85.5
20	3.44	34.1	4.2	48.9	78.8
30	3.44	35.1	3.9	46.2	73.1
Електроліт 3					
5	11.24	21.6	12.5	28.0	70.4
10	9.30	26.5	11.2	42.2	79.2
20	4.92	36.2	6.9	59.1	91.1
30	3.44	38.5	4.9	64.9	92.9

дження кобальту з вольфрамом є результатом розряду біметалевих цитратних комплексів складу $[(Co)(WO_4)(H)(Cit)]^{2-}$. Відомо, що реній не утворює самостійних комплексів з цитратом. Відновлення ренію можливе з перренат-іону, але за відсутності металів групи заліза він осаджується тільки у вигляді поліоксидів різного ступеня окиснення. При електроосадженні потрібного сплаву кількість вольфраму в покритті є значно нижчою у порівнянні з аналогічним електролітом для CoW, не зважаючи на надлишок вольфрамат-іонів у розчині. Така поведінка може бути пояснена тим, що сплави вольфраму і ренію з кобальтом не виділяються як окремі фази, а конкурують один з одним за можливість створити електроактивний комплекс з кобальтом, здатний розряджати з утворенням відразу потрібного сплаву. Тому чим більше в покритті ренію, тим менше вольфраму.

Склад електроліту і густина струму мають також великий вплив на вихід за струмом ренію при осадженні в сплав, величина якого змінюється в діапазоні від 23 до 65 %. При цьому слід звернути увагу на те, що при низькій густині струму концентрація перренату калію слабо впливає на вихід за струмом (23–28 % для електролітів 1–3), але вже при густині струму $30 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ швидкість відновлення ренію значно зростає при збільшенні його концентрації у розчині. Таким чином, можна вважати, що процес осадження ренію у сплав вносить найбільший внесок у вихід за струмом сплаву в цілому.

За даними табл. 2 можна зробити висновок про те, що електроосадження потрібного сплаву CoWRe відбувається з надзвичайно високим виходом за струмом, що не є характерним для подвійних сплавів тугоплавких металів з металами підгрупи заліза, і одна з причин цього полягає у високій швидкості відновлення ренію. Проте це не єдина причина.

На рис. 2 приведені поляризаційні залежності відновлення водню у розчині КОН на катодах зі сплавів CoWRe і на катоді з покриттям чистого електролітичного кобальту, осадженого з сульфатного електроліту для порівняльної оцінки електрокаталітичної активності сплавів.

Рис. 2. Поляризаційні залежності відновлення водню у розчині КОН на катодах з кобальту (1) та сплавів CoWRe (позначки 2–4 відповідають електролітам 1–3), що осаджені при густині струму $30 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ з електролітів 1–3.

Видно, що при збільшенні концентрації перренату калію в електроліті осадження, тобто при збільшенні вмісту ренію у сплаві, спостерігається зростання перенапруги виділення водню.

Необхідно звернути увагу на те, що електроліт осадження сплавів (цитратно-пірофосфатний) та електроліт дослідження електрокаталітичної активності (КОН) є лужними розчинами, де в обох випадках на катоді відбувається виділення водню, з різницею у тому, що у розчині КОН поверхня катодного матеріалу вже сформована, а у цитратно-пірофосфатному розчині вона знаходиться в процесі формування. В обох випадках вплив хімічного складу поверхні сплаву на швидкість виділення водню буде аналогічний. Тобто сплав, який містить велику кількість ренію, збільшує перенапругу водню, в тому числі і у цитратно-пірофосфатному електроліті, таким чином зменшує швидкість побічної реакції (H_2) та надає можливість цільовій реакції відбуватися з високим виходом по току — 93 %.

На рис. 3, а з наведених вольт-амперних характеристик (ВАХ) корозії видно, що при корозії покриттів у сірчаній кислоті вигляд залежностей та потенціал корозії практично однакові, незалежно від хімічного складу сплавів.

Рис. 3. Вольт-амперні характеристики корозії сплавів (а) і тафелевські ділянки поляризаційних кривих сплаву, осадженого при густині струму 10 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ з електроліту 1 (б). Корозійне середовище (а, б): 1 — H_2SO_4 , 2 — NaCl , 3 — KOH . Електроліт (а): 1' — 1; 2' — 2; 3' — 3. Ділянки ВАХ (б): 1' — катодна, 2' — анодна.

У розчині NaCl можна побачити незначну зміну потенціалу корозії зразка, що містить найбільшу кількість ренію, однак тільки у лужному розчині відбувається зсув потенціалів у позитивний бік та зміна потенціалів ділянок пасивації при збільшенні кількості ренію у сплаві. У різних середовищах спостерігається зсув потенціалів корозії у негативний бік при збільшенні рН корозійного розчину. На рис. 3, б наведені тафелевські ділянки для сплаву, що був осаджений з електроліту 1. Коефіцієнти b рівняння Тафеля для анодних/катодних ділянок для кислого розчину складають 0.119/0.121, для роз-

Рис. 4. Залежність корозійного опору сплавів, отриманих з електролітів 1–3, від густини струму осадження в корозійних розчинах: NaCl (а), KOH (б) і корозійного опору від вмісту вольфраму і ренію (в) у розчині H_2SO_4 , розрахованого за програмою AV-TOLAB GPES 4.7 (1) і за лінійним рівнянням (2).

чину NaCl — 0.115/0.119, для лужного розчину 0.063/0.89 відповідно. Така величина тафелевського нахилу свідчить про те, що у кислому та нейтральному середовищах катодний та анодний процеси лімітуються процесом пере-

носу першого електрона, тобто на катодній ділянці — це виділення водню, а на анодній — розчинення металів з водневою деполяризацією. У лужному середовищі анодний процес ускладнюється одночасним переносом двох електронів.

На рис. 4, *а,б* представлені залежності корозійного опору покриттів від густини струму осаження для розчинів NaCl та KOH. Аналогічна залежність для сірчаної кислоти була детально описана в роботі [9]. На рис. 4, *в* наведені залежності корозійного опору від вмісту вольфраму і ренію у сплаві, розраховані за програмою AVTOLAB GPES 4.7 [9] і за лінійним рівнянням. Розбіжності між значеннями корозійного опору, розрахованого згідно з лінійним рівнянням на початковій ділянці поляризаційних залежностей і цією програмою, складають не більше 5 %. По цих залежностях можна зробити основний висновок про те, що найважливішим фактором, який здатний впливати на корозійну стійкість покриттів, є густина струму осаження, оскільки вона впливає не тільки на кількісний склад сплавів, але і на фазовий склад, структуру та морфологію поверхні. Для сплавів, що були нами отримані з трьох різних електролітів, найбільш корозійно стійким виявилось покриття, осажене при $10 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$. Раніше відмічалось [9], що при підвищенні струму осаження до $30\text{--}40 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ морфологія покриттів змінюється та стає сферолітичною. При практично постійному хімічному складі відбувається розвинення (збільшення) поверхні та погіршення якості осадів. Саме цей фактор має найбільший вплив на зниження корозійного опору.

ВИСНОВКИ. При дослідженні електроосадження сплавів CoWRe з полілігандного цитратно-пірофосфатного електроліту методами стаціонарної вольтамперометрії та хроновольтамперометрії знайдено граничні струми дифузійної природи, величина яких прямо пропорційна концентрації перренат-іонів. За результатами вольт-амперометричних вимірювань каталітичних властивостей сплавів у реакції відновлення водню встановлено, що при збільшенні вмісту ренію у сплаві зростає перенапруга виділення водню. Збільшення вмісту ре-

нію в осаді сприяє досягненню високого значення виходу за струмом сплаву (до 93 %) за рахунок високої перенапруги виділення водню на цьому матеріалі.

Знайдені величини корозійного опору складають $1\text{--}2 \text{ кОм} \cdot \text{см}^{-2}$ у $0.01 \text{ М H}_2\text{SO}_4$, $20\text{--}110 \text{ кОм} \cdot \text{см}^{-2}$ у $2.5 \% \text{ NaCl}$, $10\text{--}30 \text{ кОм} \cdot \text{см}^{-2}$ у 1.0 М KOH . Найбільший вплив на величину корозійного опору цих сплавів має густина струму осаження, і при значенні $10 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ можна отримати найбільш корозійно стійке покриття. Визначені значення коефіцієнту b рівняння Тафеля при дослідженні корозії дозволили зробити припущення про природу лімітуючої стадії процесів переносу заряду. У кислому та нейтральному середовищі катодний та анодний процеси лімітуються процесом переносу першого електрона, тобто на катодній ділянці — це виділення водню, а на анодній — розчинення металів з водневою деполяризацією. У лужному середовищі анодний процес ускладнюється одночасним переносом двох електронів.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ СПЛАВА КОБАЛЬТ–ВОЛЬФРАМ–РЕНИЙ

Ю.С.Японцева*, Т.В.Мальцева, В.С.Кублановский

*Институт общей и неорганической химии им. В.И.Вернадского НАН Украины, просп. Академика Палладина, 32/34, Киев, 03142, Украина
* e-mail: juliya_yap@ukr.net*

Методами стационарной вольтамперометрии и хроновольтамперометрии исследованы катодные процессы осаждения сплавов CoWRe при варьировании содержания рения в электролите и плотности тока осаждения. Установлено, что предельные токи имеют диффузионную природу и пропорциональны концентрации перренат-ионов. Показано, что выход по току сплавов достигает 93 % за счет высокого перенапряжения выделения водорода на поверхности сплава. По результатам исследований каталитических свойств сплавов в реакции выделения водорода обнаружено, что при увеличении содержания рения в электролите и сплаве наблюдается рост перенапряжения выделения водорода. Найденные величины коррозионного сопротивления составляют $1\text{--}2 \text{ кОм} \cdot \text{см}^{-2}$ в $0.01 \text{ М H}_2\text{SO}_4$, $20\text{--}110 \text{ кОм} \cdot \text{см}^{-2}$ в $2.5 \% \text{ NaCl}$, $10\text{--}30 \text{ кОм} \cdot \text{см}^{-2}$ в 1.0 М KOH . Оп-

тимальная величина плотности тока осаждения для получения наиболее коррозионностойких сплавов равна $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сплав, кобальт, вольфрам, рений, электроосаждение, сопротивление коррозии.

PECULIARITIES OF ELECTRODEPOSITION OF COBALT–WOLFRAM–RHENIUM ALLOY

Yu.S.Yapontseva*, T.V.Maltseva, V.S.Kublanovsky

V.I.Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, 32/34 Academic Palladin Avenue, Kyiv, 03142, Ukraine

* e-mail: juliya_yap@ukr.net

The methods of stationary voltammetry and chronovoltammetry have been used to study deposition processes of ternary CoWRe alloys at different rhenium content of the electrolyte and deposition current density. It has been found that the limiting currents have a diffusive nature and are proportional to the concentration of perrhenate ions in the electrolyte. The CoWRe alloys should be formed by the discharge of bimetallic citrate complexes of the following composition $[(\text{Co})(\text{WO}_4)(\text{H})(\text{Cit})]^{2-}$ and rhenium electrodeposition. Rhenium does not form complexes with citrate ions and deposits better in an alloy with iron group metals than in the form of an individual metal from a perrhenate solution. It can be assumed that the discharge of rhenium into the alloy occurs from a surface complex, the nature of which has not yet been established. The alloy current efficiency reaches 93% due to the high overpotential of hydrogen evolution on the alloy surface. According to the results of investigations of the catalytic properties of alloys in the hydrogen reduction reaction, it has been found that with increasing the rhenium content of the electrolyte and alloy, an increase in hydrogen overpotential is observed. Based on the Tafel coefficients found, it was found that in an acidic and neutral medium, the limiting stage of the cathodic and anodic reaction is the transfer of the first electron. In an alkaline medium, the anode process is complicated by the simultaneous transport of two electrons. The found values of corrosion resistance are $1\text{--}2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ in solutions of $0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, $20\text{--}110 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ in $2.5\% \text{ NaCl}$, $10\text{--}30 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ in 1.0 M KOH . Based on the dependence of corrosion resistance on the refractory metals content of the alloy and the electrodeposition conditions, the optimum deposition current density of $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ has been found.

К е у w o r d s: alloy, cobalt, tungsten, rhenium, electrodeposition, corrosion resistance.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tsyntsaru N., Dikuser A., Cesiulis H. et al. Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on cobalt and iron superalloys // Powder Metall Met. Ceram. -2009. -**48**. -P. 419–428.
2. Kublanovsky V.S., Yapontseva Yu.S. Electrocatalytic Properties of Molybdenum and Tungsten Alloys in the Hydrogen Evolution Reaction // Electrocatalysts for Fuel Cells and Hydrogen Evolution - Theory to Design.Ch. 5. -2018. -Intech Open. -P. 95–117.
3. Weston D., Shipway Ph., Harris S., Cheng M. Friction and sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt and cobalt–tungsten alloy coatings for replacement of electrodeposited chromium // Wear. -2009. -**267**. -P. 934–943.
4. Netherton L.E., Holt M.L. Electrodeposition of Rhenium from Aqueous Solutions // J. Electrochem. Soc. -1949. -**95**, № 324. -P. 324–328.
5. Березина С.И., Кешинер Т.Д., Шаранова Л.Г. Влияние состава комплексов элементов подсемейства железа на стимулированное катодное восстановление ренат-ионов в сплав из цитратно-глиценатных электролитов // Электрохимия. -1994. -**30**. -P. 174–179.
6. Naor A., Eliaz N., Gileadi E. Electrodeposition of Alloys of Rhenium with Iron-Group Metals from Aqueous Solutions // J. Electrochem. Soc. -2010. -**175**, № 7. -P. 422–427.
7. Yapontseva Yu.S., Kublanovsky V.S., Vyshnevskiy O.A. Electrodeposition of CoMoRe alloys from a citrate electrolyte // J. Alloys and Compounds. -2018. -**766**. -P. 894–901.
8. Yapontseva Y.S., Dikuser A.I., Kublanovskii V.S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co–W alloys electrodeposited from a citrate-pyrophosphate electrolyte // Surf. Engin. Appl. Electrochem. -2014. -**50**. -P. 330–336.
9. Yapontseva Yu., Maltseva T., Kublanovsky V. Corrosion properties of electrodeposited triple superalloy of cobalt with tungsten and rhenium. // Ukr. Chem. Journal. -2018. -**84**. -P. 70–75.
10. Расчет показателей коррозии металлов и параметров коррозионных систем. -Казань: КНИТУ, 2013.
11. Galus Z. Fundamentals of Electrochemical Analysis. -New York: Ellis Horwood, 1976.
12. Eliaz N., Gileadi E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium

with Transition Metals // Modern Aspects of Electrochemistry. -2008. -42, ed. C.Vayenas. -New York: Springer, 2008.

REFERENCES

1. Tsyntsaru N., Dikisar A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobano Zh., Sidel'nikova S., Belevskii S., Yapontseva Yu., Bersirova O., Kublanovskii V. Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on cobalt and iron superalloys. *Powder Metall Met. Ceram.* 2009. **48**: 419. DOI: 10.1007/s11106-009-9150-7.
2. Kublanovsky V.S., Yapontseva Yu.S. Electrochemical Properties of Molybdenum and Tungsten Alloys in the Hydrogen Evolution Reaction, Chapter 5. In *Electrocatalysts for Fuel Cells and Hydrogen Evolution – Theory to Design*. 2018. Intech Open: 95. DOI: 10.5772/intechopen.79058.
3. Weston D., Shipway Ph., Harris S., Cheng M. Friction and sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt and cobalt–tungsten alloy coatings for replacement of electrodeposited chromium. *Wear.* 2009. **267**: 934. DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.006.
4. Netherton L.E., Holt M.L. Electrodeposition of Rhenium from Aqueous Solutions. *J. Electrochem. Soc.* 1949. **95** (324): 324. DOI: 10.1149/1.2776763.
5. Berezina S.I., Keshner T.D., Sharapova L.G. Influence of the composition of the iron subgroup elements on the stimulated cathodic reduction of rhenate ions into alloy from citrate-glycetate electrolytes. *Elektrokhimiya*. 1994. **30**: 174. [in Russian].
6. Naor A., Eliaz N., Gileadi E. Electrodeposition of Alloys of Rhenium with Iron-Group Metals from Aqueous Solutions. *Journal of The Electrochemical Society*. 2010. **157** (7): 422. DOI: 10.1149/1.3430084.
7. Yapontseva Yu.S., Kublanovsky V.S., Vyshnevskiy O.A. Electrodeposition of CoMoRe alloys from a citrate electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. **766**: 894. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.018.
8. Yapontseva Yu.S., Dikisar A.I., Kublanovskii V.S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co–W alloys electrodeposited from a citrate-pyrophosphate electrolyte. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2014. **50**: 330. DOI: 10.3103/S1068375514040139.
9. Yapontseva Yu.S., Maltseva T.V., Kublanovsky V.S. Corrosion properties of electrodeposited triple superalloy of cobalt with tungsten and rhenium. *Ukrainian Chemistry Journal*. 2018. **84**: 70. [in Ukrainian].
10. Calculation of indicators of corrosion of metals and parameters of corrosion systems. KNITU. 2013. [in Russian].
11. Galus Z. *Fundamentals of Electrochemical Analysis*. (New York: Ellis Horwood, 1976). DOI: 10.1021/ed055pA248.2.
12. Eliaz N., Gileadi E. Induced Codeposition of Alloys of Tungsten, Molybdenum and Rhenium with Transition Metals. *Modern Aspects of Electrochemistry*. Ed. C.Vayenas. 2008. 42. (New York: Springer, 2008). DOI: 10.1007/978-0-387-49489-0_4.

Надійшла 29.03.2019