

ИЗУЧЕНИЕ КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ Co-W ПОКРЫТИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

С.А. Силкин, С.А. Кусманов, А.С. Перков, В.И. Парфенюк

Сергей Андрисович Силкин (ORCID 0000-0002-3915-642X)*

Кафедра химии, Костромской государственной университет, ул. Дзержинского, 17/11, Кострома, Российская Федерация, 156005

E-mail: longamin@mail.ru*

Сергей Александрович Кусманов (ORCID 0000-0002-7156-102X)

Институт физико-математических и естественных наук, Костромской государственной университет, ул. Дзержинского, 17/11, Кострома, Российская Федерация, 156005

E-mail: sakusmanov@yandex.ru

Александр Сергеевич Перков

Костромской государственной университет, ул. Дзержинского, 17/11, Кострома, Российская Федерация, 156005

E-mail: sachaperkow@gmail.com

Владимир Иванович Парфенюк (ORCID 0000-0003-3747-5416)

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, ул. Академическая, 1, Иваново, Российская Федерация, 153045

E-mail: vip@isc-ras.ru

Методами электрохимического импеданса и поляризационных измерений изучено коррозионное поведение Co-W покрытий, полученных из цитратного электролита (с содержанием W в покрытии ~24 ат. %) в следующих коррозионных средах: 0,6 М хлориде натрия, 0,1 М сульфате натрия (Na₂SO₄), 1М соляной кислоте (HCl) и 0,5М серной кислоте (H₂SO₄). В качестве сравнения взята сталь JIS-SK5, выступающая в качестве подложки при осаждении. Показано, что токи коррозии Co-W покрытий в трех коррозионных средах (хлориде натрия, соляной кислоте и сульфате натрия) близки, и составляют 20±3 мкА/см². В серной кислоте значения токов коррозии ниже и составляют ~10 мкА/см². При выдержке в кислых средах коррозионный потенциал Co-W покрытий сдвигается в анодную область, достигая значений -0,26 В, а в нейтральных средах (хлоридной и сульфатной) достигает существенно более низких значений -0,72 В. Продемонстрированы высокая пассивирующая способность Co-W покрытия в используемых кислотах, где токи коррозии более чем в 100 (в случае серной кислоты) и в 17 (в случае соляной кислоты) раз меньше, чем у подложки из стали SK-5. Максимальное поляризационное сопротивление Co-W покрытий наблюдается в средах хлорида натрия и серной кислоте и принимает максимальное значение ~36000 Ом·см², а минимальное значение данное покрытие показывает в солянокислой среде ~ 3500 Ом·см².

Ключевые слова: Co-W покрытия, коррозионная стойкость, токи коррозии, потенциал коррозии, спектроскопия электрохимического импеданса

Для цитирования:

Силкин С.А., Кусманов С.А., Перков А.С., Парфенюк В.И. Изучение коррозионного поведения Co-W покрытия в различных средах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 11. С. 69–78. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7033.

For citation:

Silkin S.A., Kusmanov S.A., Perkov A.S., Parfenyuk V.I. Study of the corrosion behavior of Co-W coatings in various environments. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 11. P. 69–78. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711. 7033.

STUDY OF THE CORROSION BEHAVIOR OF Co-W COATINGS IN VARIOUS ENVIRONMENTS

S.A. Silkin, S.A. Kusmanov, A.S. Perkov, V.I. Parfenyuk

Sergey A. Silkin (ORCID 0000-0002-3915-642X)*

Department of Chemistry, Kostroma State University, Dzerzhinskogo st., 17/11, Kostroma, 156005, Russia
E-mail: longamin@mail.ru*

Sergey A. Kusmanov (ORCID 0000-0002-7156-102X)

Institute of Physical, Mathematical and Technical Sciences, Kostroma State University, Dzerzhinskogo st., 17/11, Kostroma, 156005, Russia
E-mail: sakusmanov@yandex.ru

Alexander S. Perkov

Kostroma State University, Dzerzhinskogo st., 17/11, Kostroma, 156005, Russia
E-mail: sachaperkow@gmail.com

Vladimir I. Parfenyuk (ORCID 0000-0003-3747-5416)

Institute of Solution Chemistry named after. G.A. Krestova RAS, Akademicheskaya st., 1, Ivanovo, 153045, Russia
E-mail: vip@isc-ras.ru

Corrosion behavior of So-W coatings obtained from citrate electrolyte (with W content in the coating of about 24 at. %) in the following corrosive environments was studied by the methods of electrochemical impedance and polarization measurements: 0.6M sodium chloride (3.5 mass%), 0.1 M sodium sulfate (Na₂SO₄), 1 M hydrochloric acid (HCl) and 0.5M sulfuric acid (H₂SO₄). As a comparison, JIS-SK5 steel, which acts as a substrate during deposition, was taken. It is shown that the corrosion current of Co-W coatings in three corrosive media (sodium chloride, hydrochloric acid and sodium sulfate) is close to $20 \pm 3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. When exposed to acidic environments, the corrosion potential of Co-W coatings shifts to the anodic region reaching values of -0.260 V, and in neutral environments (chloride and sulfate) it reaches significantly higher values of -0.76 V. The high passivating ability of the Co-W coating in used acids is demonstrated, where the corrosion current is more than 100 times (in the case of sulfuric acid) and 17 times (in the case of hydrochloric acid) less than that of the SK-5 steel substrate. The maximum polarization resistance of So-W coatings is observed in sodium chloride and sulfuric acid environments and takes a maximum value of $\sim 36000 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}^2$, and the minimum value of this coating shows $\sim 3500 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}^2$ in hydrochloric acid environment.

Keywords: Co-W coatings, corrosion resistance, corrosion currents, corrosion potential, electrochemical impedance spectroscopy

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес для промышленного применения представляют покрытия, обладающие комплексом функциональных свойств: достаточной износостойкостью, низким коэффициентом трения и коррозионной стойкостью, или другими выдающимися свойствами поверхности [1-5].

Хромовое покрытие является одним из широко применяемых в промышленности [6-8] и отвечает практически всем перечисленным требованиям. Вместе с тем, процессы получения электролитических хромовых покрытий представляют опасность для окружающей среды и здоровья людей, поскольку связаны с использованием гальванических ванн, содержащих токсичные и канцеро-

генные соединения шестивалентного хрома. Поэтому в последнее время ведутся интенсивные поиски вариантов замены этого покрытия [9].

Одним из подходящих кандидатов для замены электролитического хромового покрытия являются покрытия из сплавов на основе вольфрама [10-12] так как они обладают широким спектром свойств и по некоторым из параметров опережают хромовые покрытия [10].

Прямое осаждение вольфрама из водных растворов невозможно, но за счет образования сложных комплексов с металлами подгруппы железа такое осаждение становится возможным. Сложность процесса осаждения подтверждает и то, что осаждение идет из большого числа комплексов, многие из которых имеют большой молекулярный вес [13-15]. На данный момент по механизму осаждения данного вида сплавов, названному индуцированным соосаждением, опубликовано много работ [16-19], однако единого мнения по этим вопросам и до сих пор не сложилось.

Вследствие довольно сложного механизма осаждения, осаждения такого рода покрытий протекают с «размерным эффектом», то есть свойства покрытия зависят не только от классических параметров осаждения (плотность тока, pH электролита, температуры и гидродинамических условий), но и от объемной плотности тока (мА/л) [20-24], что говорит о том, что при осаждении для получения воспроизводимых свойств необходимо учитывать и этот параметр. То, что размерный эффект не свойственен для классических электролитов, показали в [20].

Одним из факторов, ограничивающих применение Co-W сплавов в промышленности, является недостаточная изученность коррозионных свойств этих сплавов в разных условиях эксплуатации. При анализе литературных данных можно сделать вывод, что существует довольно большой массив разрозненных исследований, посвященных изучению коррозионных свойств покрытий сплавов Co-W разного состава при использовании различных сред, включающих как однокомпонентные электролиты NaCl, Na₂SO₄, NaOH, HCl, H₂SO₄, так и их комбинации [25-33]. В [34] было сделано предположение, что хорошая коррозионная стойкость Co-W покрытий обусловлена образованием пассивной пленки из гидроксида кобальта на поверхности покрытия, а в [35] на основе энергодисперсионного анализа было сделано предположение, что все дело в пленке оксидного состава. Один из методов повышения коррозионной стойкости Co-W покрытий - это добавление в покрытия

микро- и наночастиц, которые позволяют заметно улучшить коррозионную стойкость [36, 37].

Даже учитывая тот факт, что число работ по коррозионной стойкости изучаемых покрытий довольно велико, в работах сравниваются покрытия разного состава, разных условий получения и в разных коррозионных средах, да и коррозионные характеристики получены разными методами, что не позволяет провести прямого сравнения.

Цель работы – провести исследования изменения коррозионных характеристик поверхности в четырех коррозионных средах с помощью двух методов: метода поляризационных измерений (экстраполяцией по Тафелю) и методом электрохимической импедансной спектроскопии.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Осаждение покрытий проводилось из цитратного электролита следующего состава (моль/л): CoSO₄·7H₂O – 0,2, Na₂WO₄·2H₂O – 0,2, H₃BO₃ – 0,65, лимонная кислота C₆H₈O₇·H₂O – 0,04, цитрат натрия Na₃C₆H₅O₇·5,5H₂O – 0,25, при pH 6,7, температуре электролита 80 °С, плотности тока 20 мА/см² и объемной плотности тока равной 70 мА/л. В качестве анода использовался графитовый электрод площадью 20 см². Осаждение проводилось на торец цилиндра из углеродистой стали JS SK-5. По данным рентгенофлуоресцентного анализа, полученное покрытие содержало 24 ат. % вольфрама, что хорошо соотносится с литературными данными.

В качестве коррозионных сред были использованы: 0,6 М раствор хлорида натрия, 0,1 М раствор сульфата натрия, 1М раствор соляной кислоты и 0,5М раствор серной кислоты. Поляризационные кривые снимали с помощью потенциостата Biologic SP-150 (Biologic, Франция) в стандартной трехэлектродной ячейке при скорости сканирования потенциала 1 мВ/с и после выдержки поверхности образца в электролите 1 ч. Токи коррозии образцов оценивали на основе экстраполяции по Тафелю полученных поляризационных кривых. В качестве вспомогательного электрода использовался графитовый, а электрода сравнения – хлорсеребряный электрод. В случае отсутствия на анодной ветви прямолинейного участка, на котором отмечается изменение тока более чем на один порядок величины, проводилось экстраполирование катодной ветви кривой на перпендикуляр к коррозионному потенциалу при минимуме тока на кривой.

Измерения методом спектроскопии электрохимического импеданса проводилось после часового экспонирования в электролите, при потенциале разомкнутой цепи и развертки потенциала

± 10 мВ, в диапазоне частот 100 кГц – 100 мГц с помощью потенциостата SP-150 (Biologic, Франция).

Обработка полученных данных проводилась с помощью программного обеспечения EC-Lab, на основании выбранной эквивалентной схемы. Качество подгонки данных EIS к эквивалентным схемам оценивалось по значениям Хи-квадрат, и выбирались те значения элементов, при которых значения Хи-квадрат были минимальны. В данном случае величина χ^2 представляет собой сумму квадратов разностей между теоретическими и экспериментальными точками. Относительная погрешность значения каждого элемента эквивалентной схемы ограничивалась 3%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Коррозионное поведение изучаемых поверхностей (как Co-W покрытия, так и подложки) в использованных средах отличается друг от друга, но можно условно поделить использованные коррозионные среды на нейтральные (NaCl, Na₂SO₄) и кислые (HCl, H₂SO₄) и рассматривать их с учетом кислотности среды. Конечно, можно было классифицировать среды и по аниону, так как хлорид-ион, ввиду его специфической адсорбции, активирует поверхность, а сульфат-ион часто называют пассивирующим, но эти характеристики мы обсудим отдельно, уже при анализе полученных данных.

На рис. 1 приведены экспериментально полученные поляризационные кривые в нейтральных коррозионных средах. Видно, что коррозионные потенциалы Co-W покрытия в этих средах смещены в катодную область относительно кривых подложки, и очень близки друг к другу, а сами поляризационные кривые очень похожи друг на друга. Поляризационные кривые подложки, отличаются намного больше, причем не только коррозионным потенциалом (потенциалом нулевого тока), но и существенно большими значениями токов. На анодном участке поляризационных кривых Co-W покрытия можно заметить области понижения анодного тока, которые могут быть связаны с частичной пассивацией поверхности за счет образования оксидов/гидроксидов на поверхности [34, 35], причем видно, как минимум, два участка снижения тока вне зависимости от аниона коррозионной среды. Таким образом, можно сделать промежуточный вывод, что коррозионные механизмы подложки и Co-W покрытия в данных средах похожи.

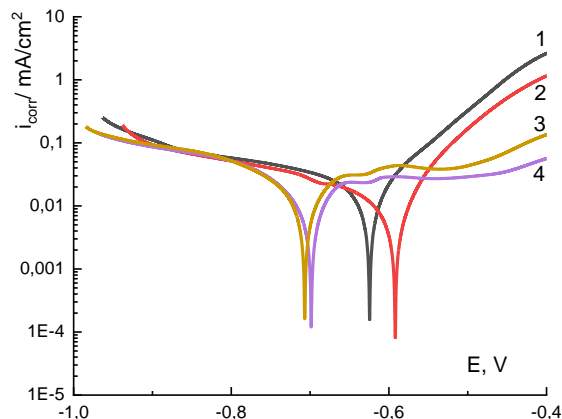


Рис. 1. Поляризационные кривые, полученные в 0,6 М растворе хлорида натрия - 1, 3 и 0,1 М растворе сульфата натрия - 2,4 для материала SK-5 -1, 2 и Co-W 3, 4

Fig. 1. Polarization curves obtained in a solution of 0.6 M sodium chloride solution - 1, 3 and 0.1 M sodium sulfate solution - 2,4 for SK-5 material - 1, 2 and Co-W 3, 4

В кислых коррозионных средах (рис. 2) поведение покрытий тоже схоже. На анодной ветви поляризационных кривых Co-W покрытий виден четкий переход к пассивации поверхности при потенциале примерно -0,1 В, с более низкими катодными токами и ярче выраженной анодной пассивацией в сернокислой среде. Поведение подложки в кислых средах соответствует активному растворению, и находится в соответствии с литературными данными.

В табл. 1 представлены усредненные данные по расчету коррозионного потенциала и токов коррозии методом Тафелевской экстраполяции. Ввиду пассивационного поведения поверхности Co-W покрытий при анодной поляризации, расчеты выполнялись по катодной ветви поляризационной кривой.

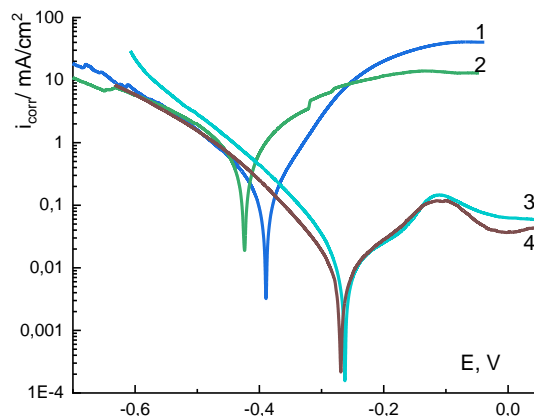


Рис. 2. Поляризационные кривые, полученные в 1 М растворе соляной 1, 3 и 0,5 М растворе серной кислоты , 2,4 для материала SK-5 -1,2 и Co-W 3,4

Fig. 2. Polarization curves obtained in a solution of 1 M hydrochloric acid 1, 3 and 0.5 M sulfuric acid solution 2, 4 for the material SK-5 -1,2 and Co-W 3,4

Таблица 1

Значения плотности тока и потенциала коррозии подложки (SK-5) и Co-W покрытия в разных средах
 Table 1. Values of current density and corrosion potential of the substrate (SK-5) and Co-W coating in different environments

образец	i_{corr} мкА/см ²	E_{corr} , В
SK5-NaCl	18,6	-0,588
CoW-NaCl	22,4	-0,717
SK5-Na ₂ SO ₄	12,8	-0,597
CoW-Na ₂ SO ₄	17	-0,706
SK5-HCl	227	-0,374
CoW-HCl	21,7	-0,263
SK5-H ₂ SO ₄	943	-0,443
CoW-H ₂ SO ₄	10,2	-0,257

На основе полученных данных токов, можно подтвердить выводы, сделанные при анализе формы поляризационной кривой. В хлоридных электролитах, при нейтральных значениях pH (NaCl) токи коррозии Co-W покрытия соизмеримы с токами коррозии подложки, а при увеличении кислотности (в среде HCl), вследствие пассивации поверхности покрытия, его коррозионная стойкость более чем на порядок превосходит стойкость подложки. В средах же с пассивирующим сульфат-ионом, в случае нейтральной среды, токи коррозии Co-W покрытия незначительно выше, чем у подложки, а в кислой среде практически на два порядка ниже, что вызвано более полной пассивацией поверхности, чем в случае активирующего хлорид-иона. Коррозионные потенциалы Co-W покрытий в изученных нейтральных средах заметно смещены в катодную область от коррозионного потенциала подложки, что подтверждает более выгодное коррозионное поведение данного вида покрытий.

Если провести сравнение плотностей токов коррозии Co-W покрытий в трех средах (исключая серную кислоту), то можно сделать вывод, что скорость коррозии во всех средах близка, и составляет 20 ± 3 мкА/см², что связано со схожим поведением поверхности и отсутствием плотных пассивационных пленок.

На основании анализа годографов электрохимического импеданса была принята упрощенная схема коррозионного процесса рис. 3.

Эта схема представляет собой типичную эквивалентную схему, используемую для описания коррозионного процесса металла в активной среде путем электронного переноса заряда на границе раздела металл/электролит, а также для описания процесса равномерной коррозии на однородной

поверхности [38, 39]. В схеме используется элемент постоянной фазы (CPE) – $Q_{\text{дс}}$, который характеризуется двумя параметрами. Импеданс $Q_{\text{дс}}$ равен: $Z_{Q_{\text{дс}}} = Q^{-1}(j\omega)^{-n}$, где Q – численное значение адмиттанса при $\omega = 1$ рад/с, n – параметр, характеризующий фазовый угол CPE. При $n = 1$ элемент CPE представляет собой идеальную емкость. При $n = (1 - \gamma)$ элемент представляет неидеальную емкость; γ – величина, значительно меньше 1 (типично $\gamma < 0,2$). Если n ненамного меньше 1, то элемент CPE близок к емкости.

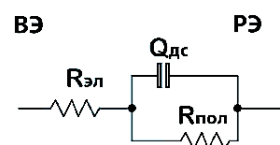


Рис. 3. Эквивалентная схема коррозионного процесса (на схеме обозначены: ВЭ-вспомогательный электрод, $R_{\text{эл}}$ – сопротивление электролита, $Q_{\text{дс}}$ -численное значение адмиттанса двойного слоя, $R_{\text{пол}}$ – поляризационное сопротивление, РЭ-рабочий электрод)

Fig. 3. Equivalent circuit of the corrosion process (indicated on the diagram: ВЭ -auxiliary electrode, $R_{\text{эл}}$ - electrolyte resistance, $Q_{\text{дс}}$ -double layer admittance, $R_{\text{пол}}$ - polarization resistance, РЭ -working electrode)

$Q_{\text{дс}}$ используется для обозначения переноса электрического заряда на границе раздела металл/электролит, и имеет размерность мкФ/((см²·с⁽¹⁻ⁿ⁾)).

$R_{\text{пол}}$ – сопротивление переносу заряда электронов, которое представляет собой значение импеданса в его реальной составляющей, $R_{\text{эл}}$ – сопротивление раствора. Комбинация этих трех пассивных элементов обеспечивает простую эквивалентную электрическую цепь (ЭЭС) для равномерного корродирующего металла. На схеме также показаны условные границы вспомогательного и рабочего электрода.

Сами же годографы электрохимического импеданса в координатах Найквиста для Co-W покрытий представлены на рис. 4 и для подложки SK-5 на рис. 5.

Можно заметить, что все представленные годографы имеет полукруглую форму, что вызвано схожей схемой коррозионного процесса и подтверждает однотипность эквивалентной схемы. Заметного влияния диффузионных ограничений в рассматриваемых случаях не выявлено.

Рассчитанные значения параметров элементов эквивалентной схемы для изученных сред и покрытий представлены в табл. 2.

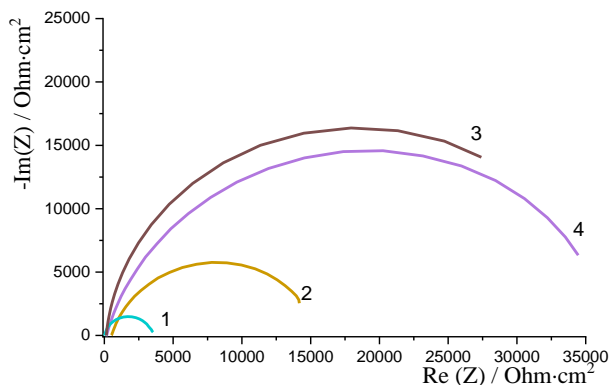


Рис. 4. Диаграммы Найквиста (или годограф электрохимического импеданса) для Co-W покрытий в средах: 1- HCl, 2- Na₂SO₄, 3- H₂SO₄, 4- NaCl
 Fig. 4. Nyquist diagrams (or electrochemical impedance hodo-graph) for Co-W coatings in media: 1- HCl, 2- Na₂SO₄, 3- H₂SO₄, 4- NaCl

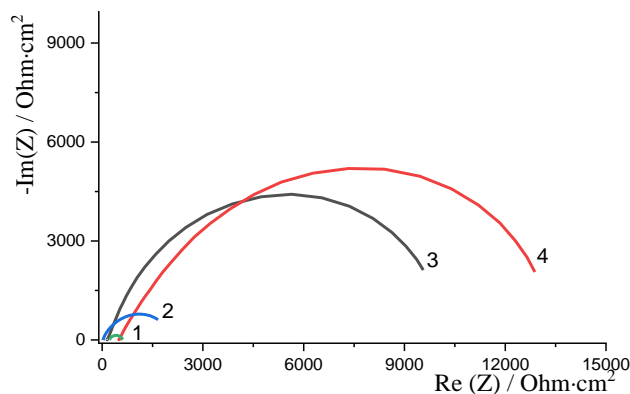


Рис. 5. Диаграммы Найквиста (или годограф электрохимического импеданса) для стали SK-5 в средах: 1- H₂SO₄, 2- HCl, 3- NaCl, 4- Na₂SO₄
 Fig. 5. Nyquist diagrams (or electrochemical impedance hodo-graph) for SK-5 steel in environments: 1- H₂SO₄, 2- HCl, 3- NaCl, 4- Na₂SO₄

Таблица 2

Расчетные параметры эквивалентной схемы для изучаемых покрытий (обозначения: R_{эл} - сопротивление электролита, Q_{дс}-емкость двойного слоя. R_{пол} - поляризационное сопротивление)

Table 2. Calculated parameters of the equivalent circuit for the studied coatings (indicated in the table:

R_{эл} - electrolyte resistance, Q_{дс} - admittance. R_{пол} - polarization resistance)

образец	R _{эл} , Ом·см ²	Q _{дс} , мкФ/(см ² ·с ⁽¹⁻ⁿ⁾)	n	R _{пол} , Ом·см ²
SK5-NaCl	147	519	0,84	10565
CoW-NaCl	157	555	0,84	36219
SK5-Na ₂ SO ₄	558	1972	0,81	13594
CoW-Na ₂ SO ₄	452	1597	0,82	15138
SK5-HCl	35	124	0,83	2057
CoW-HCl	18	64	0,89	3523
SK5-H ₂ SO ₄	212	749	0,76	406
CoW-H ₂ SO ₄	140	495	0,93	36661

Если рассмотреть параметр R_{эл} (сопротивление электролита), то можно сделать вывод, что при выдержке в кислотах сопротивление электролита в случае Co-W покрытия сильно ниже, чем у стального, при той же доступной для контакта с электролитом площади. Эта особенность объясняется наличием продуктов коррозионного разрушения стали на самой поверхности, которые экранируют поверхность и увеличивают общее сопротивление. Но так как на годографе не наблюдается изменений, вызванных диффузионными ограничениями (импеданс Варбурга), то эта пленка не влияет на сам коррозионный процесс. Динамика изменения емкости с изменением кислотности среды подтверждает это предположение, и в случае меньшей емкости двойного слоя сопротивление электролита тоже ниже.

Меньшая величина емкости двойного слоя в совокупности с кратно большим поляризационным сопротивлением R(пол) показывает отсутствие изменения механизма коррозионного разру-

шения Co-W покрытия и не подтверждает его пассивацию в случае пассивации без наложения анодного потенциала. Конечно, сравнения сопротивление поляризации в серной и соляной кислоте, видно, что в серной кислоте оно на порядок больше, но на основании годографа нет оснований предполагать, что образуется плотная пассивационная пленка, так как значимых ограничений диффузии на кривой не обнаружено. Также сопротивление поляризации в случае раствора хлорида натрия находится в тех же пределах, что и в серной кислоте.

Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что при выдержке в любой среде коррозионная стойкость исследуемого Co-W покрытия выше, чем подложки. Максимальные защитные свойства покрытия по сравнению с подложкой проявляются в кислых средах вследствие пассивации поверхности. Особенность коррозионного поведения, измеренная разными методами, заключается в том, что если сравнивать значения по-

ляризационного сопротивления и токов коррозии в разных средах, то налицо практически полная корреляция этих методов. Некоторое исключение из этого правила наблюдается в растворе хлорида натрия, где поляризационное сопротивление Co-W покрытия кратно больше сопротивления подложки, а токи коррозии в этом же растворе практически соизмеримы. А в растворе соляной кислоты наблюдается обратная зависимость, и отношение показателей коррозионной стойкости покрытия к таковым для подложки меньше в случае поляризационного сопротивления, чем для плотности тока коррозии. Эти отличия мы связываем с недостаточной точностью эквивалентной схемы для Co-W покрытия, так как мы использовали одну из самых простых коррозионных моделей для расчета поляризационного сопротивления, и хоть значения ошибки моделирования и величина коэффициента n (табл. 1) говорят о том, что модель подходит с допустимой точностью, все же, вероятно, коррозионное поведение в хлоридных средах более сложное, и отличается от поведения в сульфатных средах.

ВЫВОДЫ

Токи коррозии Co-W покрытий в трех средах (HCl, NaCl, Na₂SO₄) близки, и составляют 20±3 мкА/см².

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Братков И.В., Ершова Т.В., Донцов М.Г.** Актуальные методы электрохимической обработки поверхности. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 151-158. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6841j.
2. **Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Напеденина Е.Ю.** Многопараметрическая оптимизация электроосаждения нанокристаллических композиционных покрытий Cr-Cr₃P in statu nascendi из электролитов трехвалентного хромирования. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 73-81. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6341.
3. **Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н.** Электроосаждение сплавов олово-кобальт из оксалатно-аммонийных электролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 12. С. 111-116. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6965.
4. **Kuzmin S.M., Chulovskaya S.A., Filimonova Y.A., Parfenyuk V.I.** Synergistic effect of two metal porphyrins in a polymer catalyst for oxygen electroreduction. *J. Electroanal. Chem.* 2023. 947. P. 117798. DOI: 10.1016/j.jelechem.2023.117798.
5. **Филимонова Ю.А., Чуловская С.А., Кузьмин С.М., Парфенюк В.И.** Особенности формирования и электрохромные свойства полипорфириновых пленок на основе Zn-тетракис(3-(гидроксифенил)порфирина). *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 4. С. 35-42. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6796.
6. **Imaz N., Ostra M., Vidal M., Díez J.A., Sarret M., García-Lecina E.** Corrosion behaviour of chromium coatings obtained by direct and reverse pulse plating electrodeposition

В среде H₂SO₄ у покрытия Co-W плотности тока коррозии в ~2 раза ниже, чем в других исследуемых средах.

При коррозии в кислых средах, плотности тока коррозии Co-W покрытий на 1-2 порядка меньше, чем для подложки из стали SK-5.

Поляризационное сопротивление Co-W покрытий во всех изученных средах выше, чем у подложки.

Поляризационное сопротивление Co-W покрытия в среде H₂SO₄ ~ 90 раз выше, чем у подложки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-20231) Костромскому государственному университету.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-29-20231) to Kostroma State University.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. **Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Bratkov I.V., Ershova T.V., Dontsov M.G.** Actual methods of electrochemical surface treatment. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 151-158. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6841j.
2. **Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Napedenina E.Yu.** Multi-response optimisation of electrodeposition of nanocrystalline composite coatings Cr-Cr₃P in statu nascendi from trivalentchromiumbaths *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 73-81. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6341.
3. **Shekhanov R.F., Gridchin S.N.** Electrodeposition of tin-cobalt alloys from ammonium oxalate electrolytes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 12. P. 111-116 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6965.
4. **Kuzmin S.M., Chulovskaya S.A., Filimonova Y.A., Parfenyuk V.I.** Synergistic effect of two metal porphyrins in a polymer catalyst for oxygen electroreduction. *J. Electroanal. Chem.* 2023. 947. P. 117798. DOI: 10.1016/j.jelechem.2023.117798.
5. **Filimonova Yu.A., Chulovskaya S.A., Kuzmin S.M., Parfenyuk V.I.** Formation features and electrochromic properties of polyporphyrin films based on Zn-tetrakis(3-(hydroxyphenyl)porphyrin). *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 4. P. 35-42. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6796.
6. **Imaz N., Ostra M., Vidal M., Díez J.A., Sarret M., García-Lecina E.** Corrosion behaviour of chromium coatings

- in NaCl aqueous solution. *Corr. Sci.* 2014. 78. P. 251–259. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.10.005.
7. **Darbeida A., von Stebut J., Barthole M., Belliard P., Lelait L., Zacharie G.** Comparative tribological study of chromium coatings with different specific hardness. *Surf. Coat. Technol.* 1994. V. 68–69. P. 582–590. DOI: 10.1016/0257-8972(94)90221-6.
 8. **Fedrizzi L., Rossi S., Bellei F., Deflorian F.** Wear–corrosion mechanism of hard chromium coatings. *Wear.* 2002. V. 253 (11–12). P. 1173–1181. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00254-5.
 9. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003. Official J. of the European Union. L 37. 13.2.2003.
 10. **Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E.J.** Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron group metals. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2012. V. 48(6). P. 491–520. DOI: 10.3103/S1068375512060038.
 11. **Weston D.P., Shipway P.H., Harris S.L., Cheng M.K.** Friction and Sliding Behavior of Electrodeposited Cobalt and Cobalt-Tungsten Alloy Coatings for Replacement of Electrodeposited Chromium. *Wear.* 2009. V. 267. P. 934–943. DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.006.
 12. **Weston D.P., Harris S.J., Capel H., Ahmed N., Shipway P.H., Yellup J.M.** Nanostructured Co-W Coatings Produced by Electrodeposition to Replace Hard Cr on Aerospace Components. *Trans. Inst. Metal. Finish.* 2010. V. 88. P. 47–56. DOI: 10.1179/174591909X12596810686490.
 13. **Belevskii S.S., Yushchenko S.P., Dikumar A.I.** Anomalous electrodeposition of Co-W coatings from citrate electrolyte due to the formation multinuclear heterometallic complexes in the solution. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2012. V. 48(1). P. 97. DOI: 10.3103/S1068375512010036.
 14. **Belevskii S.S., Buravets V.A., Yushchenko S.P., Zgardan I.M.** Gel-chromatographic separation of boron-gluconate electrolyte for obtaining nanocrystalline Co-W coatings. Part I. Composition and electrochemical activity of components. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2016. V. 52(4). P. 350. DOI: 10.3103/S1068375516040049.
 15. **Belevskii S.S., Buravets V.A., Yushchenko S.P., Dikumar A.I.** Gel-chromatographic separation of boron-gluconate electrolyte for obtaining nanocrystalline Co-W coatings. Part II. Electrochemical activity of separation products and their role in process manufacturing alloy. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2016. 52(5). P. 420. DOI: 10.3103/S1068375516050057.
 16. **Красиков А.В., Красиков В.Л.** Механизм электроосаждения сплава никель-вольфрам из пиррофосфатного электролита. *Изв. СПбГТИ(ТУ).* 2016. № 36. С. 12. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.36.12.7.
 17. **Красиков А.В., Красиков В.Л.** Mechanism of induced codeposition of alloys and some single refractory metals. *Изв. СПбГТИ(ТУ).* 2016. № 37. С. 8. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.37.8.
 18. **Belevskii S., Silkin S., Tsyntaru N., Cesiulis H., Dikumar A.** The influence of sodium tungstate concentrations on the electrode reactions at iron-tungsten alloy electrodeposition. *Coatings.* 2021. V. 11(8). P. 981. DOI: 10.3390/coatings11080981.
 19. **Баранов С.А., Дикусар А.И.,** Кинетика электрохимической нанонуклеации при индуцированном соосаждении металлов группы железа с тугоплавкими металлами (W, Mo, Re). *Электрон. обработка материалов.* 2021. Т. 57. № 5. С. 1. DOI: 10.52577/eom.2021.57.5.01.
 20. **Silkin S.A., Gotelyak A.V., Tsyntaru N.I., Dikumar A.I.** Size effect of microhardness of nanocrystalline Co-W coatings, produced from citrate and gluconate solutions. *Surf.* obtained by direct and reverse pulse plating electrodeposition in NaCl aqueous solution. *Corr. Sci.* 2014. 78. P. 251–259. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.10.005.
 7. **Darbeida A., von Stebut J., Barthole M., Belliard P., Lelait L., Zacharie G.** Comparative tribological study of chromium coatings with different specific hardness. *Surf. Coat. Technol.* 1994. V. 68–69. P. 582–590. DOI: 10.1016/0257-8972(94)90221-6.
 8. **Fedrizzi L., Rossi S., Bellei F., Deflorian F.** Wear–corrosion mechanism of hard chromium coatings. *Wear.* 2002. V. 253 (11–12). P. 1173–1181. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00254-5.
 9. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003. Official J. of the European Union. L 37. 13.2.2003.
 10. **Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E.J.** Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron group metals. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2012. V. 48(6). P. 491–520. DOI: 10.3103/S1068375512060038.
 11. **Weston D.P., Shipway P.H., Harris S.L., Cheng M.K.** Friction and Sliding Behavior of Electrodeposited Cobalt and Cobalt-Tungsten Alloy Coatings for Replacement of Electrodeposited Chromium. *Wear.* 2009. V. 267. P. 934–943. DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.006.
 12. **Weston D.P., Harris S.J., Capel H., Ahmed N., Shipway P.H., Yellup J.M.** Nanostructured Co-W Coatings Produced by Electrodeposition to Replace Hard Cr on Aerospace Components. *Trans. Inst. Metal. Finish.* 2010. V. 88. P. 47–56. DOI: 10.1179/174591909X12596810686490.
 13. **Belevskii S.S., Yushchenko S.P., Dikumar A.I.** Anomalous electrodeposition of Co-W coatings from citrate electrolyte due to the formation multinuclear heterometallic complexes in the solution. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2012. V. 48(1). P. 97. DOI: 10.3103/S1068375512010036.
 14. **Belevskii S.S., Buravets V.A., Yushchenko S.P., Zgardan I.M.** Gel-chromatographic separation of boron-gluconate electrolyte for obtaining nanocrystalline Co-W coatings. Part I. Composition and electrochemical activity of components. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2016. V. 52(4). P. 350. DOI: 10.3103/S1068375516040049.
 15. **Belevskii S.S., Buravets V.A., Yushchenko S.P., Dikumar A.I.** Gel-chromatographic separation of boron-gluconate electrolyte for obtaining nanocrystalline Co-W coatings. Part II. Electrochemical activity of separation products and their role in process manufacturing alloy. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2016. 52(5). P. 420. DOI: 10.3103/S1068375516050057.
 16. **Krasikov A.V., Krasikov V.L.** Mechanism of electrodeposition of nickel-tungsten alloy from pyrophosphate electrolyte. *Izv. SPbGTI(TU).* 2016. N 36. P. 12 (in Russian). DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.36.12.7.
 17. **Krasikov A.V., Krasikov V.L.** Mechanism of induced codeposition of alloys and some single refractory metals. *Izv. SPbGTI(TU).* 2016. N 37. P. 8. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.37.8.
 18. **Belevskii S., Silkin S., Tsyntaru N., Cesiulis H., Dikumar A.** The influence of sodium tungstate concentrations on the electrode reactions at iron-tungsten alloy electrodeposition. *Coatings.* 2021. V. 11(8). P. 981. DOI: 10.3390/coatings11080981.
 19. **Baranov S.A., Dikumar A.I.** Kinetics of electrochemical nano-nucleation in induced co-deposition of iron group metals with refractory metals (W, Mo, Re). *E`lektronnaia Obrab. Mater.* 2021. V. 57. N 5. P. 1 (in Russian). DOI: 10.52577/eom.2021.57.5.01.

- Eng. Appl. Electrochem.* 2015. V. 51(2). P. 228. DOI: 10.3103/S106837551503014X.
21. **Gotelyak A.V., Silkin S.A., Yahova E.A., Dikusar A.I.** Effect of pH and volume current density on deposition rate and microhardness of Co-W coatings electrodeposited from concentrated borongluconate electrolyte. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 4. P. 541. DOI: 10.1134/S1070427217040085.
 22. **Silkin S.A., Gotekyay A.V., Tsynysaru N.I., Dikusar A.I.** Electrodeposition of alloys of the iron group metals with tungsten from citrate and gluconate solutions. Size effect of microhardness. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2017. V. 53. N 1. P. 7. DOI: 10.3103/S1068375517010136.
 23. **Belevskii S.S., Gotelyak A.V., Silkin S.A., Dikusar A.I.** Macroscopic size effect of the microhardness of electrodeposited iron-group metal – tungsten alloy coatings. Impact of electrode potential and oxygen-coatings impurities. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2019. V. 55. N 1. P. 46. DOI: 10.3103/S1068375519010058.
 24. **Daniľchuk V.V., Silkin S.A., Gotelyak A.V., Buravets V.A.** The mechanical properties and rate of electrodeposition of Co–W alloys from a boron–gluconate bath: Impact of anodic processes. *Russ. J. Electrochem.* 2018. V. 54. N 11. P. 930. DOI: 10.1134/S1023193518130116.
 25. **Ved' M., Sakhnenko N., Nenastina T., Volobuyev M., Yermolenko I.** Corrosion and mechanical properties of nanostructure electrolytic Co-W and Fe-Co-W alloys. *Mater. Today: Proceedings.* 2022. V. 50(4). P. 463-469. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.293.
 26. **Weiwei Zhang, Wenzhe Xia, Baosong Li, Mingyuan Li, Ming Hong, Zhen Zhang.** Influences of Co and process parameters on structure and corrosion properties of nanocrystalline Ni-W-Co ternary alloy film fabricated by electrodeposition at low current density. *Surf. Coat. Technol.* 2022. V. 439. P. 128457. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128457.
 27. **Pao-Chang Huang, Chih-Cheng Chou, Han-Tao Wang, Chun-Hao Cheng, Kung-Hsu Hou, Ming-Der Ger.** Tribocorrosion study of electrodeposited NiW alloy/BN(h) composited coatings for piston rings. *Surf. Coat. Technol.* 2022. V. 436. P. 128289. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128289.
 28. **Josiel Martins Costa, Mariana Borges Porto, Rodolfo Jose Amancio, Ambrosio Florencio de Almeida Neto.** Effects of tungsten and cobalt concentration on microstructure and anticorrosive property of cobalt-tungsten alloys. *Surf. Interfaces.* 2020. P. 100626. DOI: 10.1016/j.surf.2020.100626.
 29. **Bodaghi A., Hosseini J.** Corrosion resistance and electrocatalytic properties of Co-W alloy coatings. *Surf. Eng.* 2012. V. 28(8). P. 632–635. DOI: 10.1179/1743294412Y.0000000024.
 30. **Tsyntsar N.I., Belevskii S.S., Volodina G.F., Bersirova O.L., Yapontseva Yu.S., Kublanovskii V.S., Dikusar A.I.** Composition, Structure, and Corrosion Properties of Coatings of Co-W Alloys Electrodeposited under Direct Current. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2007. V. 43(5). P. 312–317. DOI: 10.3103/S106837550705002X.
 31. **Yapontseva Yu.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. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2014. V. 50(4). P. 330–336. DOI: 10.3103/S1068375514040139.
 32. **Tsyntsar N., Dikusar A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobanova Zh., Sidelnikova 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. V. 48. P. 419. DOI: 10.1007/s11106-009-9150-7.
 20. **Silkin S.A., Gotelyak A.V., Tsyntsar N.I., Dikusar A.I.** Size effect of microhardness of nanocrystalline Co-W coatings, produced from citrate and gluconate solutions. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2015. V. 51(2). P. 228. DOI: 10.3103/S106837551503014X.
 21. **Gotelyak A.V., Silkin S.A., Yahova E.A., Dikusar A.I.** Effect of pH and volume current density on deposition rate and microhardness of Co-W coatings electrodeposited from concentrated borongluconate electrolyte. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 4. P. 541. DOI: 10.1134/S1070427217040085.
 22. **Silkin S.A., Gotekyay A.V., Tsynysaru N.I., Dikusar A.I.** Electrodeposition of alloys of the iron group metals with tungsten from citrate and gluconate solutions. Size effect of microhardness. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2017. V. 53. N 1. P. 7. DOI: 10.3103/S1068375517010136.
 23. **Belevskii S.S., Gotelyak A.V., Silkin S.A., Dikusar A.I.** Macroscopic size effect of the microhardness of electrodeposited iron-group metal – tungsten alloy coatings. Impact of electrode potential and oxygen-coatings impurities. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2019. V. 55. N 1. P. 46. DOI: 10.3103/S1068375519010058.
 24. **Daniľchuk V.V., Silkin S.A., Gotelyak A.V., Buravets V.A.** The mechanical properties and rate of electrodeposition of Co–W alloys from a boron–gluconate bath: Impact of anodic processes. *Russ. J. Electrochem.* 2018. V. 54. N 11. P. 930. DOI: 10.1134/S1023193518130116.
 25. **Ved' M., Sakhnenko N., Nenastina T., Volobuyev M., Yermolenko I.** Corrosion and mechanical properties of nanostructure electrolytic Co-W and Fe-Co-W alloys. *Mater. Today: Proceedings.* 2022. V. 50. N 4. P. 463-469. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.293.
 26. **Weiwei Zhang, Wenzhe Xia, Baosong Li, Mingyuan Li, Ming Hong, Zhen Zhang.** Influences of Co and process parameters on structure and corrosion properties of nanocrystalline Ni-W-Co ternary alloy film fabricated by electrodeposition at low current density. *Surf. Coat. Technol.* 2022. V. 439. P. 128457. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128457.
 27. **Pao-Chang Huang, Chih-Cheng Chou, Han-Tao Wang, Chun-Hao Cheng, Kung-Hsu Hou, Ming-Der Ger.** Tribocorrosion study of electrodeposited NiW alloy/BN(h) composited coatings for piston rings. *Surf. Coat. Technol.* 2022. V. 436. P. 128289. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128289.
 28. **Josiel Martins Costa, Mariana Borges Porto, Rodolfo Jose Amancio, Ambrosio Florencio de Almeida Neto.** Effects of tungsten and cobalt concentration on microstructure and anticorrosive property of cobalt-tungsten alloys. *Surf. Interfaces.* 2020. P. 100626. DOI: 10.1016/j.surf.2020.100626.
 29. **Bodaghi A., Hosseini J.** Corrosion resistance and electrocatalytic properties of Co-W alloy coatings. *Surf. Eng.* 2012. V. 28(8). P. 632–635. DOI: 10.1179/1743294412Y.0000000024.
 30. **Tsyntsar N.I., Belevskii S.S., Volodina G.F., Bersirova O.L., Yapontseva Yu.S., Kublanovskii V.S., Dikusar A.I.** Composition, Structure, and Corrosion Properties of Coatings of Co-W Alloys Electrodeposited under Direct Current. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2007. V. 43(5). P. 312–317. DOI: 10.3103/S106837550705002X.
 31. **Yapontseva Yu.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. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2014. V. 50(4). P. 330–336. DOI: 10.3103/S1068375514040139.
 32. **Tsyntsar N., Dikusar A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobanova Zh., Sidelnikova S., Belevskii S., Yapontseva Yu., Bersirova O., Kublanovskii V.** Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on

33. **Benkovsky I., Tsyntsaru N., Silkin S., Cesiulis H., Dikusar A.** Synthesis, Wear and Corrosion of Novel Electrospark and Electrospark–Electrochemical Hybrid Coatings Based on Carbon Steels. *Lubricants*. 2023. V. 11(5). P. 205. DOI: 10.3390/lubricants11050205.
34. **Bodaghi J.H.** Corrosion Behavior of Electrodeposited Cobalt-Tungsten Alloy Coatings in NaCl Aqueous Solution. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. V. 7. P. 2584–2595. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)13904-6.
35. **Vernickaite E., Tsyntsaru N., Cesiulis H.** Electrodeposition and corrosion behaviour of nanostructured cobalt–tungsten alloys coatings, *Transact. IMF*. 2016. V. 94(6). P. 313–321. DOI: 10.1080/00202967.2016.1220071.
36. **Han-Tao Wang, Jee-Ray Wang, Ming-Der Ger, Kung-Hsu Hou.** Effect of Colloidal Stability of Diamond Nanoparticles on the Ni-W/Diamond Electro-co-deposition Composite Coatings and Evaluation of Corrosion Resistance. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2016. V. 11(3). P. 2419-2432. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)16114-1.
37. **Yan Zhai, Xiaobo Guo, Yongzheng He, Zhiqiang Li.** Corrosion resistance and mechanical properties of electrodeposited Co-W/ZrO₂ composite coatings. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2023. V. 18(3). P. 100015. DOI: 10.1016/j.ijoes.2023.01.015.
38. **Ruiz A., Hernández H., Hernández J., Orozco-Cruz R., Ruiz-Reynoso A., González C., Miranda-Hernández J.** Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels. *Electrochem. Impedance Spectrosc.* 2020. 94470.
39. **Lazanas A.C., Prodromidis M.I.** Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial. *ACS Meas. Sci. Au.* 2023. 3. P. 162-193, DOI: 10.1021/acsmesuresciau.2c00070.
33. **Benkovsky I., Tsyntsaru N., Silkin S., Cesiulis H., Dikusar A.** Synthesis, Wear and Corrosion of Novel Electrospark and Electrospark–Electrochemical Hybrid Coatings Based on Carbon Steels. *Lubricants*. 2023. V. 11(5). P. 205. DOI: 10.3390/lubricants11050205.
34. **Bodaghi J.H.** Corrosion Behavior of Electrodeposited Cobalt-Tungsten Alloy Coatings in NaCl Aqueous Solution. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. V. 7. P. 2584–2595. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)13904-6.
35. **Vernickaite E., Tsyntsaru N., Cesiulis H.** Electrodeposition and corrosion behaviour of nanostructured cobalt–tungsten alloys coatings, *Transact. IMF*. 2016. V. 94(6). P. 313–321. DOI: 10.1080/00202967.2016.1220071.
36. **Han-Tao Wang, Jee-Ray Wang, Ming-Der Ger, Kung-Hsu Hou.** Effect of Colloidal Stability of Diamond Nanoparticles on the Ni-W/Diamond Electro-co-deposition Composite Coatings and Evaluation of Corrosion Resistance. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2016. V. 11(3). P. 2419-2432. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)16114-1.
37. **Yan Zhai, Xiaobo Guo, Yongzheng He, Zhiqiang Li.** Corrosion resistance and mechanical properties of electrodeposited Co-W/ZrO₂ composite coatings. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2023. V. 18(3). P. 100015. DOI: 10.1016/j.ijoes.2023.01.015.
38. **Ruiz A., Hernández H., Hernández J., Orozco-Cruz R., Ruiz-Reynoso A., González C., Miranda-Hernández J.** Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels. *Electrochem. Impedance Spectrosc.* 2020. 94470.
39. **Lazanas A.C., Prodromidis M.I.** Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial. *ACS Meas. Sci. Au.* 2023. 3. P. 162-193, DOI: 10.1021/acsmesuresciau.2c00070.

Поступила в редакцию 11.12.2023

Принята к опубликованию 07.05.2024

Received 11.12.2023

Accepted 07.05.2024