

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ СПЛАВОВ ОЛОВО-КОБАЛЬТ ИЗ ОКСАЛАТНО-АММОНИЙНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Р.Ф. Шеханов, С.Н. Гридчин

Руслан Феликсович Шеханов (ORCID 0000-0002-2317-5327)*

Кафедра технологии керамики и электрохимических производств, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский просп., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: ruslanfelix@yandex.ru*

Сергей Николаевич Гридчин (ORCID 0000-0001-8612-7704)

Кафедра аналитической химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский просп., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: sergei_gridchin@mail.ru

Показана возможность получения качественных электролитических сплавов олово-кобальт из оксалатно-аммонийных электролитов различного состава. Результаты расчета ионных равновесий показывают, что при $pH < 7,5$ поведение системы $Sn^{2+} - Co^{2+} - SO_4^{2-} - C_2O_4^{2-} - NH_3$ определяется главным образом процессами образования оксалатных комплексов олова и кобальта, при этом растворимые бис- и трис-комплексы оказываются доминирующими частицами в широкой области pH . Для исследуемых электролитов характерна высокая поляризуемость в рабочем интервале плотностей тока от 0,5 до 2,0 А/дм², которая наряду с высокой поляризацией способствует образованию мелкокристаллических осадков сплавов олово-кобальт. Установлено, что из исследованных растворов возможно получение доброкачественных осадков сплава в интервале плотностей тока от 0,5 до 2 А/дм². Введение в электролит оксалата аммония, способного образовывать с ионами Sn^{2+} и Co^{2+} устойчивые комплексы, обеспечивает увеличение рабочего интервала pH . Электроосаждение протекает с большой катодной поляризацией, способствующей получению качественных мелкокристаллических покрытий осаждаемых сплавов. Наименьшая скорость коррозии 0,03 мА/см² соответствовала покрытию с высоким содержанием кобальта. Наименьшая разность потенциалов между олово-кобальтовым покрытием и сталью наблюдалась для сплава, полученного из электролита с повышенным содержанием кобальта. Значение ЭДС для других олово-кобальтовых сплавов была выше, в связи с этим скорость коррозии сплавов возрастает. Существенное изменение структуры олово-кобальтовых покрытий происходит при значительном легировании их кобальтом. Наиболее мелкокристаллическая структура сплава была получена из электролита с повышенным содержанием кобальта. Средний диаметр зерен покрытия составляет 0,147 мкм и средний максимальный размер зерен по высоте минимален среди исследованных сплавов и составляет 0,526. При малом легировании покрытий кобальтом диаметр зерен увеличивается до 0,246 мкм и средний максимальный размер зерен покрытия по высоте равен 0,782 мкм. При увеличении содержания кобальта в сплавах олово-кобальт снижается размер зерен по высоте с 2 мкм до 500 нм.

Ключевые слова: электролитические сплавы, поляризационные исследования, электроосаждение, коррозионная устойчивость

Для цитирования:

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.

For citation:

Shekhanov R.F., Gridchin S.N. Electrodeposition of tin-cobalt alloys from ammonium oxalate electrolytes. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 12. P. 111–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6965.

ELECTRODEPOSITION OF TIN-COBALT ALLOYS FROM AMMONIUM OXALATE ELECTROLYTES

R.F. Shekhanov, S.N. Gridchin

Ruslan F. Shekhanov (ORCID 0000-0002-2317-5327)*

Department of Ceramics Technologies and Electrochemical Production, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: ruslanfelix@yandex.ru*

Sergey N. Gridchin (ORCID 0000-0001-8612-7704)

Department of Ceramics Technologies and Electrochemical Production, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: sergei_gridchin@mail.ru

The possibility of obtaining high-quality electrolytic tin-cobalt alloys from oxalate-ammonium electrolytes of various compositions is shown. The results of the calculation of ionic equilibria show that at $\text{pH} < 7.5$, the behavior of the $\text{Sn}^{2+} - \text{Co}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{C}_2\text{O}_4^{2-} - \text{NH}_3$ system is mainly determined by the processes of formation of tin and cobalt oxalate complexes, while soluble bis and tris complexes turn out to be the dominant particles in a wide pH range. The electrolytes under study are characterized by high polarizability in the operating range of current densities from 0.5 to 2.0 A/dm², which, along with high polarization, contributes to the formation of tin-cobalt fine-crystalline precipitates. It was established that it is possible to obtain benign alloy precipitation from the studied solutions in the range of current densities from 0.5 to 2 A/dm². The introduction of ammonium oxalate into the electrolyte, capable of forming stable complexes with Sn^{2+} and Co^{2+} ions, ensures an increase in the working pH interval. Electrodeposition proceeds with a large cathodic polarization, which contributes to the production of high-quality fine-crystalline coatings of the deposited alloys. The lowest corrosion rate of 0.03 mA/cm² corresponded to a coating with a high cobalt content. The smallest potential difference between the tin-cobalt coating and steel was observed for an alloy obtained from an electrolyte with a high cobalt content. The EMF value for other tin-cobalt alloys was higher, and therefore the corrosion rate of the alloys will increase. A significant change in the structure of tin-cobalt coatings occurs when they are significantly alloyed with cobalt. The most finely crystalline structure of the alloy was obtained from an electrolyte with a high cobalt content. The average diameter of the coating grains is 0.147 μm and the average maximum grain size in height is minimal among the studied alloys and is 0.526. With low alloying of cobalt coatings, the grain diameter increases to 0.246 μm and the average maximum grain size of the coating in height is 0.782 μm . With an increase in the cobalt content in tin-cobalt alloys, the grain size decreases in height from 2 μm to 500 nm.

Key words: electrolytic alloys, polarization experiments, protective coatings, electroplating, corrosion resistance

Оловянные покрытия широко используются в промышленности для соединения различных деталей посредством пайки. Для сохранения способности к пайке требуется предотвращение известного процесса перекристаллизации олова, связанного с изменением его модификации при температурах ниже 13,2 °С. Для этого применяют сплавы олова с висмутом, свинцом и некоторыми другими металлами, в частности с никелем [1-5]. Легирование олова указанными металлами устраняет аллотропическое превращение олова и появление «вискеров», что делает возможным применение таких

сплавов в радиоэлектронной промышленности. Перспективным направлением при разработке новых составов растворов для электроосаждения сплавов металлов является использование соединений, образующих растворимые комплексы с ионами осаждаемых металлов [6-12], поскольку электролиты на основе комплексных соединений позволяют получить мелкокристаллические, равномерные по толщине покрытия, обладающие высокой коррозионной стойкостью. Одним из наиболее эффективных комплексобразующих компонентов электролита, в частности, является оксалат аммония, ха-

рактирующийся также возможностью разложения образуемых комплексов в сточных водах. Эффективность применения этого соединения для стабилизации электролита была продемонстрирована нами ранее при электроосаждении защитных покрытий сплавами олово-никель [13-15], цинк-никель [16-18], цинк-кобальт [18,19] и цинк-железо [20]. Целью настоящей работы является исследование возможности использования оксалатно-аммонийных электролитов для получения гальванических покрытий сплавом олово-кобальт.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Растворы электролитов готовили из реактивов марки "ч.д.а." на дистиллированной воде путем растворения каждого компонента электролита в отдельном объеме с последующей фильтрацией и сливом растворов в общую емкость. Корректировку кислотности раствора осуществляли добавлением 25% водного раствора аммиака или 50% раствора серной кислоты. Покрытия осаждали с помощью лабораторного источника тока MPS-3005L-3 Matrix на предварительно подготовленные (обезжиренные и активированные) образцы из стали 08кп. Процесс осаждения проводили при температуре 25 и 50 °С и катодной плотности тока 0,5-2 А/дм². Качество покрытий определяли по внешнему виду и сцеплению с основным металлом соответственно согласно ГОСТ 9.301-86 и ГОСТ 9.302-88. Анализ структуры покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии на приборе SOLVER 47 PRO (режим полуконтактный). Структуру и состав сплавов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH с приставкой для элементного анализа. Потенциодинамические катодные поляризационные кривые снимали с использованием потенциостата Р-30J при температурах 25-50 °С со скоростью развертки потенциала 5 мВ/с. Электродом сравнения служил насыщенный хлоридсеребряный электрод ЭВЛ-1М1, вспомогательным – платиновый. Полученные значения потенциала пересчитывали относительно стандартного водородного электрода (С.В.Э.). Для измерения рН использовали иономер И-160МП. Шероховатость поверхности покрытий определяли с помощью профилометра модели 170622 (ОАО «Калибр», Россия). Коррозионные испытания полученных образцов проводили в 3% растворе NaCl при температуре 25 °С. Методом Розенфельда [21] были получены коррозионные диаграммы для

сплавов олово-кобальт, осажденных из исследуемых оксалатно-аммонийных электролитов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электролитическое осаждение сплавов олово-кобальт из оксалатно-аммонийных электролитов, составы которых приведены в табл. 1, происходит из комплексных соединений. В качестве примера на рис. 1 приведены диаграммы распределения олова и кобальта в электролите №3. Результаты расчета ионных равновесий (выполненного по алгоритму Бринкли с использованием программы RRSU [22]) показывают, что при рН < 7,5 поведение системы $\text{Sn}^{2+} - \text{Co}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{C}_2\text{O}_4^{2-} - \text{NH}_3$ определяется главным образом процессами образования оксалатных комплексов олова и кобальта, при этом растворимые *бис*- и *трис*-комплексы оказываются доминирующими частицами в широкой области рН. Для исследуемых электролитов характерна высокая поляризуемость в рабочем интервале плотностей тока от 0,5 до 2,0 А/дм², которая наряду с высокой поляризацией способствует образованию мелкокристаллических осадков сплавов олово-кобальт. На поляризационных кривых имеются участки предельного тока. Причем эти площадки предельного тока связаны с осаждением олова при образовании сплава олово-кобальт. При уменьшении концентрации олова в электролите в два раза участок предельного тока уже соответствует приблизительно в два раза меньшей плотности тока. При повышении температуры до 50 °С происходит увеличение рабочих катодных плотностей тока приблизительно в два раза, которым соответствуют участки предельной плотности тока, и при этом процесс осаждения сплавов олово-кобальт происходит при менее отрицательных потенциалах (рис. 2, кривые 1'-3').

Таблица 1

Составы электролитов и свойства осаждаемых сплавов олово-кобальт

Table 1. Compositions of electrolytes and properties of tin-cobalt alloys

Содержание, г/л	№1	№2	№3
(NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ ·H ₂ O	80	80	80
SnSO ₄	20	10	10
CoSO ₄ ·7H ₂ O	10	10	20
Шероховатость, мкм	0,456	0,434	0,316
Содержание кобальта в покрытии, %	0,3	0,4	20,8
Плотность тока коррозии, мА/см ²	0,79	0,18	0,03

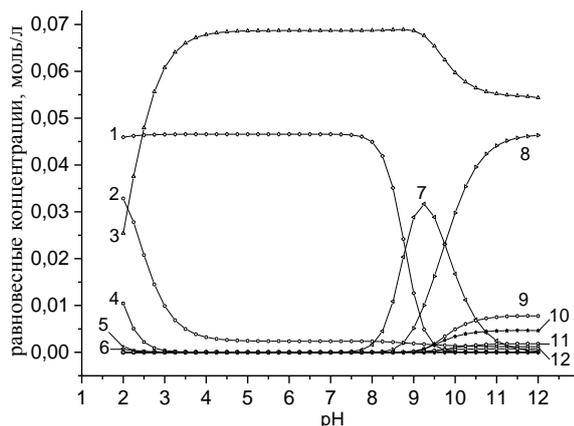


Рис. 1. Диаграмма распределения олова и кобальта в электролите №3: 1 – $\text{Sn}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$; 2 – $\text{Co}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$; 3 – $\text{Co}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{4-}$; 4 – CoC_2O_4 ; 5 – CoSO_4 ; 6 – SnC_2O_4 ; 7 – $\text{Sn}(\text{OH})_2$; 8 – $\text{Sn}(\text{OH})_3^-$; 9 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_5^{2+}$; 10 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_4^{2+}$; 11 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{2+}$; 12 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_3^{2+}$
 Fig. 1. Diagrams for a fractional distribution of tin and cobalt in the electrolyte No 3: 1 – $\text{Sn}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$; 2 – $\text{Co}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$; 3 – $\text{Co}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{4-}$; 4 – CoC_2O_4 ; 5 – CoSO_4 ; 6 – SnC_2O_4 ; 7 – $\text{Sn}(\text{OH})_2$; 8 – $\text{Sn}(\text{OH})_3^-$; 9 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_5^{2+}$; 10 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_4^{2+}$; 11 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{2+}$; 12 – $\text{Co}(\text{NH}_3)_3^{2+}$

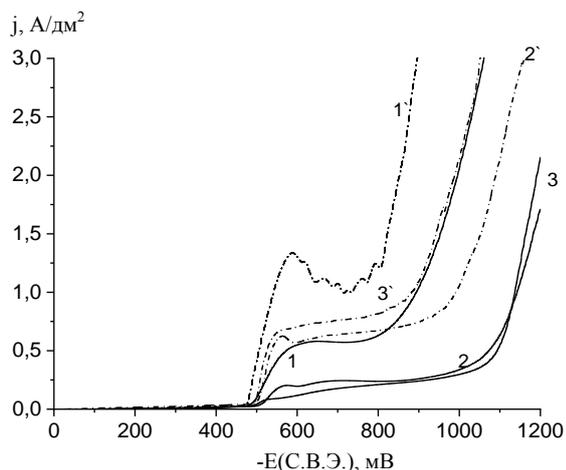


Рис. 2. Потенциодинамические катодные поляризационные кривые, полученные из оксалатно-аммонийных электролитов осаждения сплавов олово-кобальт при 25 °С (1-3) и при 50 °С (1'-3')

Fig. 2. Cathodic polarization curves for the deposition of tin-cobalt alloys from the ammonium oxalate electrolytes at 25 °C (1-3) and 50 °C (1'-3')

В ходе исследования скорости коррозионных процессов образцов Sn-Co сплавов, осажденных на сталь 0,8кп, установлено, что наивысшей скоростью коррозии обладает олово-кобальтовое покрытие, нанесенное из электролита №1 (табл. 1), и скорость коррозии составляет 0,79 mA/cm^2 . Наименьшая скорость коррозии 0,03 mA/cm^2 соответствует покрытию, осажденному из электролита №3. Наименьшая разность потенциалов между олово-кобальтовым покрытием и сталью наблюдалась для сплава, полученного из электро-

лита №3. Значение ЭДС для других олово-кобальтовых сплавов была выше, в связи с этим скорость коррозии сплавов возрастает (рис. 3).

В ходе работы были получены микрофотографии поверхности полученных Sn-Co покрытий. С повышением содержания кобальта в сплавах структура Sn-Co покрытий изменяется. С увеличением процентного содержания кобальта в осадках структура покрытий становится более мелкокристаллической (рис. 4). Средний диаметр зерен уменьшается с 0,252 до 0,147 μm .

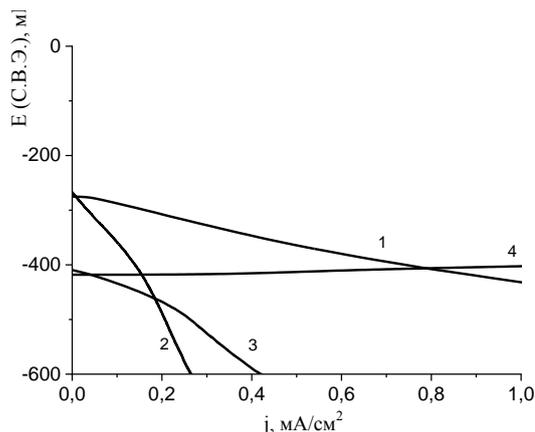


Рис. 3. Коррозионные диаграммы для системы сталь 0.8 кп (сталь) - Sn-Co покрытий, осажденных из электролитов 1-3 (4 – анодная кривая растворения стали 0.8 кп)
 Fig. 3. Corrosion diagrams of system of 08 kp steel - tin-cobalt alloys obtained from solutions 1-3 (4 – anode dissolution curve on a steel electrode)

В табл. 2 приведены результаты исследований структуры покрытий методом атомно-силовой микроскопии. Существенное изменение структуры олово-кобальтовых покрытий происходит при значительном легировании их кобальтом. Наиболее мелкокристаллическая структура сплава была получена из электролита № 3. Средний диаметр зерен покрытия составляет 0,147 μm и средний максимальный размер зерен по высоте минимален среди исследованных сплавов и составляет 0,526. При малом легировании покрытий кобальтом диаметр зерен увеличивается до 0,246 μm и средний максимальный размер зерен по высоте равен 0,782 μm . При увеличении содержания кобальта в сплавах олово-кобальт снижается размер зерен по высоте с 2 μm до 500 нм (рис. 5). Таким образом, результаты выполненных исследований показали, что покрытия с относительно высоким содержанием кобальта имеют высокую коррозионную устойчивость, в том числе, благодаря более мелкокристаллической структуре полученных сплавов олово-кобальт, осажденных из оксалатно-аммонийных электролитов.

Прочность сцепления покрытий сплавами, осажденными из исследованных электролитов, со стальной основой удовлетворяет требованиям ГОСТ 9.302-88. В ходе испытаний, проведенных

путем нанесения сетки царапин и методом изгиба образцов с нанесенными покрытиями, отслаивания покрытий не наблюдалось.

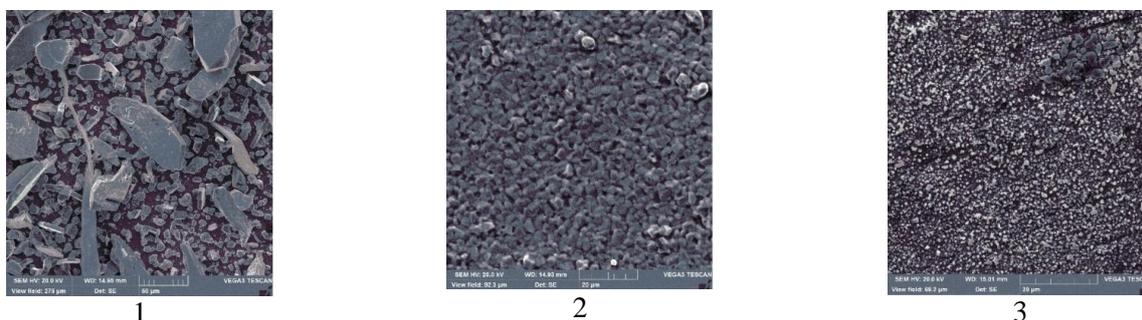


Рис. 4. Микрофотографии поверхности Sn-Co покрытий, полученных из электролитов №№ 1-3 (при 50 °C и $j=1$ A/дм²)
Fig. 4. Micrographs of Sn-Co alloys deposited from electrolyte 1–3 (at 50 °C and $j=1$ A/dm²)

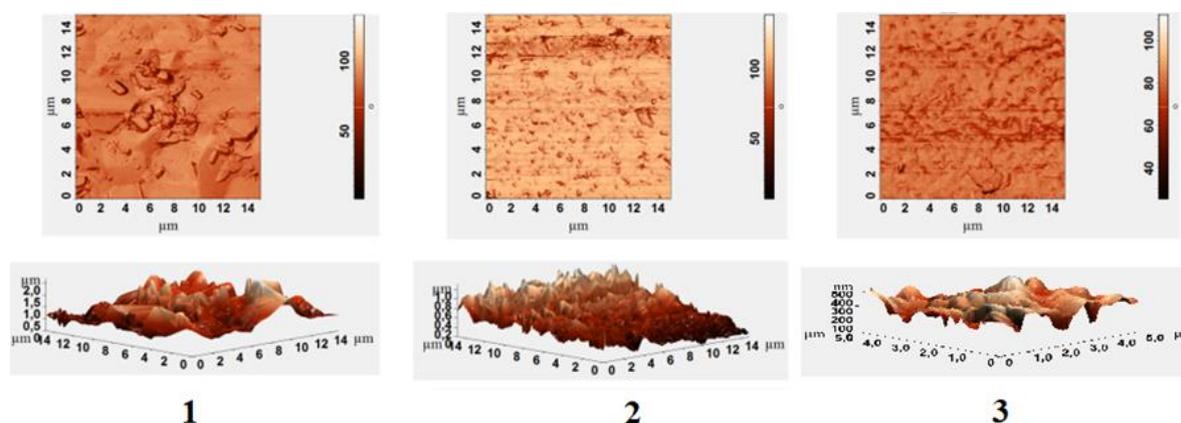


Рис. 5. Микроструктура Sn-Co покрытий, полученных из оксалатно-аммонийных электролитов 1-3
Fig. 5. Microstructure of Sn–Co coatings obtained from electrolytes 1-3

Таблица 2

Параметры зерен кристаллов сплавов олово-кобальт
Table 2. Grain parameters of crystals of tin–cobalt alloys

Электро-лит №	S, мкм ²	Max Z, мкм	Z _{ср} , мкм	P, мкм	D, мкм	l, мкм	b, мкм
1	0,102	0,827	0,782	0,942	0,246	0,411	0,114
2	0,298	0,615	0,586	0,379	0,252	0,267	0,111
3	0,026	0,532	0,526	0,343	0,147	0,237	0,079

Примечание: Параметры зерен кристаллов электролитического сплава олово-кобальт: S – площадь, Max Z – максимальный размер по высоте, Z_{ср} – средний размер по высоте, P – периметр, D – диаметр, l – длина, b – ширина

Note: Parameters of crystals grains of tin–cobalt electrolytic alloy: S – area; Max Z – maximum size in height; Z_{ср} – average size in height; P – perimeter; D – diameter; l – length; b – width

Работа выполнена в рамках Государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-

2023-0010). Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

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

The work was carried out within the framework of the State task for the implementation of research (Subject No. FZZW-2023-0010). The study was carried out using the resources of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Education and Science of Russia, agreement No. 075-15-2021-671).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенин В.В., Спиридонов Б.А., Березина Н.Н., Кочергин А.В. // Технологии в электрон. пром-сти. 2007. № 7. С. 32-34.
2. Lacinjevac U., Jovic B.M., Jovic V.D. // J. Electrochem. Soc. 2012. V. 159. N 5. P. D310-D318. DOI: 10.1149/2.042205JES.

REFERENCES

1. Zenin V.V., Spiridonov B.A., Berezina N.N., Kochergin A.V. // Tekhnol. Electron. Prom-ti. 2007. N 7. P. 32-34 (in Russian).
2. Lacinjevac U., Jovic B.M., Jovic V.D. // J. Electrochem. Soc. 2012. V. 159. N 5. P. D310-D318. DOI: 10.1149/2.042205JES.

3. Jovic B.M., Lanjevac U., Krstaji N.V., Jovic V.D. // *Electrochim. Acta*. 2013. V. 114. P. 813-818. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.06.024.
4. Rudnik E. // *Electroanal. Chem.* 2014. V. 726. P. 97-106. DOI: 10.2478/amm2014-0031.
5. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 37-43. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6556.
6. Винокуров Е.Г., Бондарь В.В. Модельные представления для описания и прогнозирования электроосаждения сплавов. М.: ВИНТИ РАН, 2009. 164 с.
7. Kahoul A., Azizi F., Bouaoud M. // *Trans. IMF*. 2017. V. 95. N 2. P. 106-113. DOI: 10.1080/00202967.2017.1265766.
8. Ченцова Е.В., Почкина С.Ю., Соловьева Н.Д., Лопухова М.И. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 4. С. 128-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20196204.5833.
9. Гридчин С.Н., Шеханов Р.Ф. // *Журн. прикл. химии*. 2019. Т. 92. № 9. С. 1162-1169. DOI: 10.1134/S107042721909009X.
10. Гридчин С.Н., Шеханов Р.Ф., Балмасов А.В. // *Физикохимия пов-ти и защита матер.* 2020. Т. 56. № 2. С. 186-191. DOI: 10.1134/s2070205120020070.
11. Мухаметова Г.М., Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Васильев В.В., Скопинцев В.Д. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 88-97. DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6359.
12. Винокуров Е.Г., Гридчин С.Н., Мухаметова Г.М., Скопинцев В.Д., Бурухина Т.Ф. // *Теор. основы хим. технол.* 2021. Т. 55. № 5. С. 567-577. DOI: 10.31857/S0040357121040163.
13. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В. // *Электрон. обраб. материалов*. 2016. Т. 52. № 2. С. 27-31. DOI: 10.3103/S1068375516020125.
14. Шеханов Р.Ф. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 10. С. 75-81. DOI: 10.6060/tcct.20176010.5605.
15. Шеханов Р.Ф., Кузьмин С.М., Балмасов А.В., Гридчин С.Н. // *Электрохимия*. 2017. Т. 53. № 11. С. 1442-1449. DOI: 10.7868/S0424857017110056.
16. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В. // *Электрохимия*. 2018. Т. 54. № 4. С. 408-415. DOI: 10.1134/s1023193518040079.
17. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В. // *Журн. физ. химии*. 2022. Т. 96. № 6. С. 811-815. DOI: 10.31857/S0044453722060255.
18. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Братков И.В., Ершова Т.В., Донцов М.Г. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 151-158. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6841j.
19. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В. // *Физикохимия пов-ти и защита матер.* 2017. Т. 53. № 3. С. 316-320. DOI: 10.1134/s2070205117030224.
20. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Балмасов А.В., Мокрецов Н.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 72-77. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6449.
21. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия. 1969. 448 с.
22. Васильев В.П., Бородин В.А., Козловский Е.В. Применение ЭВМ в химико-аналитических расчетах. М.: Высш. Шк. 1993. 112 с.
3. Jovic B.M., Lanjevac U., Krstaji N.V., Jovic V.D. // *Electrochim. Acta*. 2013. V. 114. P. 813-818. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.06.024.
4. Rudnik E. // *Electroanal. Chem.* 2014. V. 726. P. 97-106. DOI: 10.2478/amm2014-0031.
5. Shekhanov R.F., Gridchin S.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 37-43. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6556.
6. Vinokurov E.G., Bondar V.V. Model Concepts for Describing and Prognosticating the Electrodeposition of Alloys. M.: VINITI Ross. Akad. Nauk. 2009. 164 p. (in Russian).
7. Kahoul A., Azizi F., Bouaoud M. // *Trans. IMF*. 2017. V. 95. N 2. P. 106-113. DOI: 10.1080/00202967.2017.1265766.
8. Chentsova E.V., Pochkina S.Yu., Solovyova N.D., Lopukhova M.I. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 4. P. 128-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20196204.5833.
9. Gridchin S.N., Shekhanov R.F. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92. N 9. P. 1244-1250. DOI: 10.1134/S107042721909009X.
10. Gridchin S.N., Shekhanov R.F., Balmasov A.V. // *Protect. Metals Phys. Chem. Surf.* 2020. V. 56. N 2. P. 363-368. DOI: 10.1134/s2070205120020070.
11. Mukhametova G.M., Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Vasil'ev V.V., Skopintsev V.D. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 88-97. DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6359.
12. Vinokurov E.G., Gridchin S.N., Mukhametova G.M., Skopintsev V.D., Burukhina T.F. // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55. N 5. P. 870-879. DOI: 10.1134/S0040579521040345.
13. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V. // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2016. V. 52. N 2. P. 152-156. DOI: 10.3103/S1068375516020125.
14. Shekhanov R.F. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2017. V. 60. N 10. P. 75-81. DOI: 10.6060/tcct.20176010.5605.
15. Shekhanov R.F., Kuz'min S.M., Balmasov A.V., Gridchin S.N. // *Russ. J. Electrochem.* 2017. V. 53. N 11. P. 1274-1280. DOI: 10.1134/S1023193517110131.
16. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V. // *Russ. J. Electrochem.* 2018. V. 54. N 4. P. 355-362. DOI: 10.1134/s1023193518040079.
17. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V. // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2022. V. 96. N 6. P. 1174-1179. DOI: 10.1134/S0036024422060243.
18. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Bratkov I.V., Ershova T.V., Dontsov M.G. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 151-158. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6841j.
19. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V. // *Protect. Metals Phys. Chem. of Surf.* 2017. V. 53. N 3. P. 483-487. DOI: 10.1134/s2070205117030224.
20. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V., Mokretsov N.E. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 72-77. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6449.
21. Rozenfel'd I.L. Corrosion and Protection of Metals. M.: Metallurgiya. 1969. 448 p. (in Russian).
22. Vasil'ev V.P., Borodin V.A., Kozlovskii E.V. Application of Computers in Chemical Analytical Calculations. M.: Vyssh. shk. 1993. 112 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 13.02.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 30.03.2023