

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЕРЕБРА В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРАХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.С. Белова, А.В. Балмасов

Валерия Сергеевна Белова *, Анатолий Викторович Балмасов

Кафедра технологии электрохимических производств, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: valeria_bel@mail.ru*, balmasov@isuct.ru

В статье приведены результаты исследования электрохимического поведения серебра в растворах 0,9% хлорида натрия, 0,5% хлористоводородной кислоты и 0,9% растворе хлорида натрия с добавкой 1,5% лимонной кислоты в условиях циклической поляризации. Установлено, что при циклической поляризации в растворе NaCl хлорид серебра, образующийся на поверхности в период анодного полуцикла, полностью восстанавливается в период катодной поляризации. Это подтверждается равенством количества электричества, прошедшего за анодный и катодный полуциклы. Применение кислых растворов способствует ускорению процесса анодного окисления серебра. В ходе циклирования потенциала наблюдается увеличение анодных и катодных токов вследствие формирования более развитой поверхности электрода. С наибольшей интенсивностью окислительно-восстановительные процессы протекают в электролите на основе хлорида натрия с добавкой лимонной кислоты. Это связано со стадийным протеканием анодного окисления серебра с образованием в качестве промежуточного продукта цитрата серебра, обладающего большей растворимостью по сравнению с AgCl. Исследования электродов методом сканирующей электронной микроскопии показали, что использование для электрохимической модификации серебра изученных хлоридсодержащих растворов обеспечивает формирование на поверхности серебра кристаллов AgCl размером от 0,2 до 0,5 мкм. Серебряные электроды, поверхность которых подвергалась электрохимической модификации в электролите на основе хлорида натрия с добавкой лимонной кислоты, характеризуются стабильным электродным потенциалом сразу после погружения в раствор, моделирующий биологическую среду человека. Это имеет важное значение при регистрации биопотенциалов с применением коаксиальных игольчатых электродов с центральным элементом из серебра.

Ключевые слова: серебро, хлоридсодержащие растворы, анодное окисление, циклическая вольт-амперометрия, хронопотенциометрия

ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF SILVER IN CHLORIDE-CONTAINING SOLUTIONS AT CYCLIC POLARIZATION

V.S. Belova, A.V. Balmasov

Valeria S. Belova*, Anatoly V. Balmasov

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

E-mail: valeria_bel@mail.ru*, balmasov@isuct.ru

The article presents the results of a study of the electrochemical behavior of silver in solutions of 0.9% sodium chloride, 0.5% hydrochloric acid and 0.9% sodium chloride with the addition of 1.5% citric acid under conditions of cyclic polarization. It was found that, upon cyclic polarization in a NaCl solution, silver chloride, which forms on the surface during the anodic half-cycle, is completely reduced during the cathodic polarization period. This is confirmed by the equality of the

amount of electricity passed during the anode and cathodic half-cycles. The use of acidic solutions accelerates the process of anodic oxidation of silver. During the cycling of the potential, an increase in anodic and cathodic currents is observed due to the formation of a more developed electrode surface. The most intense redox processes occur in an electrolyte based on sodium chloride with the addition of citric acid. This is due to the staged occurrence of the anodic oxidation of silver with the formation of silver citrate as an intermediate product, which has a higher solubility in comparison with AgCl. Studies of electrodes by scanning electron microscopy have shown that the use of the studied chloride-containing solutions for the electrochemical modification of silver provides the formation of AgCl crystals with a size of 0.2 to 0.5 μm on the silver surface. Silver electrodes, the surface of which was subjected to electrochemical modification in an electrolyte based on sodium chloride with the addition of citric acid, are characterized by a stable electrode potential immediately after immersion in a solution that simulates the human biological environment. This is important when registering biopotentials using coaxial needle electrodes with a silver central element.

Key words: silver, chloride-containing solutions, anodic oxidation, cyclic voltammetry, chronopotentiometry

Для цитирования:

Белова В.С., Балмасов А.В. Электрохимическое поведение серебра в хлоридсодержащих растворах при циклической поляризации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 11. С. 50–56

For citation:

Belova V.S., Balmasov A.V. Electrochemical behavior of silver in chloride-containing solutions at cyclic polarization. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 11. P. 50–56

ВВЕДЕНИЕ

При проведении функциональной диагностики для регистрации биопотенциалов в качестве датчиков широко используют электроды из серебра с нанесенным на его поверхность слоем хлорида серебра. При их контакте с раствором, содержащим хлорид-ионы, образуется хлоридсеребряный электрод, характеризующийся хорошей обратимостью и низким сопротивлением. Хлоридсеребряные электроды получили широкое применение как в электрохимических измерениях, так и в медицинской диагностике. Применение электродов, площадь контакта которых с раствором составляет десятки квадратных миллиметров и более, обеспечивает получение стабильных хорошо воспроизводимых результатов. Уменьшение рабочей поверхности приводит к росту сопротивления электродов и повышению уровня шумов, искажающих регистрируемый потенциал. Например, рабочая поверхность центрального элемента коаксиальных игольчатых электродов составляет 0,04...0,07 мм^2 , поэтому их сопротивление достигает десятков кОм [1-10].

Во время записи нейронных сигналов ключевое значение имеет снижение импеданса и уровня шума, т.к. речь идет о сигналах, которые трудно выделить из-за их малой амплитуды. Также при измерении малых потенциалов особые затруднения возникают в связи с поляризацией электродов [10].

В работах [1-4] показано, что стабильность работы микроэлектродов может быть повышена путем физикохимической обработки их поверхности, обеспечивающей увеличение истинной поверхности и повышение обратимости. Одним из методов модификации поверхности металлов является их анодное окисление в растворах электролитов, обеспечивающее формирование на поверхности труднорастворимых оксидных или солевых слоев [11-15]. Применение серебра в качестве центрального элемента игольчатых электродов представляется перспективным, т.к. большинство соединений серебра плохо растворимы в воде. Закономерности анодного окисления серебра, сопровождающегося образованием на его поверхности труднорастворимых соединений, исследованы в работах [16-21].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение электрохимического поведения серебра осуществляли в стеклянной ячейке. В качестве электролитов использовали 0,9% раствор хлорида натрия, моделирующий биологическую среду человека, 0,9% раствор хлорида натрия с добавкой 1,5% лимонной кислоты и 0,5% раствор хлористоводородной кислоты. Для приготовления рабочих растворов использовали реактивы марки «х.ч.» и деионизованную воду. При измерениях бесточковых потенциалов использовали двухэлектродную схему подключения, при хронопотенциометрических исследованиях при пропускании тока –

трехэлектродную. Регулирование тока, протекающего в ячейке, и регистрацию потенциала рабочего электрода осуществляли при помощи Потенциостата Р-40Х.

В качестве рабочего электрода использовали стержень из серебра марки Ср 99,99 ГОСТ 6836-2002, запрессованный во фторопластовую оболочку. Рабочей поверхностью служил торец стержня, площадь которого составляла 0,08 см². Перед проведением измерений рабочую поверхность полировали пастой на основе оксида алюминия «DIALUX BLANC», обезжиривали этиловым спиртом и промывали деионизованной водой. В качестве электрода сравнения использовали насыщенный хлоридсеребряный электрод, вспомогательным электродом служила платиновая проволока. Измеренные значения потенциалов пересчитывали относительно водородного электрода.

Структуру поверхностного слоя, формирующегося на электроде при электрохимической обработке, исследовали с помощью электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования влияния содержания хлоридсодержащего компонента электролита на свойства формирующегося конверсионного покрытия было установлено, что оптимальная концентрация NaCl или HCl составляет 0,15 моль/л [22]. Увеличение концентрации электролита представляется нецелесообразным, поскольку с ростом содержания хлорид-ионов в растворе увеличивается растворимость хлорида серебра. Помимо этого, использование растворов с повышенной концентрацией приводит к необходимости увеличения продолжительности отмывки модифицированной поверхности электрода от остатков электролита. Уменьшение концентрации электролита приводит к увеличению его электрического сопротивления и необходимости применения повышенных напряжений для поддержания требуемой анодной плотности тока.

Электрохимическое поведение серебра исследовали в условиях циклической поляризации, способствующей формированию более развитой поверхности. Поляризацию начинали с анодного цикла, скорость развертки потенциала составляла 10 мВ/с. Серебро в растворе хлорида натрия пассивируется довольно значительно (рис. 1), это обусловлено низкой растворимостью хлорида серебра, блокирующего поверхность электрода.

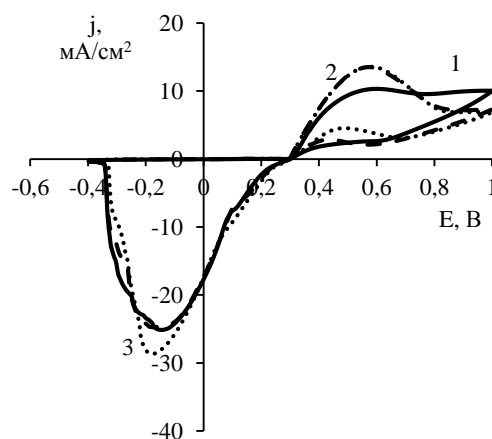


Рис. 1. Циклические поляризационные кривые, полученные на электроде из серебра в 0,9% растворе NaCl. $t = 25$ °С. Номера на рисунке соответствуют номерам циклов
Fig. 1. Cyclic polarization curves obtained on a silver electrode in 0.9% NaCl solution. $t = 25$ °С. The numbers in the figure correspond to the cycle numbers

Катодные ветви поляризационных кривых соответствуют протеканию процесса восстановления поверхностного слоя AgCl. После его полного восстановления катодный ток падает до нуля. Количество электричества, протекающего за время анодного и катодного цикла, практически одинаково, что свидетельствует об обратимом протекании процессов окисления серебра и восстановления его хлорида.

При анодном окислении серебра в растворе соляной кислоты спад тока после достижения анодного максимума происходит быстрее, чем в растворе NaCl (рис. 2). Увеличение катодных и анодных токов в процессе циклирования связано с формированием более развитой поверхности электрода. На катодных участках поляризационных кривых при потенциалах отрицательнее -0,2 В наблюдается увеличение катодного тока. Этот ток может быть связан с протеканием реакции катодного выделения водорода, потенциал которой с увеличением кислотности раствора смещается в область более положительных значений.

В [22, 23] было показано, что процессы модификации серебра в растворах хлорида натрия и хлористоводородной кислоты имеют некоторые недостатки. После анодной обработки серебра в нейтральном растворе NaCl наблюдается повышенный уровень осцилляций потенциала, а применение растворов HCl приводит к увеличению содержания оксида серебра в поверхностном слое. Поэтому было исследовано электрохимическое поведение серебра в слабокислом растворе, содержащем хлорид натрия и лимонную кислоту, которая является безвредным для человека соединением.

Как показано на рис. 3, при использовании раствора хлорида натрия с добавкой лимонной кислоты характер вольтамперограмм в целом не меняется, однако наблюдается заметный рост как анодных, так и катодных токов.

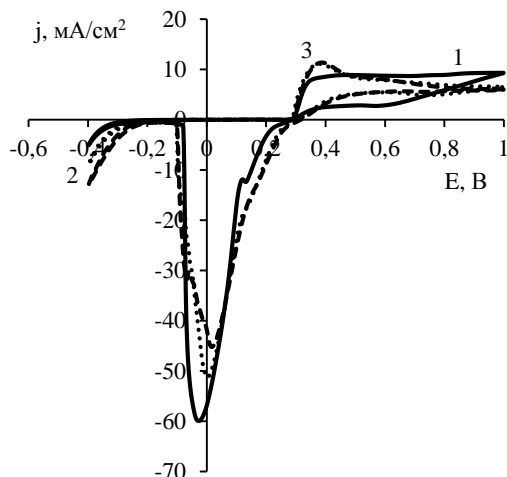


Рис. 2. Циклические поляризационные кривые, полученные на электроде из серебра в 0,5% растворе HCl. $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 2. Cyclic polarization curves obtained on a silver electrode in 0.5% HCl solution. $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

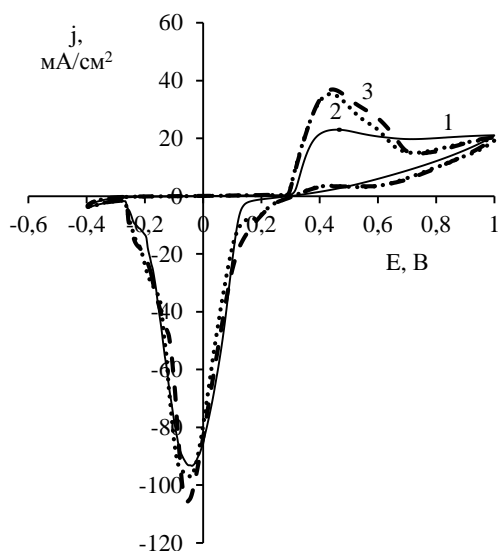
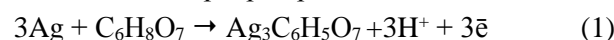


Рис. 3. Циклические поляризационные кривые, полученные на электроде из серебра в растворе, содержащем 0,9% NaCl и 1,5% лимонной кислоты. $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 3. Cyclic polarization curves obtained on a silver electrode in a solution containing 0.9% of NaCl and 1.5% of citric acid. $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Лимонная кислота облегчает процесс анодного окисления серебра вследствие образования более растворимого по сравнению с хлоридом цитрата серебра в качестве промежуточного продукта электрохимической реакции. Растворимость лимоннокислого серебра составляет 0,028 г/100 г

воды [24], что намного превышает растворимость хлорида серебра, для которого $PR = 1,78 \cdot 10^{-10}$ [25]. В присутствии лимонной кислоты процесс анодного окисления серебра протекает стадийно:



Облечение анодного окисления серебра обеспечивает формирование более развитой поверхности электрода, что должно способствовать снижению его полного сопротивления и уровня шумов при электромиографических измерениях.

Следующим этапом работы было изучение стабильности потенциала электрохимически модифицированных электродов при их выдержке в 0,9% растворе хлорида натрия, моделирующем биологическую среду человека, при температуре $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как видно из рис. 4, в начальный момент времени потенциал электродов, которые обрабатывали в растворах NaCl и HCl, немного возрастает. Потенциал электрода, обработанного в электролите, содержащем хлорид натрия с добавкой лимонной кислоты, с момента погружения в раствор имеет постоянное значение. Это играет важную роль при регистрации биопотенциаллов, т.к. согласно требованиям ГОСТ 25995-83, предъявляемым к игольчатым электродам, время их готовности при подключении к электромиографу должно составлять не более 1 с.

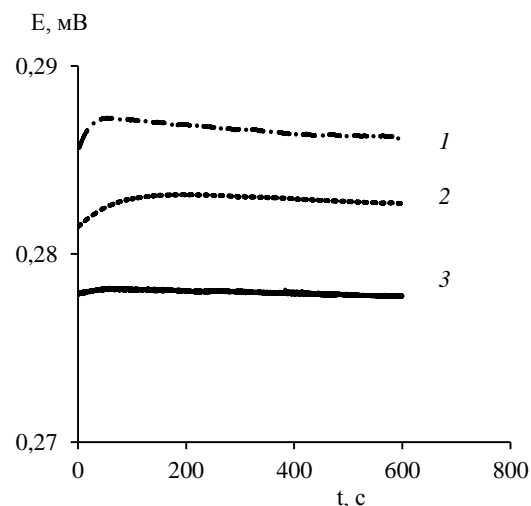


Рис. 4. Зависимость потенциала электрода из серебра от времени выдержки в 0,9 % растворе хлорида натрия при температуре $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ после электрохимической обработки в растворах 0,5% HCl (1), 0,9% NaCl (2) и 0,9% NaCl + 1,5% лимонной кислоты (3)

Fig. 4. Dependence of the potential of the silver electrode on the exposure time in 0.9% sodium chloride solution at a temperature of $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ after electrochemical treatment in solutions of 0.5% HCl (1), 0.9% NaCl (2) and 0.9% NaCl + 1.5% citric acid (3)

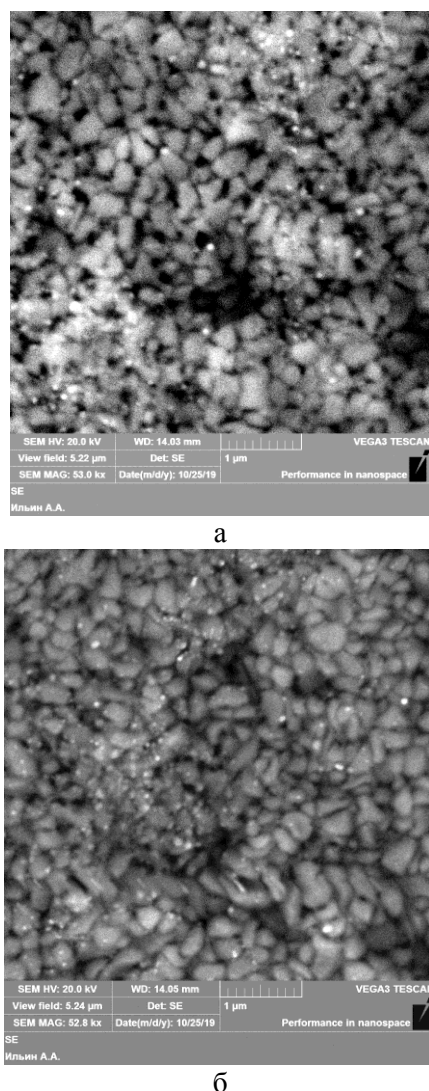


Рис. 5. СЭМ изображения поверхности серебряного электрода после электрохимической обработки при плотности тока 5 мА/см² в течение 3 мин в растворах: а - 0,9% NaCl, б - 0,9% NaCl + 1,5% лимонной кислоты. Масштаб 1 мкм
 Fig. 5. SEM images of the silver electrode surface after electrochemical treatment at a current density of 5 mA/cm² for 3 min in solutions: a - 0.9% NaCl, b - 0.9% NaCl + 1.5% citric acid. Scale is 1 μm

Исследования поверхности электродов после электрохимической обработки показали, что использование в качестве электролита для электрохимической модификации серебра нейтрального

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kim J.-E., Seok J.M., Ahn S.-W., Yoon B.-N., Lim Y.-M., Kim K.-K., Kwon K.-H., Park K.D., Suh B.C.** Basic concepts of needle electromyography. *Ann. Clin. Neurophysiol.* 2019. V. 21. N 1. P. 7-15. DOI: 10.14253/acn.2019.21.1.7.
2. **Fontes M.B.A.** Electrodes for bio-application: Recording and stimulation. *J. Phys.: Conf. Ser. Inst. Phys. Publ.* 2013. V. 421. N 1. P. 11-19. DOI: 10.1088/1742-6596/421/1/012019.

раствора NaCl и раствора хлорида натрия с добавкой лимонной кислоты обеспечивает достаточно близкие результаты с точки зрения формирующейся структуры поверхностного слоя (рис. 5). Размер кристаллов AgCl, образовавшихся на поверхности серебра, находится в диапазоне от 0,2 до 0,5 мкм. Высокая степень развитости поверхности должна способствовать уменьшению импеданса границы раздела электрод-раствор.

Предпочтение следует отдать обработке в растворе хлорида натрия с добавкой лимонной кислоты. Электроды, рабочая поверхность которых была подвергнута анодной модификации в слабо-кислом электролите, характеризуются большей стабильностью потенциала и меньшим уровнем шумов. При анодной обработке серебряных электродов в растворах хлористоводородной кислоты в состав поверхностного слоя хлорида серебра включается оксид серебра [22], что приводит к снижению стабильности регистрируемых потенциалов. При этом, в отличие от растворов хлористоводородной кислоты, электролиты на основе хлорида натрия удобнее в эксплуатации, т.к. безвредны для человека и окружающей среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90203.

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

The reported study was funded by RFBR according to the research project №20-33-90203.

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

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

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

REFERENCES

1. **Kim J.-E., Seok J.M., Ahn S.-W., Yoon B.-N., Lim Y.-M., Kim K.-K., Kwon K.-H., Park K.D., Suh B.C.** Basic concepts of needle electromyography. *Ann. Clin. Neurophysiol.* 2019. V. 21. N 1. P. 7-15. DOI: 10.14253/acn.2019.21.1.7.
2. **Fontes M.B.A.** Electrodes for bio-application: Recording and stimulation. *J. Phys.: Conf. Ser. Inst. Phys. Publ.* 2013. V. 421. N 1. P. 11-19. DOI: 10.1088/1742-6596/421/1/012019.

3. **Albulbul A.** Evaluating major electrode types for idle biological signal measurements for modern medical technology. *Bioeng. MDPI AG*. 2016. V. 3. N 3. P. 2371-2382. DOI: 10.3390/bioengineering3030020
4. **Mills K.R.** The basics of electromyography. *Neurol. Pract.* 2005. V. 76. N 2. P. 32-35. DOI: 10.1136/jnnp.2005.069211.
5. **Johnson M.D., Otto K.J., Williams J.C., Kipke D.R.** Bias voltages at microelectrodes change neural interface properties in vivo. *Ann. Internat. Conf. of the IEEE Eng. in Med. and Biol - Proc.* 2004. V. 26. N 6. P. 4103-4106. DOI: 10.1109/IEMBS.2004.1404145.
6. **Kalvøy H., Tronstad C., Nordbotten B.J., Grimnes S., Martinsen Ø.G.** Electrical impedance of stainless steel needle electrodes. *Ann. Biomed. Eng.* 2010. V. 38. N 7. P. 2371-2382. DOI: 10.1007/s10439-010-9989-2.
7. **Kalvøy H., Frich L., Grimnes S., Martinsen Ø.G., Hol P.K., Stubhaug A.** Impedance-based tissue discrimination for needle guidance. *Physiol. Meas.* 2009. V. 30. N 2. P. 129-140. DOI: 10.1088/0967-3334/30/2/002.
8. **Weiland J.D., Anderson D.J.** Chronic neural stimulation with thin-film, iridium oxide electrodes. *IEEE Trans. Biomed. Eng. IEEE.* 2000. V. 47. N 7. P. 911-918. DOI: 10.1109/10.846685.
9. **Meyer R.D., Cogan S.F., Nguyen T.H., Rauh R.D.** Electrodeposited iridium oxide for neural stimulation and recording electrodes. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2001. V. 9. N 1. P. 2-11. DOI: 10.1109/7333.918271.
10. **Lee H.J., DeLisa J.A.** Manual of nerve conduction study and surface anatomy for needle electromyography. Lippincott Wilkins and Williams. 2005. 301 p.
11. **Kal'nyi D.B., Kokovkin V.V., Mironov I.V.** On Anodic Dissolution of Silver Coatings Deposited on Base Metals. *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 1. P. 57-61. DOI: 10.1134/S1070427212010119.
12. **Vvedenskii A., Grushevskaya S., Kudryashov D., Kuznetsova T.** Kinetic peculiarities of anodic dissolution of silver and Ag–Au alloys under the conditions of oxide formation. *Corros. Sci.* 2007. V. 49. P. 4523-4541. DOI: 10.1016/j.corsci.2007.03.046.
13. **Перельгин Ю.П., Киреев С.Ю.** О зависимости потенциала начала пассивации серебра при анодной его поляризации от состава раствора. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2019. Т. 27. Вып. 3. С. 15-19. DOI: 10.47188/0869-5326_2019_27_3_15.
14. **Bayesov A., Tuleshova E., Tukibayeva A., Aibolova G., Baineveva F.** Electrochemical Behavior of Silver Electrode in Sulphuric Acidic Solution During Anodic Polarization. *Oriental J. Chem.* 2015. V. 31. N 4. P. 1867-1872. DOI: 10.13005/ojc/310403.
15. **Шибяев Б.А., Белова В.С., Балмасов А.В.** Влияние условий обработки на показатели процесса электрохимического полирования легированных сталей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 64-71. DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5665.
16. **Birss V.I., Smith C.K.** The anodic behavior of silver in chloride solutions-I. The formation and reduction of thin silver chloride films. *Electrochim. Acta.* 1987. V. 32. N 2. P. 259-268. DOI: 10.1016/0013-4686(87)85033-8.
17. **Giles R.D.** The anodic behaviour of silver single crystal electrodes in concentrated chloride solutions. *J. Electroanal. Chem.* 1970. V. 27. N 1. P. 11-19. DOI: 10.1016/S0022-0728(70)80198-X.
3. **Albulbul A.** Evaluating major electrode types for idle biological signal measurements for modern medical technology. *Bioeng. MDPI AG*. 2016. V. 3. N 3. P. 2371-2382. DOI: 10.3390/bioengineering3030020
4. **Mills K.R.** The basics of electromyography. *Neurol. Pract.* 2005. V. 76. N 2. P. 32-35. DOI: 10.1136/jnnp.2005.069211.
5. **Johnson M.D., Otto K.J., Williams J.C., Kipke D.R.** Bias voltages at microelectrodes change neural interface properties in vivo. *Ann. Internat. Conf. of the IEEE Eng. in Med. and Biol - Proc.* 2004. V. 26. N 6. P. 4103-4106. DOI: 10.1109/IEMBS.2004.1404145.
6. **Kalvøy H., Tronstad C., Nordbotten B.J., Grimnes S., Martinsen Ø.G.** Electrical impedance of stainless steel needle electrodes. *Ann. Biomed. Eng.* 2010. V. 38. N 7. P. 2371-2382. DOI: 10.1007/s10439-010-9989-2.
7. **Kalvøy H., Frich L., Grimnes S., Martinsen Ø.G., Hol P.K., Stubhaug A.** Impedance-based tissue discrimination for needle guidance. *Physiol. Meas.* 2009. V. 30. N 2. P. 129-140. DOI: 10.1088/0967-3334/30/2/002.
8. **Weiland J.D., Anderson D.J.** Chronic neural stimulation with thin-film, iridium oxide electrodes. *IEEE Trans. Biomed. Eng. IEEE.* 2000. V. 47. N 7. P. 911-918. DOI: 10.1109/10.846685.
9. **Meyer R.D., Cogan S.F., Nguyen T.H., Rauh R.D.** Electrodeposited iridium oxide for neural stimulation and recording electrodes. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2001. V. 9. N 1. P. 2-11. DOI: 10.1109/7333.918271.
10. **Lee H.J., DeLisa J.A.** Manual of nerve conduction study and surface anatomy for needle electromyography. Lippincott Wilkins and Williams. 2005. 301 p.
11. **Kal'nyi D.B., Kokovkin V.V., Mironov I.V.** On Anodic Dissolution of Silver Coatings Deposited on Base Metals. *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 1. P. 57-61. DOI: 10.1134/S1070427212010119.
12. **Vvedenskii A., Grushevskaya S., Kudryashov D., Kuznetsova T.** Kinetic peculiarities of anodic dissolution of silver and Ag–Au alloys under the conditions of oxide formation. *Corros. Sci.* 2007. V. 49. P. 4523-4541. DOI: 10.1016/j.corsci.2007.03.046.
13. **Perelygin Yu.P., Kireev S.Yu.** Depending on the potential of the beginning of passivation of silver during anodic polarity from composition of the solution. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2019. V. 27. N 3. P. 15-19 (in Russian). DOI: 10.47188/0869-5326_2019_27_3_15.
14. **Bayesov A., Tuleshova E., Tukibayeva A., Aibolova G., Baineveva F.** Electrochemical Behavior of Silver Electrode in Sulphuric Acidic Solution During Anodic Polarization. *Oriental J. Chem.* 2015. V. 31. N 4. P. 1867-1872. DOI: 10.13005/ojc/310403.
15. **Shibaev B.A., Belova V.S., Balmasov A.V.** The influence of processing conditions on the performance of the electrochemical polishing of alloy steels. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2018. V. 61. N 4-5. P. 64-71 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5665.
16. **Birss V.I., Smith C.K.** The anodic behavior of silver in chloride solutions-I. The formation and reduction of thin silver chloride films. *Electrochim. Acta.* 1987. V. 32. N 2. P. 259-268. DOI: 10.1016/0013-4686(87)85033-8.
17. **Giles R.D.** The anodic behaviour of silver single crystal electrodes in concentrated chloride solutions. *J. Electroanal. Chem.* 1970. V. 27. N 1. P. 11-19. DOI: 10.1016/S0022-0728(70)80198-X.

18. Гришина Е.П., Удалова А.М., Румянцев Е.М. Анодное окисление серебра в концентрированных растворах серной кислоты. *Электрохимия*. 2003. Т. 39. Вып. 8. С. 1003-1007. DOI: 10.1023/A:1025172609768.
19. Балмасов А.В., Чашина Е.Н. Анодное поведение сплава серебра с медью в водно-органических растворах тиоцианата калия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2009. Т. 52. Вып. 2. С. 57-61.
20. Семенов В.Е., Балмасов А.В. Пассивация серебра и сплава СrМ925 серосодержащим ингибитором. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2011. Т. 54. Вып. 11. С. 77-80.
21. Лесных Н.Н., Маршаков И.К., Волкова Л.Е., Тутукина Н.М. Анодное окисление и коррозия серебра в хлоридных средах. *Конденсир. среды и межфаз. границы*. 2006. Т. 8. Вып. 2. С. 125-130.
22. Белова В.С., Балмасов А.В. Исследование электрохимического поведения серебра в хлорид содержащих растворах. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2020. Т. 28. Вып. 4. С. 20-26. DOI: 10.47188/0869-5326_2020_28_4_20.
23. Белова В.С., Балмасов А.В. Электрохимическая модификация поверхности серебра в хлоридсодержащих растворах. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2021. Т. 29. Вып. 2. С. 11-17. DOI: 10.47188/0869-5326_2021_29_2_11.
24. Справочник химика. Т. 2. Основные свойства неорганических и органических соединений. М.-Л.: Химия. 1964. 1162 с.
25. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия. 1989. 448 с.
18. Grishina E.P., Udalova A.M., Rumyantsev E.M. Anodic oxidation of silver alloys in silver alloys in concentrated sulfuric acid solutions. *Russ. J. Electrochem.* 2003. V. 39. N 8. P. 903-906. DOI: 10.1023/A:1025172609768.
19. Balmasov A.V., Chashina E.N. Anodic behavior of a silver-copper alloy in aqueous-organic solutions of potassium thiocyanate. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2009. V. 52. N 2. P. 57-61 (in Russian).
20. Semenov V.E., Balmasov A.V. Passivation of silver and alloy SRM925 with a sulfur-containing inhibitor. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2011. V. 54. N 3. P. 77-80 (in Russian).
21. Lesnykh N.N., Marshakov I.K., Volkova L.E., Tutukina N.M. Anodic dissolution and corrosion of silver in acidic media. *Kondens. Sredy Mezhfaz. Granitsy*. 2006. V. 8. N 2. P. 125-130.
22. Belova V.S., Balmasov A.V. Study of the electrochemical behavior of silver in chloride-containing solutions. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2020. V. 28. N 4. P. 20-26 (in Russian). DOI: 10.47188/0869-5326_2020_28_4_20.
23. Belova V.S., Balmasov A.V. Electrochemical modification of silver surface in chloride-containing solution. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2021. V. 29. N 2. P. 11-17 (in Russian). DOI: 10.47188/0869-5326_2021_29_2_11.
24. Chemist's Handbook. V. 2. Basic properties of inorganic and organic compounds. M.-L.: Khimiya. 1964. 1162 p. (in Russian).
25. Lurie Yu.Yu. Analytical Chemistry Handbook. M.: Khimiya. 1989. 448 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 21.05.2021
Принята к опубликованию 20.07.2021

Received 21.05.2021
Accepted 20.07.2021