

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ГРАФИТОМ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРЯНОЙ МАТРИЦЫ

И.В. Братков, А.В. Балмасов, М.Г. Донцов, О.В. Лефедова, Т.В. Ершова, Л.Т. Манукян

Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: maxdon79@yandex.ru

В данной работе исследовано влияние добавки модифицированного диспергированного графита (МДГ) в синеродистороданистом электролите на процесс получения композиционных покрытий на основе серебряной матрицы. Модифицированный диспергированный графит получали электрохимическим способом в смеси серной и азотной кислот. Рентгенофазовым анализом установлено, что полученная смесь состоит из 50% окисленного и 50% неокисленного графита. Методом энергодисперсионной спектроскопии установлено, что содержание углерода в композиционном серебряном покрытии растет с увеличением концентрации дисперсной фазы графита в рабочем электролите и повышением плотности тока при электроосаждении. Полученные картограммы локального распределения элементов указывают, что частицы модифицированного диспергированного графита равномерно распределены по всей поверхности серебряного покрытия, а их размер варьируется от нескольких микрометров до $\square 80$ мкм. Увеличение концентрации добавки МДГ в электролите с 2,5 до 10 г/л приводит к снижению микротвердости композиционного серебряного покрытия.

Ключевые слова: электроосаждение, серебрение, композиционные покрытия, модифицированный графит

PRODUCTION OF COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS WITH MODIFIED DISPERSED GRAPHITE BASED ON A SILVER MATRIX

I.V. Bratkov, A.V. Balmasov, M.G. Dontsov, O.V. Lefedova, T.V. Ershova, L.T. Manukyan

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7, Sheremetevsky Ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation
E-mail: maxdon79@yandex.ru

This paper examines the effect of adding modified dispersed graphite (MDG) to a cyanogen-fluoride electrolyte on the formation of silver-matrix composite coatings. The modified dispersed graphite was obtained electrochemically in a mixture of sulfuric and nitric acids. X-ray diffraction analysis revealed that the resulting mixture consisted of 50% oxidized and 50% unoxidized graphite. Energy-dispersive spectroscopy revealed that the carbon content of the composite silver coating increased with increasing concentration of the dispersed graphite phase in the working electrolyte and increasing current density during electrodeposition. The resulting maps indicate that the particles of the modified dispersed graphite mixture are uniformly distributed over the entire surface of the silver coating, and their particle size varies from a few micrometers to $\square 80$ μm . Increasing the concentration of the MDH additive in the electrolyte from 2.5 to 10 g/L leads to a decrease in the microhardness of the composite silver coating.

Keywords: electroplating, silver plating, composite coatings, modified graphite

Для цитирования:

Братков И.В., Балмасов А.В., Донцов М.Г., Лефедова О.В., Ершова Т.В., Манукян Л.Т. Получение композиционных электрохимических покрытий с модифицированным диспергированным графитом на основе серебряной матрицы. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 115–120. DOI: 10.6060/rcj.2025694.18.

For citation:

Bratkov I.V., Balmasov A.V., Dontsov M.G., Lefedova O.V., Ershova T.V., Manukyan L.T. Production of composite electrochemical coatings with modified dispersed graphite based on a silver matrix. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 115–120. DOI: 10.6060/rcj.2025694.18.

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные покрытия на основе серебра с тугоплавкими металлами, получаемые электрохимическим осаждением из водных растворов, находят широкое применение в различных изделиях для повышения износостойкости, усиления антибактериальных свойств, обеспечения дополнительных эстетических и оптических эффектов, а также при формировании защитных токопроводящих слоев. Введение в серебряную матрицу твердых частиц (например, оксидов алюминия, карбида кремния) увеличивает твердость и износостойкость покрытия. Результатом введения наноалмазов является повышение износостойкости, коррозионной стойкости, снижение пористости покрытий при малом расходе алмазов по простой технологии, что значительно увеличивает ресурс изделий [1-6].

Композиционные металлические покрытия с легирующими компонентами такими как графен, оксид графена и модифицированный графит повышают коррозионную стойкость и улучшают некоторые физико-механические свойства [7-22] и могут быть перспективными при осаждении коррозионностойких сплавов [23]. Модифицирование графита осуществляется химическими или механохимическими способами [24-27].

В данной работе исследована возможность получения композиционного покрытия на основе серебряной матрицы, содержащего модифицированный диспергированный графит, а также морфологические особенности получаемых покрытий.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения суспензии оксида графена использовали порошок природного чешуйчатого графита марки «ГТ» Тайгинского месторождения. Для снижения зольности графита проводили предварительную химическую очистку [28]. Смесь окисленного и не окисленного графита получали электрохимическим способом в электролите состава: H_2SO_4 1110 г/л + HNO_3 100 г/л при комнатной температуре. Объем электролита составлял 20 мл. Использовалась навеска графита 5 г. В качестве катода использовали титан, помещенный в чехол из полипропиленовой ткани, в качестве анодов – платинированный титан. Электроды располагались вертикально, и давление между электродами создавалось 0,5 Н/м.

Окисление проводили в 2 этапа в гальваностатическом режиме. На первом этапе анодная плотность тока составляла 100 мА/г, обработку вели до достижения сообщенного ячеек количества электричества равному 240 мА·ч/г. Затем увеличили плотность тока до 250 мА/г и продолжали электролиз до достижения 600 мА·ч/г.

После окисления электрохимически диспергированный графит подвергался промывке до нейтрального pH, а затем полученная смесь диспергировалась в ультразвуке:

диспергирование: мощность $P = 400$ Вт, частота $\nu = 22$ кГц, время $\tau = 30$ мин

центрифугирование: количество оборотов $N = 2000$ об/мин, время $\tau = 10$ мин.

Для получения композиционного серебряного покрытия суспензию диспергированного модифицированного графита в необходимом количестве вводили в электролит следующего состава AgNO_3 (в пересчете на Ag) – 19,6 г/л, K_2CO_3 – 30 г/л, $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ – 60 г/л, KCNS – 120 г/л. Осаждение проводили при перемешивании электролита на магнитной мешалке с частотой вращения 200 об/мин при температуре $t = 25^\circ\text{C}$. В качестве катодов применяли серебряные пластинки толщиной 2 мм и рабочей площадью 2 см². Аноды серебряные. Объем электролита серебрения – 20 мл, расстояние между анодами и катодами – 30 мм.

Микротвердость полученных покрытий определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 100 г (0,98 Н). На образце делали по 5 замеров диагонали ромба, являющегося отпечатком алмазной пирамидки, при ее действии на поверхность образца в течение 10 с. Уколы проводили на однородном участке покрытия, без трещин и видимого отслаивания осадка.

Микротвердость по Виккерсу рассчитывали по формуле, кгс/мм²:

$$HV = \frac{1854 \cdot P}{d^2},$$

где P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н (кгс); 1 кгс = 9,81 Н; d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка, мм.

Рентгеноструктурные исследования были выполнены на рентгеновском дифрактометре POWDIX-600 ($\text{CuK}\alpha$ излучение).

Морфологию поверхности и химический состав модифицированного диспергированного графита и получаемых покрытий исследовали на электронном микроскопе TESCAN VEGA3, Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты энергодисперсионной спектроскопии при определении количественного элементного состава модифицированного диспергированного графита представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав модифицированного диспергированного графита после электрохимического окисления

Table 1. Elemental composition of modified dispersed graphite after electrochemical oxidation

Элемент	Вес. %	Сигма Вес. %
C	64,66	0,23
O	32,64	0,23
S	2,70	0,03
Сумма:	100,00	

Соотношение углерода к кислороду (C:O) близко к 2:1, что характерно для смеси окисленного и не окисленного графита. Высокое содержание кислорода говорит о том, что значительная часть углерода находится в окисленном состоянии.

Сера присутствует в небольшом количестве (2,70%), что указывает на наличие остаточных межслоевых соединений графита (бисульфата графита).

Рентгеновская дифрактограмма свежеполученных частиц модифицированного графита представлены на рис. 1.

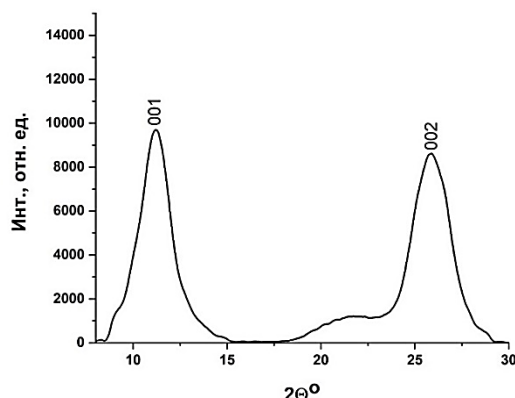


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образца электрохимически окисленного графита ($\text{CuK}\alpha$ излучение)

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of a sample of electrochemically oxidized graphite ($\text{CuK}\alpha$ radiation)

На полученной дифрактограмме наблюдается два максимума, соответствующие отражению от кристаллографических плоскостей 001 и 002. Межплоскостное расстояние, рассчитанное для плоскости 001 ($11,18^\circ$), равно 0,7909 нм, что характерно для соединения внедрения с серной кислотой. Это говорит о том, что азотная кислота не внедряется в межслоевое пространство графита. Рефлекс от плоскости 002 свидетельствует о не полном переходе графита в однослойный оксид графена. Исходя из соотношения площадей пиков S_{001}/S_{002} видно, что доля смеси окисленного и не окисленного графита в продукте составляет порядка 50%. На основании значения L_c установлено, что среднее число графеновых слоев в материале равно 10.

Введение модифицированного диспергированного графита в электролит серебрения приводит к его внедрению в серебряное покрытие. Методом энергодисперсионной спектроскопии установлено, что при введении в электролит серебрения 2,5-10,0 г/л МДГ в осадок включается от 1,29 до 2,91% углерода (табл. 2). С повышением плотности тока при осаждении растет содержание углерода и кислорода в композиционном серебряном покрытии.

Таблица 2

Элементный состав серебряного композиционного покрытия в зависимости от содержания модифицированного диспергированного графита в электролите серебрения и плотности тока при осаждении

Table 2. Elemental composition of the silver composite coating depending on the content of modified dispersed graphite in the silvering electrolyte and the current density during deposition

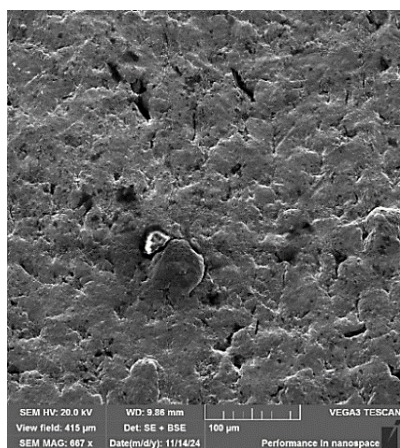
Концентрация МДГ в электролите, г/л	Плотность тока осаждения, А/дм ²	Элемент		
		C	O	Ag
2,5	0,3	1,29	2,23	96,48
	0,5	2,18	2,45	95,37
10	0,3	2,86	3,18	93,96
	0,5	2,91	3,98	93,11

Более плотная структура осадка серебряного композиционного покрытия наблюдается при плотности стока 0,5 А/дм² (рис. 2 и 3).

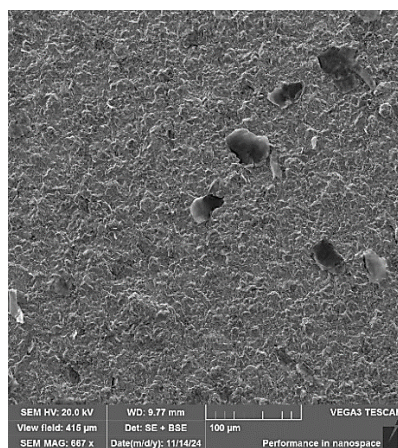
Внедрение частиц МДГ оказывает влияние на микротвердость получаемых композиционных электрохимических покрытий. При осаждении из электролита серебрения без содержания смеси МДГ

твердость покрытия составляла $184,4 \pm 2,8$ HV. С повышением содержания в серебряном композици-

онном покрытии модифицированного диспергированного графита микротвердость покрытия снижается (табл. 3).



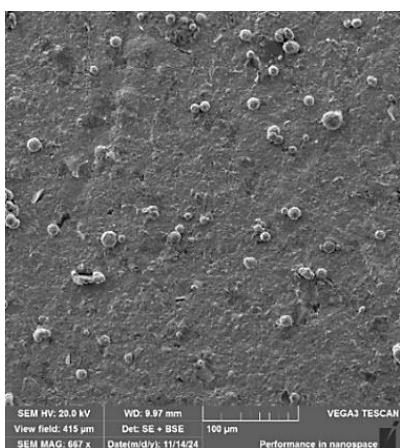
а



б

Рис. 2. Электронные снимки поверхности осажденного композиционного серебряного в зависимости от содержания модифицированного диспергированного графита в электролите серебрения, плотность тока осаждения $0,3 \text{ A/dm}^2$, толщина покрытия 6 мкм. Содержание МДГ в электролите серебрения, г/л: а – 2,5; б – 10,0

Fig. 2. Electron images of the surface of the deposited composite silver depending on the content of modified dispersed graphite in the silvering electrolyte, deposition current density of 0.3 A/dm^2 , coating thickness of 6 µm . MDH content in the silvering electrolyte, g/l: а – 2.5; б – 10.0



а



б

Рис. 3. Электронные снимки поверхности осажденного композиционного серебряного в зависимости от содержания модифицированного диспергированного графита в электролите серебрения, плотность тока осаждения $0,5 \text{ A/dm}^2$, толщина покрытия 6 мкм. Содержание МДГ в электролите серебрения, г/л: а – 2,5; б – 10,0

Fig. 3. Electron images of the surface of the deposited composite silver depending on the content of modified dispersed graphite in the silvering electrolyte, deposition current density of 0.5 A/dm^2 , coating thickness of 6 µm . MDH content in the silvering electrolyte, g/l: а – 2.5; б – 10.0

ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что введение модифицированного диспергированного графита в синеродистороданистый электролит серебрения позволяет получать композиционные покрытия серебро-углеродные структуры. Повышение концентрации МДГ в электролите и плотности тока приводит к повышению содержания в композиционном серебряном покрытии углерода и кислорода.

Покрывтия с включением дисперсной МГД фазой при плотностях тока $0,5 \text{ A/dm}^2$ характеризуются значительно меньшими значениями микротвердости, более плотной и однородной структурой осадка.

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

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

Таблица 3

Микротвердость композиционных серебряных покрытий в зависимости от концентрации модифицированного диспергированного графита в электролите и плотности тока при осаждении

Table 3. Microhardness of composite silver coatings depending on the concentration of modified dispersed graphite in the electrolyte and the current density during deposition

Концентрация МДГ в электролите, г/л	Плотность тока осаждения, А/дм ²	Микротвердость покрытий (по Виккерсу), HV, кгс/мм ²
0	0,3	184,4 ± 2,8
2,5	0,3	144,1 ± 5,5
10	0,5	141,8 ± 3,9
2,5	0,3	125,6 ± 6,5
10	0,5	117,4 ± 2,8

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Богущ Н.В., Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Дежжуннов Н.В. // Доклады БГУИР. 2021. Т. 6. № 19. С. 23-24.
2. Кузьмар И., Ланин В., Пась Н., Хмыль А. // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 6. С. 58-60.
3. Павлов А.В. // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2024. № 1. С. 51-62.
4. Bouchareb S., Doufnoune R., Riahi F. // Materials Today Communications. 2021. V. 27. P. 1-10. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102297.
5. Rigou V.I., Marginean G., Frunzäverde D., Campian C.V. // Wear. 2012. V. 290-291. P. 61-65. DOI: 10.1016/j.wear.2012.05.014.
6. El-Meligi A.A. // Glob. J. Eng. Sci. 2022. V. 10. N 3. GJES.MS.ID.000739. DOI: 10.33552/GJES.2022.10.000739.
7. Rekha M.Y., Kamboj A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2018. V. 653. P. 82-92. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.03.020.
8. Rekha M.Y., Srivastava C. // Corros. Sci. 2019. V. 152. P. 234-248. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.03.015.
9. Arora S., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2019. V. 677. P. 45-54. DOI: 10.1016/j.tsf.2019.03.011.
10. Jyothender K.S., Srivastava C. // Composites Part B. 2019. V. 175. P. 107145. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107145.
11. Rekha M.Y., Kamboj A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2017. V. 636. P. 593-601. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.07.004.
12. Gupta A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2019. V. 669. P. 85-95. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.10.036.
13. Rekha M.Y., Punith Kumar M.K., Srivastava C. // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 62083-62090. DOI: 10.1039/C6RA06509K.
14. Berlia R., Punith Kumar M.K., Srivastava C. // RSC Adv. 2015. V. 5. P. 71413-71418. DOI: 10.1039/C5RA11207A.
15. Linghui Yang, Yunxiao Wan, Zhenlan Qin, Qunjie Xu, Yulin Min // Corrosion Science. 2018. V. 130. P. 85-94. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.10.031.
16. Gupta A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2018. V. 661. P. 98-107. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.07.016.
17. Братков И.В., Юдина Т.Ф., Мельников А.Г., Братков А.В. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 90-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6221.
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. Ершова Т.В., Юдина Т.Ф., Братков И.В., Смирнов Н.Н., Бейлина Н.Ю., Маянов Е.П. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. Вып. 5. С. 8-10.
20. Rashad M., Pan F., Asif M., Chen X. // J. Magnes. Alloy. 2017. V. 5. P. 271-276. DOI: 10.1016/j.jma.2017.06.003.
1. Bogush N.V., Khmyl A.A., Kushner L.K., Dezhkunov N.V. // Reports of BSUIR. 2021. V. 6. N 19. P. 23-24 (in Russian).
2. Kuzmar I., Lanin V., Pas N., Khmyl A. // Technologies in the electronics industry. 2006. N 6. P. 58-60 (in Russian).
3. Pavlov A.V. // Bulletin of PNIPU. Chemical technology and biotechnology. 2024. N 1. P. 51-62 (in Russian).
4. Bouchareb S., Doufnoune R., Riahi F. // Materials Today Communications. 2021. V. 27. P. 1-10. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102297.
5. Rigou V.I., Marginean G., Frunzäverde D., Campian C.V. // Wear. 2012. V. 290-291. P. 61-65. DOI: 10.1016/j.wear.2012.05.014.
6. El-Meligi A.A. // Glob. J. Eng. Sci. 2022. V. 10. N 3. GJES.MS.ID.000739. DOI: 10.33552/GJES.2022.10.000739.
7. Rekha M.Y., Kamboj A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2018. V. 653. P. 82-92. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.03.020.
8. Rekha M.Y., Srivastava C. // Corros. Sci. 2019. V. 152. P. 234-248. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.03.015.
9. Arora S., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2019. V. 677. P. 45-54. DOI: 10.1016/j.tsf.2019.03.011.
10. Jyothender K.S., Srivastava C. // Composites Part B. 2019. V. 175. P. 107145. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107145.
11. Rekha M.Y., Kamboj A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2017. V. 636. P. 593-601. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.07.004.
12. Gupta A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2019. V. 669. P. 85-95. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.10.036.
13. Rekha M.Y., Punith Kumar M.K., Srivastava C. // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 62083-62090. DOI: 10.1039/C6RA06509K.
14. Berlia R., Punith Kumar M.K., Srivastava C. // RSC Adv. 2015. V. 5. P. 71413-71418. DOI: 10.1039/C5RA11207A.
15. Linghui Yang, Yunxiao Wan, Zhenlan Qin, Qunjie Xu, Yulin Min // Corrosion Science. 2018. V. 130. P. 85-94. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.10.031.
16. Gupta A., Srivastava C. // Thin Solid Films. 2018. V. 661. P. 98-107. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.07.016.
17. Bratkov I.V., Yudina T.F., Melnikov A.G., Bratkov A.V. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2020. V. 63. N 8. P. 90-95 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6221.
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 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6841j.
19. Ershova T.V., Yudina T.F., Bratkov I.V., Smirnov N.N., Beilina N.Yu., Mayanov E.P. // ChemChemTech [Izv.

21. Ambrosi A., Chua C.K., Bonanni A., Pumera M. // *Chem. Rev.* 2014. V. 114. P. 7150-7188. DOI: 10.1021/cr500023c.
22. Братков И.В., Ершова Т.В., Балмасов А.В., Донцов М.Г., Рубцов Е.А., Казанцева М.С. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 3. С. 140-145. DOI: 10.6060/rcj.2025693.
23. Шеханов Р.Ф., Гридчин С.Н., Филатова Н.В. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 89-92. DOI: 10.6060/rcj.2024682.12.
24. Братков И.В., Донцов М.Г., Ершова Т.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 83-88. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6870.
25. Братков И.В., Иванов А.Д., Колчин А.Д., Савицкий И.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 1. С. 55-62. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7099.
26. Братков И.В., Иванов А.Д., Колчин А.Д., Савицкий И.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 3. С. 127-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.7041.
27. Братков И.В., Иванов А.Д., Колчин А.Д., Савицкий И.А., Смирнов Н.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 4. С. 68-74. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6795.
28. Братков И.В., Чагин О.В., Иванов А.Д., Колчин А.Д., Савицкий И.А. // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. Т. 57. Вып. 2. С. 104-112 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20247802.00015.
20. Rashad M., Pan F., Asif M., Chen X. // *J. Magnes. Alloy*. 2017. V. 5. P. 271-276. DOI: 10.1016/j.jma.2017.06.003.
21. Ambrosi A., Chua C.K., Bonanni A., Pumera M. // *Chem. Rev.* 2014. V. 114. P. 7150-7188. DOI: 10.1021/cr500023c.
22. Bratkov I.V., Ershova T.V., Balmasov A.V., Dontsov M.G., Rubtsov E.A., Kazantseva M.S. // *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 3. P. 140-145. DOI: 10.6060/rcj.2025693.16.
23. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Filatova N.V. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 89-92. DOI: 10.6060/rcj.2024682.12.
24. Bratkov I.V., Dontsov M.G., Ershova T.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 83-88. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6870.
25. Bratkov I.V., Ivanov A.D., Kolchin A.D., Savitskiy I.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 1. P. 55-62. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7099.
26. Bratkov I.V., Ivanov A.D., Kolchin A.D., Savitskiy I.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 3. P. 127-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.7041.
27. Bratkov I.V., Ivanov A.D., Kolchin A.D., Savitskiy I.A., Smirnov N.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 4. P. 68-74. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6795.
28. Bratkov I.V., Chagin O.V., Ivanov A.D., Kolchin A.D., Savitskiy I.A. // *Modern high technologies. Regional application*. 2024. V. 57. N. 2. P. 104-112 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20247802.00015.

Поступила в редакцию 09.07.2025
Принята к опубликованию 13.10.2025

Received 09.07.2025
Accepted 13.10.2025