

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ГРАФЕНОМ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВОЙ МАТРИЦЫ

И.В. Братков, Т.Ф. Юдина, А.Г. Мельников, А.В. Братков

Илья Викторович Братков *, Татьяна Федоровна Юдина, Алексей Георгиевич Мельников, Артем Викторович Братков

Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: bratkov37@bk.ru *, yudina@isuct.ru, originalraccoon@gmail.com, goalkeeper37ru@gmail.com

В данной работе исследовано влияние добавки коллоидных растворов электрохимически диспергированного графена (ЭДГ) в электролит Уоттса на процесс получения композиционных покрытий на основе никелевой матрицы. Установлено, что введение добавки наночастиц оказывает заметное влияние на значение катодного перенапряжения при восстановлении Ni^{2+} . Наиболее сильное торможение катодного процесса происходит при введении 0,2 г/л исследуемой добавки, дальнейшее увеличение концентрации наночастиц в рабочей ванне снижает эффект. Торможение катодного восстановления Ni^{2+} связывается с адсорбцией наночастиц графена на активных гранях растущих кристаллитов никеля и блокировкой доступной поверхности для восстановления Ni^{2+} . Благодаря увеличению катодной поляризации при осаждении композиционного покрытия, происходит уменьшение размеров кристаллитов осаждаемого никеля и изменение текстуры кристаллической структуры покрытия. Методом энергодисперсионной спектроскопии установлено включение углерода в композиционное покрытие, содержание углерода в покрытии растет с увеличением концентрации наночастиц в рабочем электролите. Включение отрицательно заряженных наночастиц электрохимически диспергированного графена в получаемый осадок становится возможным за счет адсорбции Ni^{2+} и перезарядки наночастиц графена. Установлено, что оптимальная концентрация электрохимически диспергированного графена в рабочем электролите составляет 0,1-0,2 г/л. При данном содержании наночастиц в рабочей ванне снижается пористость и шероховатость осадков. Тафелевские поляризационные кривые для образцов композиционных покрытий, полученные в 0,5М растворе NaCl, показали, что включение наночастиц графена в получаемый осадок приводит к смещению потенциала коррозии в отрицательную область. С увеличением содержания углерода в покрытии сдвиг потенциалов коррозии растет, увеличивается значение токов коррозии. Для образцов композиционных покрытий, получаемых при концентрации добавки ЭДГ равной 0,1 г/л, отмечается небольшое улучшение защитных свойств, что связано с уменьшением пористости покрытий.

Ключевые слова: графен, композиционные покрытия

PRODUCTION AND PROPERTIES OF COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS WITH ELECTROCHEMICALLY DISPERSED GRAPHENE BASED ON NICKEL MATRIX

I.V. Bratkov, T.F. Yudina, A.G. Melnikov, A.V. Bratkov

Iliya V. Bratkov*, Tatiana F. Yudina, Aleksey G. Melnikov, Artyem V. Bratkov

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

E-mail: bratkov37@bk.ru *, yudina@isuct.ru, originalraccoon@gmail.com, goalkeeper37ru@gmail.com

In this work, the effect of addition of colloidal solutions of electrochemical exfoliated graphene (EEG) to the Watts bath on the process of obtaining composite coatings based on a nickel matrix was studied. It was found that the introduction of nanoparticle additives has a sig-

nificant effect on the value of cathodic overvoltage during electro reduction of Ni²⁺. The strongest inhibition of the cathode process takes place with the introduction of 0.2 g/l of additives investigated. Further increase in the concentration of nanoparticles in the bath reduces the effect. The inhibition of the cathodic reduction of Ni²⁺ is associated with the adsorption of graphene nanoparticles on the active faces of growing nickel crystallites and the blocking of the accessible surface for Ni²⁺ reduction. Due to the increase in cathodic polarization during the deposition of the composite coating, the crystallites of the deposited nickel decrease in size and the texture of the crystal structure of the coating changes. According to energy dispersive spectroscopy data, carbon has been included in the composite coating. The carbon content in the coating increases with increasing concentration of nanoparticles in the working electrolyte. The inclusion of negatively charged nanoparticles of electrochemically dispersed graphene in the resulting precipitate becomes possible due to adsorption of Ni²⁺ and recharging of graphene nanoparticles. It was found that the optimal concentration of electrochemically dispersed graphene in the working electrolyte is 0.1-0.2 g/l. At a given nanoparticle content in the working bath, the porosity and roughness of the coatings decreases. The Tafel polarization curves for composite coating samples obtained in a 0.5M NaCl solution showed that the inclusion of graphene nanoparticles in the resulting coating leads to a shift of the corrosion potential to the negative area. With an increase in the carbon content in the coating, the shift in corrosion potentials increases, and the value of corrosion currents increases. For samples of composite coatings obtained at an EEG additive concentration of 0.1 g/l, a slight improvement in the protective properties is noted, which is associated with a decrease in the porosity of the coatings.

Key words: graphene, composite coatings

Для цитирования:

Братков И.В., Юдина Т.Ф., Мельников А.Г., Братков А.В. Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий с электрохимически диспергированным графеном на основе никелевой матрицы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 90–95

For citation:

Bratkov I.V., Yudina T.F., Melnikov A.G., Bratkov A.V. Production and properties of composite electrochemical coatings with electrochemically dispersed graphene based on nickel matrix. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 8. P. 90–95

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие науки и техники толкает исследователей к изучению новых материалов с улучшенными функциональными свойствами. Осаждение тонких функциональных покрытий на готовые изделия позволяет значительно модифицировать их свойства. Гальванотехника позволяет значительно расширить функциональные свойства покрытий за счет осаждения композиционных покрытий, в частности металл – неметалл.

С момента своего открытия в 2010 г. графен постоянно привлекает к себе внимание исследователей ввиду своих уникальных свойств. Он обладает высокой механической прочностью и гибкостью [1-3]. Известно несколько методов его получения, это скотч-метод [4-6], метод газофазного осаждения [7], жидкостной эксфолиации [8-10], электрохимического диспергирования [11-13]. Наиболее подходящим способом, обеспечивающим относительно низкую стоимость и удовлетворительные свойства получаемого графена, является метод электрохимического диспергирования, т.к. он не требует сложного оборудования,

дорогостоящих и агрессивных для окружающей среды реактивов [14].

За последние пять лет наблюдается интерес исследователей к получению и исследованию свойств композиционных электрохимических покрытий на основе никелевой, цинковой, оловянной матриц с включением наночастиц графена [15-23]. Включение наночастиц приводит, как правило, к значительному изменению кристаллической структуры осадков и размеров зерен осаждаемого металла, улучшению коррозионной стойкости композиционных покрытий, снижению коэффициентов трения и износа, приданию эффекта сухой смазки [19].

Задачей данного исследования было изучить влияние добавки коллоидного раствора электрохимически диспергированного графена в ванну никелирования на кинетику восстановления никеля и свойства получаемых осадков.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Коллоидный раствор электрохимически диспергированного графена (ЭДГ) получали по методике, описанной в предыдущих работах [14].

Средний диаметр наночастиц в растворе по данным динамического рассеивания света (Photocor Compact-Z) составлял 200 нм. Толщина наночастиц по данным рентгеноструктурного анализа составляла 2 нм.

Катодные поляризационные кривые получены в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с (потенциостат ElnsP-30J) в трехэлектродной термостатируемой ячейке. В качестве вспомогательного электрода использовали платину, электрода сравнения – хлоридсеребряный электрод, соединенный с ячейкой через капилляр Луггина.

Осаждение покрытий проводили из электролита состава: NiSO₄·7H₂O – 170 г/л, NiCl₂·6H₂O – 35 г/л, H₃BO₃ – 28 г/л, pH = 3,5, t = 45 °С. Покрытие осаждали на стальные образцы, сталь марки 08КП.

Для лучшего распределения наночастиц в электролите, перед нанесением покрытия проводили ультразвуковую обработку рабочей ванны. Мощность УЗ-излучения составляла 0,01 Вт/мл, частота излучения 22,1 кГц, продолжительность обработки 10 мин.

Морфологию поверхности и химический состав получаемых покрытий исследовали на электронном микроскопе TESCAN VEGA3.

Рентгеноструктурные исследования были выполнены на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (CuKα излучение). Профили дифракционных максимумов записывали при скорости вращения гониометра 2 градуса/мин. Межслоевые расстояния определялись по центру тяжести дифракционных линий, а средние размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) по соотношению Селякова-Шеррера [22]:

$$D_{OKP} = \frac{\alpha}{\cos \theta \cdot b_s}, \quad (1)$$

где α – длина волны излучения (для CuKα излучения равная 1,54 нм), θ – угол максимума на дифракционной картине, b_s – уширение профиля образца

В качестве эталона использовался α-оксид алюминия.

Текстурный коэффициент определяли по формуле [22]:

$$Tc(hkl) = \frac{I(hkl)}{\sum I(hkl)} \cdot \frac{\sum I_0(hkl)}{I_0(hkl)}, \quad (2)$$

I_(hkl) – интегральная интенсивность дифракционного максимума кристаллографической плоскости, I_{0(hkl)} – интегральная интенсивность дифракционного максимума кристаллографической плоскости эталона.

Потенциалы и токи коррозии для полученных композиционных покрытий определяли по тафелевским кривым, полученным в 0,5М раство-

ре NaCl в области потенциалов ±300 мВ от равновесного потенциала покрытия. Показатель изменения массы металла рассчитывали по формуле, г/(м²ч):

$$\Delta m^- = I \cdot A(Fe) / 26.8 \cdot S \cdot z \quad (3)$$

где Δm – уменьшение массы металла в результате коррозии, г; S – поверхность образца, м²; A – атомная масса металла, г/моль; I – ток коррозии, А.

Глубинный показатель коррозии рассчитывали по формуле, (мм/год):

$$K_{гп} = 8.76 \cdot K_m \cdot \rho_{Me}, \quad (4)$$

где ρ_{Me}, г/см³ – плотность металла.

Наличие сквозных пор в покрытии определяли согласно ГОСТ 9.302 – 88 методом наложения на образец композиционного покрытия фильтровальной бумаги, смоченной индикаторным раствором (K₃Fe(CN)₆ – 10 г/л; NaCl – 20 г/л). Среднее число пор (N_{ср}) вычисляли по формуле:

$$N_{ср} = (N_{общ}) / S, \quad (5)$$

где N_{общ} – общее число пор на контролируемой поверхности; S – площадь контролируемой поверхности, см².

Определение шероховатости поверхности покрытия проводили согласно ГОСТ 25142-82 на профилометре-профилографе мод.170622.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

О влиянии добавки наночастиц электрохимически диспергированного графена на процесс получения композиционного покрытия судили по изменению характера катодных поляризационных кривых (рис. 1).

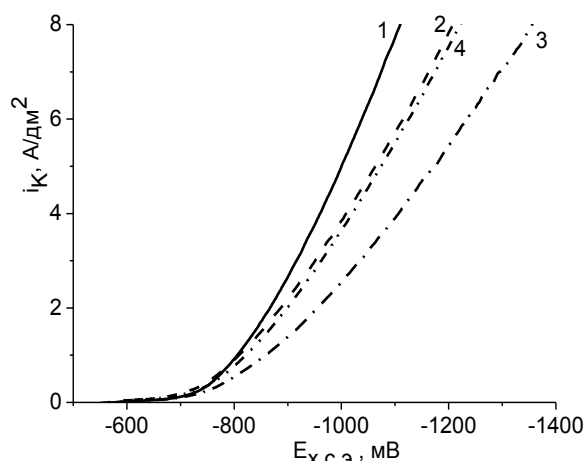


Рис. 1. Потенциодинамические катодные поляризационные кривые восстановления Ni²⁺ из исследуемого электролита: 1) без добавок; 2) с добавкой 0,1 г/л ЭДГ; 3) с добавкой 0,2 г/л ЭДГ; 4) с добавкой 0,4 г/л ЭДГ. Скорость развертки потенциала 2,0 мВ/с, t = 45 ± 0,5 °С

Fig. 1. Potentiodynamic cathodic polarization reduction curves of Ni²⁺ from the studied electrolyte: 1) without additives; 2) with the addition of 0.1 g/l EEG; 3) with the addition of 0.2 g/l EEG; 4) with the addition of 0.4 g/l EEG. Potentials sweep rate is 2.0 mV/s, t = 45 ± 0.5 °C

Из представленных зависимостей видно, что введение дисперсной фазы в электролит приводит к изменению хода катодного процесса осаждения композиционного покрытия. При введении ЭДГ в количестве 0,1 г/л не происходит значительного изменения равновесного потенциала катода. Тогда как введение дисперсной фазы в количестве 0,2 и 0,4 г/л приводит к смещению равновесного потенциала приблизительно на 10 мВ. Небольшой сдвиг равновесного потенциала в отрицательную область при введении дисперсной фазы говорит об затруднении процесса восстановления Ni^{2+} .

Смещение потенциала восстановления Ni^{2+} можно объяснить изменением структуры двойного электрического слоя. Наночастицы ЭДГ содержат большое количество кислородсодержащих функциональных групп и обладают отрицательным значением электрокинетического потенциала, за счет этого в растворе происходит адсорбция ионов никеля на поверхности наночастиц и перезарядка электрокинетического потенциала. После этого становится возможной миграция наночастиц к поверхности катода и их включение в структуру ДЭС.

Также видно, что добавка наночастиц в рабочий электролит приводит к росту поляризации при рабочих значениях плотности тока, максимальное увеличение значения перенапряжения при восстановлении Ni^{2+} наблюдается при введении 0,2 г/л ЭДГ. Торможение восстановления никеля связывается с блокировкой участков зародышеобразования на поверхности катода и уменьшением доступной для восстановления поверхности. Вышеперечисленные факторы должны положительно сказаться на структуре получаемого осадка. На рис. 2 приведены электронные микрофотографии поверхности композиционного никелевого покрытия.

Добавка наночастиц электрохимически диспергированного графита во всем диапазоне исследуемых концентраций (0,1-0,4 г/л) приводит к появлению включений на поверхности получаемого осадка, с увеличением концентрации наночастиц увеличивается плотность включений. Методом энергодисперсионной спектроскопии установлено, что при введении в электролит никелирования 0,1-0,4 г/л ЭДГ в осадок включается от 0,05 до 1,83% углерода. Шероховатость получаемых покрытий при этом снижается с $R_a = 0,60$ мкм до 0,2-0,3 мкм.

Включение наночастиц в осадок приводит и к изменению кристаллической структуры осадка. Размер осаждаемых кристаллов никеля уменьшается с 54,9 нм до 43,2 нм при введении 0,2 г/л

ЭДГ. Также происходит изменение кристаллической структуры получаемого осадка (рис. 3).

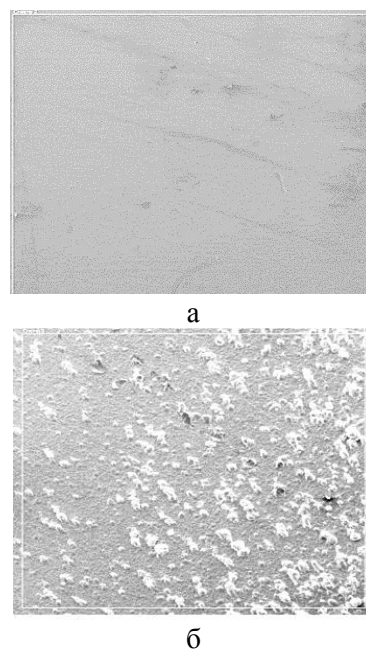


Рис. 2. Электронные микрофотографии никелевых покрытий: а – из электролита без добавок; б – с добавкой 0,2 г/л ЭДГ. Видимая область 1428×1142 мкм

Fig. 2. Electronic micrographs of nickel coatings: a – from an electrolyte without additives; б – with the addition of 0.2 g/l EEG. Visible area is 1428×1142 μm

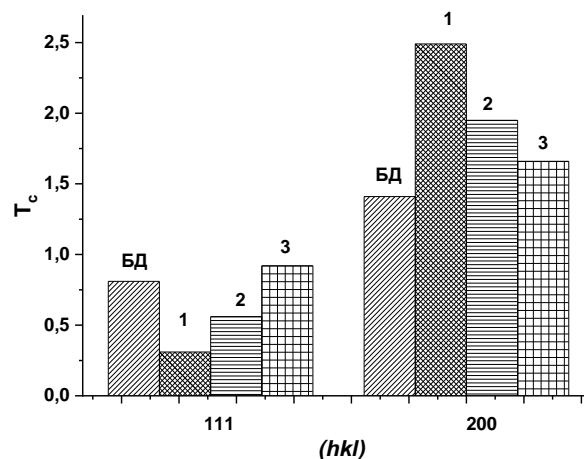


Рис. 3. Текстуальный коэффициент для композиционных никелевых покрытий с различной концентрацией вводимой дисперсной фазы: БД – без добавки; 1) 0,1 г/л; 2) 0,2 г/л; 3) 0,4 г/л
Fig. 3. Texture coefficient for composite nickel coatings with different concentrations of the input dispersed phase: БД – without additive; 1) 0.1 g/l; 2) 0.2 g/l; 3) 0.4 g/l

Согласно данным рентгеноструктурного анализа (табл. 1), происходит уменьшение текстурного коэффициента по кристаллографической плоскости $\{111\}$ и увеличение текстурного коэффициента плоскости $\{200\}$, что, по всей вероятности, и приводит к уменьшению шероховатости получаемых осадков.

Таблица 1

Параметры кристаллической структуры композиционных покрытий, полученных из электролита Уоттса с различной концентрацией добавки ЭДГ

Table 1. The crystal structure parameters of composite coatings obtained from Watts electrolyte with various concentrations of EEG additives

Содержание добавки, г/л	$D_{\text{ОКР}}\{111\}$, нм
0	54,9
0,1	47,1
0,2	43,2
0,4	58,4

Полученные данные подтверждают предположение о блокировке активных центров зародышеобразования наночастицами электрохимически диспергированного графена.

Включение наночастиц также оказывает влияние на защитные свойства получаемого покрытия (табл. 2).

Таблица 2

Коррозионные показатели композиционного никелевого покрытия в 0.5 М NaCl, полученного с различной концентрацией дисперсной фазы

Table 2. Corrosion indexes of a composite nickel coating in 0.5 М NaCl obtained with different concentrations of the dispersed phase

Конц. до- бавки, г/л	$E_{\text{корр}}$, мВ	$i_{\text{корр}}$, мкА/см ²	K_m , г/м ² ·ч·10 ⁻³	K_p , мм/год·10 ⁻³
0	-321	6,7	0,01	0,015
0,1	-328	6,6	0,01	0,011
0,2	-380	32,5	0,05	0,054
0,4	-417	24,1	0,04	0,040

Увеличение содержания углерода в получаемом покрытии приводит к значительному сдвигу потенциала коррозии в отрицательную сторону и увеличению токов коррозии, что приводит к снижению защитных свойств покрытия.

ВЫВОДЫ

Введение в электролит Уоттса наночастиц электрохимически диспергированного графита оказывает заметное влияние на кинетику катодного восстановления никеля и свойства получаемых осадков. Во всех случаях отмечается увеличение катодной поляризации и уменьшение размеров кристаллитов осаждаемого покрытия. Установлено включение нанодисперсной фазы в получаемое покрытие. С ростом концентрации вводимой добавки увеличивается содержание углерода в композиционном покрытии. Включение углеродных наночастиц приводит к изменению текстуры образующихся кристаллитов никеля, а также к изменению защитных свойств композиционного по-

крытия. Наибольший эффект наблюдается при введении в электролит 0,1-0,2 г/л ЭДГ, при данном содержании добавки наблюдается наименьшие значения размеров кристаллитов и несколько улучшаются защитные свойства покрытия.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Gao Y.W., Hao P.** Mechanical properties of monolayer graphene under tensile and compressive loading. *Phys. E: Low-dimen. Syst. Nanostruct.* 2009. V. 41. N 8. P. 1561-1566. DOI: 10.1016/j.physe.2009.04.033.
2. **Lee C., Wei X., Li Q., Carpick R., Kysar J.W., Hone J.** Elastic and frictional properties of graphene. *Phys. Status Solid. B.* 2009. N 11-12. P. 2562-2567. DOI: 10.1002/pssb.200982329.
3. **Lee C.G., Wei X.D., Kysar J.W., Hone J.** Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science.* 2008. V. 321. N 5887. P. 385-388. DOI: 10.1126/science.1157996.
4. **Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A.** Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science.* 2004. V. 306. N 5696. P. 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896.
5. **Novoselov K.S., Jiang D., Schedin F., Booth T.J., Khotkevich V.V., Morozov S.V., Geim A.K.** Two-dimensional atomic crystals. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2005. V. 102. N 30. P. 10451-10453. DOI: 10.1073/pnas.0502848102.
6. **Meyer J.C., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Booth T.J., Roth S.** The structure of suspended graphene sheets. *Nature.* 2007. V. 446. N 7131. P. 60-63. DOI: 10.1038/nature05545.
7. **Hass J., de Heer W.A., Conrad E.H.** The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2008. V. 20. P. 323202. DOI: 10.1088/0953-8984/20/32/323202.
8. **Park S., An J., Jung I., Piner R.D., An S.J., Li X., Velamakanni A., Ruoff R.S.** Colloidal Suspensions of Highly Reduced Graphene Oxide in a Wide Variety of Organic Solvents. *Nano Lett.* 2009. V. 9. N 4. P. 1593-1597. DOI: 10.1021/nl803798y.
9. **Liang Y., Wu D., Feng X., Muellen K.** Dispersion of Graphene Sheets in Organic Solvent Supported by Ionic Interactions. *Adv. Mater.* 2009. V. 21. N 17. P. 1679-1683. DOI: 10.1002/adma.200803160.
10. **Жанахова А.Н., Негуторов Н.В., Пыхова Н.В., Дыкина Б.Ш.** Особенности ультразвукового диспергирования терморасширенного графита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 45-51. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6073.
11. **Zhanakhova A.N., Negutorov N.V., Pykhova N.V., Dykina B.S.** Features of ultrasonic splitting of thermally expanded graphite. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2020. V. 63. N 2. P. 45-51 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6073.
12. **Liu J.** Improved synthesis of graphene flakes from the multiple electrochemical exfoliation of graphite rod. *Nano Energy.* 2013. V. 2. N 3. P. 377-386. DOI: 10.1016/nn201211003.
13. **Stoller D.M.** Best practice methods for determining an electrode material's performance for ultracapacitors. *En-*

- ergy Environ. Sci.* 2010. V. 3. N 9. P. 1294 - 1301. DOI: 10.1039/C0EE00074D.
13. **Parvez K.** Electrochemically exfoliated graphene as solution-processable, highly conductive electrodes for organic electronics. *ACS Nano.* 2013. V. 7. N 4. P. 3598-3606. DOI: 10.1021/nn400576v.
 14. **Братков И.В., Юдина Т.Ф., Мельников А.Г., Братков А.В.** Исследование процесса электрохимического расщепления графита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 96-102. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.5884. **Bratkov I.V., Yudina T.F., Melnikov A.G., Bratkov A.V.** Investigation of the process of electrochemical graphite delamination. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 11. P. 96-102 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.5884.
 15. **Xixun Shen, Junwei Sheng, Qinghui Zhang, Qunjie Xu, Danhong Cheng.** The corrosion behavior of zn/graphene oxide composite coatings fabricated by direct current electro-deposition. *J. Mater. Eng. Perform.* 2018. V. 27. N 2. P. 3750-3761. DOI: 10.1007/s11665-018-3461-0.
 16. **Shuliang Wang, Wanting Li, Haisen Qin, Li Liu, Yuyao Chen, Dinghan Xiang.** Electrodeposition of Ni-Fe-Co- graphene composite coatings and their electrocatalytic activity for hydrogen evolution reaction. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2019. V. 14. N 1. P. 957-969. DOI: 10.20964/2019.01.73.
 17. **Cieślak G., Trzaska M.** Preparation and properties of nanocrystalline Ni/graphene composite coatings deposited by electrochemical method. *Polish J. Chem. Technol.* 2018. V. 20. N 1. P. 29-34. DOI: 10.2478/pjct-2018-0005.
 18. **Abdul Jabbar, Ghulam Yasin, Waheed Qamar Khan, M. Yousaf Anwar, Rashid Mustafa Korai, Muhammad Naeem Nizam, Ghulam Muhyodin** Electrochemical deposition of nickel graphene composite coatings: effect of deposition temperature on its surface morphology and corrosion resistance. *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 49 P. 31100-31109. DOI: 10.1039/c6ra28755g.
 19. **Li Xiang, Qianqian Shen, Yu Zhang, Wei Bai, Chaoyin Nie.** One-step electrodeposited Ni-graphene composite coating with excellent tribological properties. *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 373. P. 38-46. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.074.
 20. **Gajewska-Midzialek A.** Composite coatings with nickel matrix and graphene as dispersed phase. *Polish J. Chem. Technol.* 2018. V. 20. N 1. P. 54-59. DOI: 10.2478/pjct-2018-0008.
 21. **Szeptycka B., Gajewska-Midzialek A., Babul T.** Electrodeposition and corrosion resistance of ni-graphene composite coatings. *J. Mater. Eng. Perform.* 2016. V. 25. N 8. P. 3134-3138. DOI: 10.1007/s11665-016-2009-4.
 22. **Berlia R., Punith Kumar M.K., Chandan Srivastava.** Electrochemical behavior of sn-graphene composite coating. *RSC Adv.* 2015. V. 5. N 87. P. 71413-71418. DOI: 10.1039/C5RA11207A.
 23. **Ершова Т.В., Юдина Т.Ф., Смирнов Н.Н., Бейлина Н.Ю., Братков И.В., Маянов Е.П.** Влияние наночастиц оксида графена на морфологию КЭП с цинковой матрицей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 5. С. 8-10. **Ershova T.V., Yudina T.F., Smirnov N.N., Beilina N.Yu., Bratkov I.V., Mayanov E.P.** Influence of graphene oxide nanoparticles on the morphology of CEC with a zinc matrix. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 57. N 5. P. 8-10 (in Russian).

Поступила в редакцию 18.02.2020
Принята к опубликованию 28.04.2020

Received 18.02.2020
Accepted 28.04.2020