

Электрохимический синтез терморасширяющихся соединений графита в электролитах на основе отходов гальванических производств

М. В. Медведева, С. Л. Забудьков, А. В. Яковлев, А. И. Финаёнов

Исследованы кинетические закономерности анодного интеркалирования графита в отработанных травильных растворах, содержащих азотную кислоту, катионы Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} и др., в сравнении с растворами азотной кислоты. Показана возможность и преимущества использования разбавленного травильного раствора для получения терморасширяющихся соединений графита (ТРСГ) с высокой степенью терморасширения.

Ключевые слова: углеродные материалы, терморасширяющиеся соединения графита, интеркалированный соединения графита, анодный синтез.

Введение

Терморасширяющиеся соединения графита (ТРСГ) или соединения внедрения графита (СВГ) представляют собой слоистые структуры, которые между графеновыми плоскостями содержат интеркалированные частицы, например, анионы и молекулы кислот. Быстрым нагревом таких соединений до температур 600–1000 °С получают терморасширенный графит (ТРГ) представляющий собой пеноподобную структуру с низкой насыпной плотностью из чистого углерода. ТРГ имеет широкий спектр применения: в качестве адсорбента для водоочистки и водоподготовки [1, 2], как компонент многочисленных композитов различного функционального назначения [3] и в электродах химических источников тока [4, 5], а также применяется для производства уплотнительных, футеровочных, прокладочных материалов и изделий [6], может служить катализатором и носителем катализатора [7]. В промышленных масштабах ТРСГ получают химическим способом, который заключается в обработке дисперсного графита концентрированными растворами кислот (H_2SO_4 , HNO_3), с добавлением сильных окислителей [8]. Преимуществом данного метода, благодаря которому он и получил свое распространение, является его простота, однако, из-за введения окисли-

телей, ТРСГ сильно загрязнены продуктами их восстановления и требуют дополнительной очистки. Химический синтез трудноуправляем, что осложняет возможность получения соединений заданного состава с необходимыми свойствами.

Электрохимический синтез основан на анодном окислении дисперсного графита в растворах H_2SO_4 или HNO_3 . Он позволяет получать интеркалированные соединения с высокой степенью терморасширения, используя при этом менее концентрированные, чем при химическом синтезе, растворы кислот, что снижает расход реагентов [9, 10]. Электрохимическая технология позволяет осуществлять синтез в управляемом режиме, при этом не требует высокой чистоты электролита, что дает принципиально новую возможность использовать электролиты, содержащие соответствующие анионы (NO_3^- , HSO_4^-), для получения СВГ, например, отработанные растворы гальванических производств [11].

Цель настоящей работы — исследование анодного интеркалирования графита в электролитах на основе отработанного азотнокислого раствора травления деталей из медных сплавов, содержащих катионы различных металлов, оценка преимуществ и перспектив использования данных растворов вместо растворов азотной кислоты для синтеза ТРСГ.

Методика эксперимента

Все электрохимические измерения проводили на электронном потенциостате Р-30S. Рабочим электродом служила платина (чистота 99,9%), дисперсный графит (GBT/Т 3521-95, размер зерен 120 – 250 мкм). Потенциометрические и потенциодинамические измерения на платине осуществляли в трехэлектродной ячейке с плоско-параллельными электродами. Исследования на дисперсном графите и синтез образцов СВГ осуществляли в специальной ячейке с подпрессованным слоем графита к платиновому токоотводу, подробно описанной в работе [12], навеска графита составляла 1 г. Все значения потенциалов приведены относительно насыщенного хлорсеребряного электрода сравнения.

В качестве электролита для анодной обработки графита использовали отработанный раствор травления деталей из медных сплавов с предприятия ООО ЭПО “Сигнал” (г. Энгельс, Саратовская обл.), состав которого представлен в табл. 1. Раствор содержит 63 масс.% азотной кислоты. Для минимизации процессов катодного восстановления азотной кислоты с образованием токсичных оксидов азота, травильный раствор разбавляли в объемном соотношении 1:1, при этом содержание азотной кислоты составило 36 масс.%. Для оценки возможности использования данных электролитов при синтезе ТРСГ, все полученные экспериментальные данные были приведены в сравнении с ранее полученными результатами в растворах азотной кислоты [13].

Таблица 1

Состав отработанного раствора травления деталей из медных сплавов ООО ЭПО “Сигнал”

Компонент	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	HNO ₃
Содержание, г/л	16,060	0,067	0,057	0,0101	до 950*

*950 г/л HNO₃ (66 масс. %) содержится в исходном травильном растворе, после операции травления концентрация снижается до 60 – 63масс.%

В табл. 2 представлены применяемые в исследованиях электролиты, 1 и 2 — растворы азотной

Таблица 2

Концентрация азотной кислоты в растворах, используемых в качестве электролита для анодной обработки дисперсного графита

№ электролита	Электролит	Концентрация HNO ₃ , масс.%
1	HNO ₃ марки ХЧ	60
2	(ТУ 701-89Е)	30
3	На основе отработанных	63
4	растворов травления	36

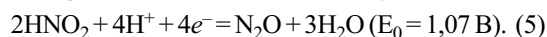
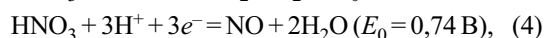
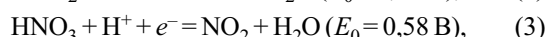
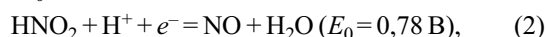
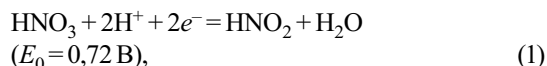
кислоты, 3 и 4 соответствуют электролитам на основе отработанных растворов травления.

Промывку и гидролиз ТРСГ проводили дистиллированной водой, из расчета 500 мл на 1 г графита, после чего синтезированные образцы отфильтровывали и сушили до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 50 – 60 °С.

Термообработку интеркалированного графита проводили в муфельной печи в течение 5 с при температуре 900 °С. Насыпную плотность ТРГ замеряли по стандартной методике ВНИИЭИ (ОСТ 16-0689.031-74).

Результаты экспериментов

Результаты потенциометрических измерений различных материалов в исследуемых электролитах представлены в табл. 3. Как видно из таблицы, на платине и дисперсном графите реализуются потенциалы восстановления азотной кислоты, согласно реакциям [14]:



Механизм восстановления нитрат ионов достаточно сложен, при этом может протекать несколько параллельных реакций характеризующихся различным стандартным потенциалом и в результате на электроде реализуется компромиссный стационарный потенциал ($E_{ст}$) (табл. 3).

Таблица 3

Результаты потенциометрических измерений для платины и графита в азотной кислоте и электролитах на основе отработанного раствора травления

Материал электрода	Компромиссный стационарный потенциал, $E_{ст}$, В для электролитов			
	1	2	3	4
Pt	0,92 – 0,99	0,78 – 0,8	0,89 – 0,92	0,85 – 0,90
графит	0,90 – 0,93	0,86 – 0,88	0,85 – 0,91	0,84 – 0,89

Снижение концентрации азотной кислоты в электролите приводит к закономерному снижению стационарного электродного потенциала. Присутствующие в растворах катионы металлов не оказывают существенного влияния на электродные потенциалы платины и дисперсного графита, значения которых определяются реакциями с участием HNO₃.

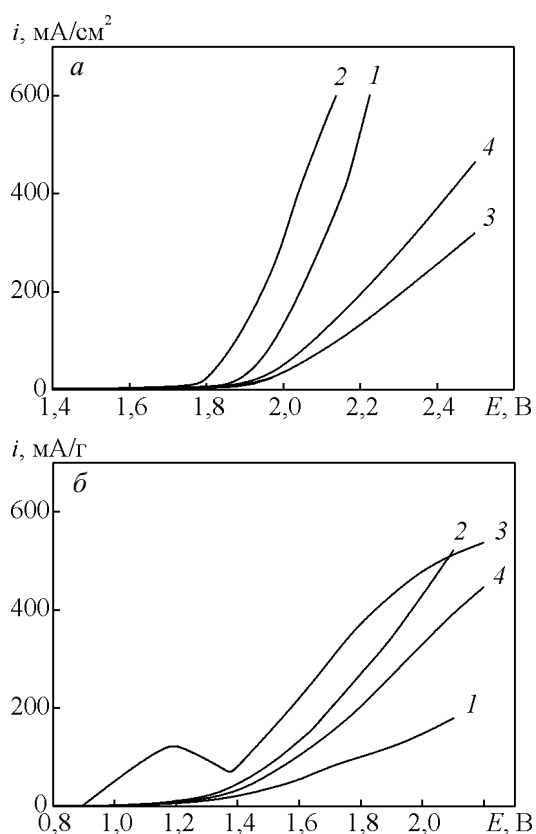
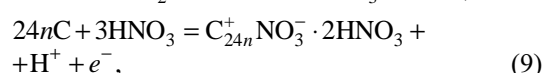
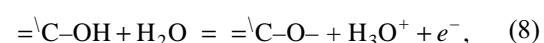
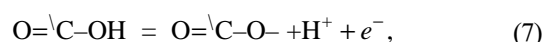
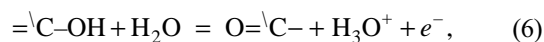


Рис. 1. Анодные потенциодинамические кривые на платине (а) и дисперсном графите (б) (номер кривой соответствует номеру электролита)

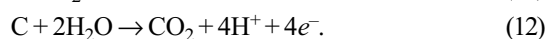
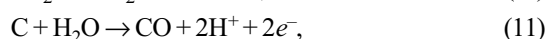
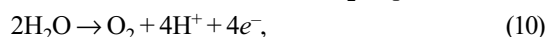
Для выявления электродных процессов, протекающих при наложении анодной поляризации, в исследуемых растворах электролитов были проведены потенциодинамические измерения на платине и дисперсном графите (рис. 1). Платиновый электрод использовали для получения фоновых кривых, ход которых обусловлен только электрохимическими процессами, протекающими с участием компонентов электролита. На платиновом электроде, согласно потенциодинамическим кривым, процесс выделения кислорода, для чистой азотной кислоты (рис. 1а, кривые 1, 2), регистрируется в области потенциалов 1,8 – 1,9 В. В электролитах на основе травильного раствора кислород выделяется менее активно, и при более положительных потенциалах (2,0 – 2,1 В). Подобная особенность может быть связана с присутствием катионов металлов, в частности меди, в составе раствора. Свободные катионы оттягивают на себя часть молекул воды, образующие сольватные оболочки, при этом катионы меди также могут образовывать комплексы, в которых молекулы воды являются лигандами, что затрудняет выделение кислорода.

По сравнению с платиной, на графитовом электроде (рис. 1б) подъем тока фиксируется до достижения потенциалов выделения кислорода, что свидетельствует о процессах окисления поверхностных функциональных групп (ПФГ) и интеркалирования графитовой матрицы по реакциям [10, 13]



где $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер ступени внедрения.

В чистой азотной кислоте (рис. 1б, кривые 1, 2) при достижении потенциала 1,8 В на процесс интеркалирования накладывается процесс выделения кислорода, который на углеродных материалах может выделяться также в составе CO, CO₂ по реакциям



В электролитах на основе отработанных растворов травления на дисперсном графите, как и на платиновом электроде процесс выделения кислорода протекает медленнее и начинается при потенциалах 2,0 – 2,1 В, также с наложением на процесс интеркалирования (рис. 1б, кривые 3, 4). Выделение кислорода в виде CO и CO₂ приводит к растравливанию графитовой матрицы и увеличению ее дефектности, что может негативно сказаться на способности к терморасширению синтезированных СВГ.

На рис. 1б, кривая 3 при потенциалах 1,2 В виден размытый пик, который согласно данным [13, 15], соответствует образованию классического нитрата графита. Образование таких соединений внедрения графита, может быть обусловлено высоким содержанием HNO₃ в отработанном растворе травления. Классические структуры нитрата графита не образуются при электрохимическом синтезе в растворах с содержанием азотной кислоты менее 60% [15], при этом согласно рентгенофазовым исследованиям получают переходные соединения между нитратом и оксидом графита [16].

Оценена возможность электрохимического синтеза ТРСГ с высокой степенью терморасширения в электролитах на основе отработанных травильных растворов. Анодную обработку графита осуществляли в потенциостатическом режиме, с варьированием значений потенциала от 1,8 до 2,1 В. Максимальное значение интервала выбранных потенциалов ограничивали следующей за ним областью интен-

сивного выделения кислорода, для того чтобы большая часть сообщаемой в ходе анодной обработки графита электрической емкости затрачивалась на процесс интеркалирования графита. Результаты по степени терморасширения образцов интеркалированного графита, полученных в отработанных травильных растворах, сравнивали с данными, полученными в растворах азотной кислоты (табл. 4).

Таблица 4

Результаты потенциостатического анодного синтеза ТРСГ в нитратсодержащих электролитах ($Q_{уд} = 200$ (мА·ч)/г, термообработка при 900 °С)

Номер электролита	Потенциал анодной обработки, E_a , В	Время обработки, t , мин	Насыпная плотность ТРСГ, $d_{ТРСГ}$, г/дм ³
1	2,1	90	1,7
2	2,1	30	1,7
3	1,8	175	1,6
	1,9	110	1,5
	2,0	91	1,7
	2,1	80	1,3
4	1,8	146	1,9
	1,9	92	1,6
	2,0	87	1,2
	2,1	60	1,2

Как было показано в [13, 17], для получения соединений внедрения графита с высокой степенью терморасширения в азотнокислых электролитах, необходимо в ходе анодной обработки сообщать удельную электрическую емкость $Q_{уд} \approx 200 - 250$ (мА·ч)/г, поэтому при синтезе образцов ТРСГ в электролитах на основе отработанных травильных растворов мы ограничивали время потенциостатической обработки достижением удельной емкости 200 (мА·ч)/г.

На рис. 2 представлены характерные потенциостатические кривые анодного окисления графита при

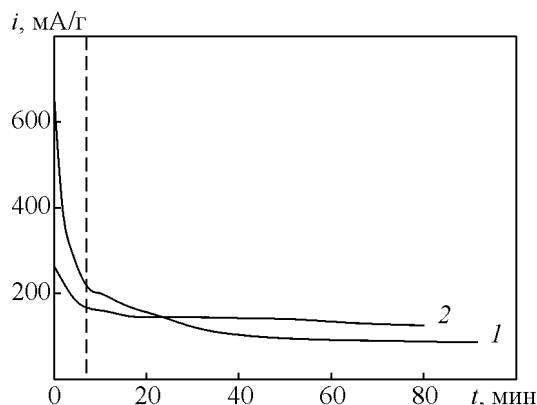


Рис. 2. Потенциостатические кривые анодной обработки дисперсного графита при потенциале анодной обработки $E_a = 2,0$ В в электролитах: 1 – №3, 2 – №4.

потенциале 2,0 В в травильных растворах с различным содержанием HNO_3 . Из рис. 2 видно, что в начальный момент времени плотность тока выше в отработанном травильном растворе с большим содержанием азотной кислоты, что коррелирует с ранее приведенными потенциодинамическими измерениями (рис. 1). В период резкого падения плотности тока (рис. 2) протекают процессы окисления ПФГ и подготовки графитовой матрицы к интеркалированию ионами NO_3^- . Этот временной интервал при электрохимическом синтезе ТРСГ называют также индукционным периодом [13, 17]. Далее начинаются процессы последовательного заполнения межслоевых пространств графита анионами азотной кислоты, что сопровождается выходом потенциостатических кривых на пологую площадку (рис. 2).

Следует отметить, что значения плотности тока после 20 минут анодной обработки графита для разбавленного отработанного раствора травления несколько выше, чем для концентрированного. Это может быть обусловлено тем, что по мере заполнения графитовой матрицы интеркалатом на процессы электрохимического внедрения накладываются реакции выделения кислорода и переокисления образующихся СВГ, более интенсивно протекающие в электролитах с большим содержанием воды [16, 18].

Таким образом, в отработанном растворе травления, содержащем 36 масс.% азотной кислоты, при одинаковых условиях удельная электрическая емкость, требуемая для получения соединений с высокой степенью терморасширения, сообщается быстрее, по сравнению с раствором азотной кислоты.

Результаты потенциостатического синтеза образцов ТРСГ, при различных потенциалах анодной обработки, с оценкой свойств их, представлены в табл. 4.

Таким образом, комплексные электрохимические исследования показали, что кинетика процесса внедрения в электролитах на основе отработанного раствора травления сопоставима, и даже несколько выше, чем в растворах азотной кислоты.

Согласно полученным результатам азотнокислые электролиты, содержащие катионы металлов, могут быть использованы для получения ТРСГ с высокой степенью терморасширения. Для оценки качества этих соединений и определения перспектив их применения при производстве классических изделий из ТРСГ (графитовая фольга, пористые сорбенты и др.) будут проведены дополнительные исследования.

Выводы

1. Потенциодинамические исследования в азотнокислых электролитах, содержащих катионы

металлов, не выявили принципиальных различий в механизме и скорости анодного интеркалирования графита. Установлено, что в этом случае снижется кинетика выделения кислорода.

2. Впервые показана принципиальная возможность использования отработанных травильных растворов гальванических производств для синтеза соединений внедрения графита, обладающих пониженной насыпной плотностью ТРГ.

Литература

1. Яковлев А.В., Финаенов А.И., Яковлева Е.В., Финаенова Э.В. Применение терморасширенного графита в процессах водоочистки и водоподготовки. Журнал прикладной химии, 2004, т. 77, № 11, с. 1833 – 1835.
2. Финаенов А.И., Кольченко А.С., Яковлев А.В., Финаенова Э.В., Колесникова М.А. Адсорбенты на основе терморасширенного графита. Вестник Саратовского государственного технического университета, 2011, № 2, с. 46 – 54.
3. Фялков А.С. Углерод. Межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект Пресс, 1997, 718 с.
4. Куренкова М.Ю., Попова С.С., Финаенов А.И. О возможности применения терморасширенного графита в электродах литиевых источников тока. Сб. статей молодых ученых по материалам Всерос. Конф. “Актуальные проблемы электрохимической технологии”, Саратов: Изд-во СГТУ, 2005, с. 168 – 174.
5. Чуриков Л.В. Разработка углеродного материала для отрицательного электрода литий-ионного аккумулятора. Электрохимическая энергетика, 2001, т. 1, № 3, с. 9 – 17.
6. Обзоры. Интеркалированные соединения графита акцепторного типа и новые углеродные материалы. Известия академии наук. Серия химия и химическая технология, 2005, т. 54, № 8, с. 1699 – 1716.
7. Стайл Э.Б. Носители и нанесенные катализаторы. М.: Химия, 1991, 240 с.
8. Никольская И.В. Фадеева (Сорокина) Н.Е., Семененко К.Н., Авдеев В.В., Монакина Л.А. К вопросу об образовании бисульфата графита в системах, содержащих графит, H_2SO_4 и окислитель. Журнал общей химии, 1989, т. 59, № 12, с. 2653 – 2659.
9. Ярошенко А.П., Попов А.Ф., Шапранов В.В. Технологический аспекты синтеза солей графита (обзор). Журнал прикладной химии, 1994, № 2, с. 204 – 211.
10. Сорокина Н.Е., Максимова Н.В., Авдеев В.В. Анодное окисление графита в 10 – 98%-ных растворах HNO_3 . Неорганические материалы, 2001, № 4, с. 1 – 7.
11. Забудьков С.Л., Медведева М.В., Мокроусов А.А., Финаенов А.И. Применение в электрохимическом синтезе терморасширяющихся соединений графита электролитов на основе гальванических отходов вместо растворов кислот. Восьмая Международная конференция “Углерод: фундаментальные проблемы науки,

- материаловедения, технология”, 25 – 28 сентября 2012 г., Московская обл., г. Троицк, 2012, с. 182 – 183.
12. Финаенов А.И., Апостолов С.П., Краснов В.В., Настасин В.А. Выбор и обоснование конструкции электролизера для синтеза гидросульфата графита. Журнал прикладной химии, 1999, № 5, с. 767 – 772.
13. Яковлева Е.В., Яковлев А.В., Финаенов А.И. Электрохимический синтез терморасширяющихся соединений графита в азотнокислом электролите. Журнал прикладной химии, 2002, № 10, с. 1632 – 1638.
14. Справочник по электрохимии. Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1981, 488 с.
15. Авдеев В.В., Сорокина Н.Е., Тверезовская О.А., Сердан А.А., Финаенов А.И. Синтез и физико-химические свойства соединений внедрения в системе графит- HNO_3 . Неорганические материалы, 1999, т. 35, № 4, с. 435 – 439.
16. Забудьков С.Л., Яковлев А.В., Финаенов А.И., Настасин В.А. Роль кислорода в процессе электрохимического окисления углерода и образовании структур внедрения. Актуальные проблемы электрохимической технологии: сб. статей молодых ученых по материалам Всерос. конф. Саратов: СГТУ, 2005, с. 182 – 185.
17. Забудьков С.Л., Яковлев А.В., Финаенов А.И., Яковлева Е.В. Анодный синтез терморасширяющихся соединений графита в азотной кислоте. Вестник Саратовского государственного технического университета, 2003, № 1, с. 113 – 120.
18. Яковлев А.В., Забудьков С.Л., Яковлева Е.В., Финаенов А.И. Электрохимические процессы на порошковых графитовых электродах в растворах HNO_3 . Журнал прикладной химии, 2010, т. 83, № 5, с. 769 – 774.

References

1. Yakovlev A.V., Finayenov A.I., Yakovleva Ye.V., Finayenova E.V. Primeneniye termorasshirennogo grafita v protsessakh vodoochistki i vodopodgotovki [Use of thermally expanded carbon in processes of water cleaning and preparing]. *Zhurnal prikladnoy khimii — Russian journal of applied chemistry*, 2004, vol. 77, no. 11, pp. 1833 – 1835.
2. Finayenov A.I., Kolchenko A.S., Yakovlev A.V., Finayenova E.V., Kolesnikova M.A. Adsorbenty na osnove termorasshirennogo grafita [Adsorbent on base of thermally expanded carbon]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Saratov State technical University*. 2011, no. 2, pp. 46 – 54.
3. Fialkov A.S. Uglyerod. *Mezhsloyevye soyedineniya i kompozity na ego osnove* [Carbon. Interlayer compounds on its base]. Moscow, Aspekt Press., 1997, 718 p.
4. Kurenkova M.Yu., Popova S.S., Finayenov A.I. *O vozmozhnosti primeneniya termorasshirennogo grafita v elektrodakh litiyevykh istochnikov toka* [Possibilities of thermally expanded carbon use for electrodes in lithium batteries]. Proc. All Russia conf. Actual problems of electro-

- chemical technology, Saratov, SGTU Publ., 2005, pp. 168 – 174.
5. Churikov L.V. Razrabotka uglerodnogo materiala dlya otritsatel'nogo elektroda lity — ionnogo akkumulyatora [Development of carbon material for negative electrodes of lithium-ion accumulator]. *Elektrokhimicheskaya energetika — Electro-chemical energetics*, 2001, vol. 1, no. 3, pp. 9 – 17.
 6. Obzory. Interkalirovannyye soyedineniya grafita aktseptornogo tipa i novyye uglerodnyye materialy [Intercalation carbon compounds acceptor type and new carbon materials]. *Izvestiya akademii nauk. Seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya — Russian chemical bulletin*, 2005, vol. 54, no.8, pp. 1699 – 1716.
 7. Stayl E.B. *Nositeli i nanesennyye katalizatory* [Carriers and deposited catalysts]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 240 p.
 8. Nikolskaya I.V. Fadeyeva (Sorokina) N.E., Semenenko K.N., Avdeyev V.V., Monyakina L.A. K voprosu ob obrazovanii bisulfata grafita v sistemakh, sodержashchikh grafit H_2SO_4 i oksiditel [Formation of carbon bisulphate in systems containing graphite, H_2SO_4 and oxidizer]. *Zhurnal obshchey khimii — Russian journal of general chemistry*, 1989, vol. 59, no. 12, pp. 2653 – 2659.
 9. Yaroshenko A.P., Popov A.F., Shapranov V.V. Tekhnologicheskiy aspekt sinteza soley grafita (obzor) [Technological aspects of graphite salts synthesis]. *Zhurnal prikladnoy khimii — Russian journal of applied chemistry*, 1994, no. 2, pp. 204 – 211.
 10. Sorokina, N. Ye., Maksimova N. V., Avdeyev V. V. Anodnoye okisleniye grafita v 10-98%-nykh rastvorakh HNO_3 . [Anodic oxidation of graphite in 10 to 98% HNO_3]. *Neorganicheskiye materialy — Inorganic materials*, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 360 – 365.
 11. Zabudkov S.L., Medvedeva M.V., Mokrousov A.A., Finayenov A.I. *Primeneniye v elektrokhimicheskoy sinteze termorasshiryayushchikhsya soyedineniy grafita elektrolitov na osnove galvanicheskikh otkhodov vmesto rastvorov kislot* [Electro-chemical synthesis of thermally expanded graphite compounds in used solutions of nitric acids for etching]. Proc. of 8 Int. conf. Carbon: Basics of science problems, material science, technology, 2012, September 25 – 28, Troitsk, pp. 182 – 183.
 12. Finayenov A.I., Apostolov S.P., Krasnov V.V., Nastasin V.A. *Vybor i obosnovaniye konstruktssii elektrolizera dlya sinteza gidrosulfata grafita* [Choice and reasoning of equipment design for synthesis of graphite hydrosulphate]. *Zhurnal prikladnoy khimii — Russian journal of applied chemistry*, 1999, no. 5, pp. 767 – 772.
 13. Yakovleva Ye.V., Yakovlev A.V., Finayenov A.I. *Elektrokhimicheskiy sintez termorasshiryayushchikhsya soyedineniy grafita v azotnokislom elektrolite* [Electro-chemical synthesis of thermally expanded graphite compounds in nitric acid electrolyte]. *Zhurnal prikladnoy khimii — Russian journal of applied chemistry*, 2002, no. 10, pp.1632 – 1638.
 14. Sukhotina A.M. *Spravochnik po elektrokhimii* [Electro-chemistry. Handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., 1981, 488 p.
 15. Avdeyev V.V., Sorokina N.E., Tverezovskaya O.A., Serdan A.A., Finayenov A.I. *Sintez i fiziko-khimicheskiye svoystva soyedineniy vnedreniya v sisteme grafit- HNO_3* . [Synthesis and electro-chemical properties of interstitial compound in graphite HNO_3 system]. *Neorganicheskiye materialy — Inorganic materials*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 435 – 439.
 16. Zabudkov S.L., Yakovlev A.V., Finayenov A.I., Nastasin V.A. *Rol kisloroda v protsesse elektrokhimicheskogo okisleniya ugleroda i obrazovanii struktur vnedreniya* [Role of oxygen in process of electro-chemical oxidation of carbon and formation of interstitial structures]. Proc. All Russia conf. Actual problems of electro-chemical technology, Saratov, Russia, SGTU Publ., 2005, pp. 182 – 185.
 17. Zabudkov S. L., Yakovlev A. V., Finayenov A. I., Yakovleva Ye. V. *Anodny sintez termorasshiryayushchikhsya soyedineniy grafita v azotnoy kislyote*. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Saratov State technical University*. 2003, no. 1, pp. 113 – 120.
 18. Yakovlev A.V., Zabudkov S. L., Yakovleva Ye.V., Finayenov A.I. *Elektrokhimicheskiye protsessy na poroshkovykh grafitovykh elektrodakh v rastvorakh HNO_3* [Electro-chemical processes on powdered graphite electrodes in HNO_3 solutions]. *Zhurnal prikladnoy khimii — Russian journal of applied chemistry*, 2010, vol. 83, no. 5, pp. 769 – 774.

Статья поступила в редакцию 21.01.2014 г.

Медведева Мария Викторовна — *Энгельский технологический институт (филиал) Саратовского технического университета (г. Энгельс), аспирант, специализируется в области электрохимического синтеза неорганических соединений. E-mail: mari19101991@yandex.ru.*

Забудьков Сергей Леонидович — *Энгельский технологический институт (филиал) Саратовского технического университета (г. Энгельс), кандидат химических наук, докторант, доцент, специалист в области электрохимического интеркалирования, разработки и проектирования оборудования. E-mail: l_a_c_i_o@mail.ru.*

Яковлев Андрей Васильевич — Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского технического университета (г. Энгельс), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области получения новых материалов, сорбентов, компонентов электрохимическими методами. E-mail: carbon@techn.sstu.ru.

Финаёнов Александр Иванович — Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского технического университета (г. Энгельс), доктор технических наук, профессор, специалист в области химических источников тока, электрохимического синтеза интеркалированных соединений. E-mail: aif@techn.sstu.ru.

Electro-chemical synthesis of thermo-expanded graphite compounds in used solutions of galvanic production

M. V. Medvedeva, S. L. Zabudkov, A. V. Yakovlev, A. I. Finayonov

Investigation kinetic laws anodic intercalation graphite in waste pickling solutions containing nitric acid, the cations Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , etc., as compared to solutions of nitric acid were conducted. Possibility and advantages were demonstrated for using the diluted pickling solution to produce thermally expanding graphite compounds with a high degree of thermal expansion.

Keywords: carbon materials, thermally expanding graphite compounds, intercalated graphite compounds, anode synthesis.

Medvedeva Mariya — Engels technological institute, branch of Yuri Gagarin State technical University of Saratov, Engels, Russia, postgraduate student, e-mail: mari19101991@yandex.ru.

Zabudkov Sergey — Engels technological institute, branch of Yuri Gagarin State technical University of Saratov, Engels, Russia, PhD, associated professor, e-mail: l_a_c_i_o@mail.ru.

Yakovlev Andrey — Engels technological institute, branch of Yuri Gagarin State technical University of Saratov, Engels, Russia, DrSci (Eng), professor, head of department, e-mail: carbon@techn.sstu.ru.

Finayonov Aleksandr — Engels technological institute, branch of Yuri Gagarin State technical University of Saratov, Engels, Russia, DrSci (Eng), professor, e-mail: aif@techn.sstu.ru