

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ, НАНОСИСТЕМ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

УДК 546.26-162:548.73:620.187

Оригинальная статья

ОКСИД ГРАФИТА: ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Н.В. Алемасова¹, Д.И. Бугорская¹, В.В. Бурховецкий², Г.К. Волкова², В.А. Глазунова²,
М.Ю. Зеленский¹, М.В. Савоськин¹

¹ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»
283048, Россия, Донецк, ул. Р. Люксембург, 70

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»
283048, Россия, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

alemasova.nv@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.008

Аннотация: Показано, что предварительная подготовка образцов влияет на структуру и свойства оксида графита и частично восстановленного оксида графита при их исследовании физическими методами. Способ высушивания оксида графита как последний этап синтеза определяет его морфологию и структурные свойства. При высушивании методом сублимации фиксируется состояние оксида графита в водной суспензии до начала процесса самоупорядочивания его листов, данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о его рентгеноаморфном состоянии, внешний вид высушенного оксида графита – светло-желтый порошок. Высушивание водных суспензий оксида графита при температурах выше комнатной сопровождается упорядочиванием структуры оксида графита под действием сил поверхностного натяжения и Ван-дер-Ваальса с формированием темно-коричневой пленки. Методами сканирующей и просвечивающей микроскопии показано, что способ отделения частично восстановленного оксида графита от стеклянных подложек, на которых производится высушивание продукта, может приводить к получению смятых или рулонообразных структур. При исследовании оксида графита методом просвечивающей электронной микроскопии даже непродолжительное воздействие ультразвука, используемое при традиционном способе нанесения материала на медную сетку перед исследованием, приводит к сминанию и частичному скручиванию краев наночастиц оксида графита. Механическое измельчение оксида графита приводит к разупорядочиванию структуры оксида графита и к увеличению межплоскостного расстояния.

Ключевые слова: оксид графита, структура, морфология поверхности, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ.

1. Введение

Графеновые материалы уже порядка двадцати лет остаются на пике популярности. Направлением создания таковых через оксид графита (ОГ) занимаются многие научные лаборатории в мире. ОГ и получаемый из него оксид графена имеет свои уникальные свойства, что позволяет готовить на его основе разнообразные наноматериалы [1]. Развитие нанотехнологий невозможно представить без системного изучения свойств

© Н.В. Алемасова, Д.И. Бугорская, В.В. Бурховецкий, Г.К. Волкова, В.А. Глазунова, М.Ю. Зеленский,
М.В. Савоськин, 2023

самых наноматериалов. Наноматериалы являются неравновесными системами, характеризуются повышенной свободной энергией и, следовательно, повышенной реакционной способностью, неустойчивостью, склонностью к агрегации и изменению структуры.

В настоящее время активно ведется процесс унификации нанообъектов (разработаны ГОСТы, регламентирующие номенклатуру нанообъектов [2, 3] и методов исследования [4, 5]). Стандартизация методов исследования нанообъектов вследствие их многообразия, а также все еще продолжающегося процесса накопления экспериментальных данных, еще не завершена. С одной стороны, приводит к тому, что каждый исследователь подходит к изучению нанообъекта исходя из имеющегося у него опыта и видения. С другой стороны, обеспечивает простор для неожиданных открытий, самое значительное из которых привело к получению А. Геймом и К. Новоселовым Нобелевской премии – «За новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена».

Анализ литературных данных показал, что исследователи не всегда описывают процедуру подготовки нанообъектов, в частности ОГ, к последующим физическим методам исследования (например, методами электронной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа). Целью предлагаемой работы было изучение влияния различных способов подготовки образцов ОГ перед исследованиями методами электронной микроскопии (сканирующей и просвечивающей) и рентгеноструктурного анализа на получаемые результаты.

2. Материалы и методы

Все исследования проведены с очищенным природным чешуйчатым графитом Formula BT 2935APH (Superior Graphite Co, USA, содержание углерода 99,95%, размер 90% его частиц составляет менее 32 мкм.). Синтез оксида графита проводили по методу Хаммерса с изменениями, которые описаны в работе [6]. После синтеза ОГ и его отмывки высушивание образца проводили двумя способами: в сушильном шкафу на воздухе при 50°C и методом сублимации после замораживания в жидком азоте. Частичное восстановление ОГ проводили с применением индивидуально $NaOH$, $Na_2S_2O_3$ или дифенилтиомочевины, полученные продукты восстановления обозначены $vOГ - NaOH$, $vOГ - Na_2S_2O_3$, $vOГ - PhThio$ соответственно. Для восстановления ОГ в термостатируемый реактор помещали водную суспензию ОГ (4 мг/см³), смесь обрабатывали в ультразвуковой ванне Codyson CD-4800 (42 кГц, 70 Вт) в течение 30 мин для получения суспензии оксида графена. Затем добавляли в реактор навеску вещества-восстановителя для создания необходимой

концентрации (0,1 М $Na_2S_2O_3$ или 0,04 М дифенилтиомочевины). В случае восстановления ОГ раствором $NaOH$ суспензию ОГ готовили сразу в 0,1 М растворе $NaOH$. Восстановление проводили при температуре $90\div 95^\circ C$ в течение 1 ч (синтез $vOГ - NaOH$, $vOГ - Na_2S_2O_3$) и 2 ч (синтез $vOГ - PhThio$) с механическим перемешиванием реакционной смеси. После окончания восстановления продукт пятикратно промывали дистиллированной водой ($vOГ - NaOH$, $vOГ - Na_2S_2O_3$) или этиловым спиртом ($vOГ - PhThio$), отделяя восстановленный ОГ центрифугированием.

Высушивание методом сублимации проводили на установке, состоящей из вакуумного пластинчато-роторного насоса НВР, азотной ловушки и колбы для образца, соединенных вакуумными шлангами и снабженных трехходовыми стеклянными кранами. Водную суспензию ОГ при помощи шприца наносили на стеклянную подложку, затем подложку с образцом помещали в жидкий азот для замораживания образца. Сублимационное высушивание проводили в течение 1 часа, поддерживая замороженное состояние образца с помощью охлаждающей смеси лёд – $NaCl$.

Исследование поверхности образцов выполняли методом растровой (сканирующей) электронной микроскопии (СЭМ) (JSM-6490LV, Япония) в режимах вторичных (SEI) и отраженных (BEC) электронов. Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (JEM-200A, «JEOL») проводили изучение морфологии и внутренней структуры частиц ОГ и вОГ. Формирование образцов для микроскопии осуществляли на специальных покрытых аморфным углеродом медных сетках нанесением с помощью ультразвукового распылителя (35 кГц) водных или ацетоновых суспензий образцов. В отдельном эксперименте исследовали два варианта формирования образца на покрытых углеродом медных сетках – с использованием ультразвукового распылителя и без него (в этом случае водную суспензию с помощью шприца осторожно наносили на медную сетку и высушивали на воздухе при комнатной температуре). Это исследование проведено для образца ОГ, синтезированного по методу Броди (ОГ-Б). Методика синтеза ОГ-Б описана в работе [7].

Структурные исследования образцов ОГ проводили методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «ДРОН-3» в отфильтрованном медном излучении ($\lambda_\alpha = 0,154181$ нм). Сканирование образцов проводили в диапазоне углов 2θ от 6 до 40 градусов с получением результатов в оцифрованном виде. Дифрактограммы исходного ОГ записывали с использованием пленки ОГ и порошка, полученного измельчением в бытовой кофемолке пленки ОГ. Образцы ОГ после сублимационной сушки записывали непосредственно на стеклянных

подложках.

3. Результаты и обсуждение

Завершающим этапом синтеза ОГ является высушивание продукта, которое осуществляют различными способами: нагреванием в сушильном шкафу при атмосферном давлении [8] и в вакууме [9], спрей-сушкой [10], методом сублимации [11], высушиванием в эксикаторе над осушающими реагентами [12].

Нами проведено исследование влияния двух способов сушки ОГ на его структуру. На рис. 1 приведены СЭМ-изображения морфологии поверхности ОГ при его высушивании на воздухе при 50°C и методом сублимации после замораживания в жидком азоте.

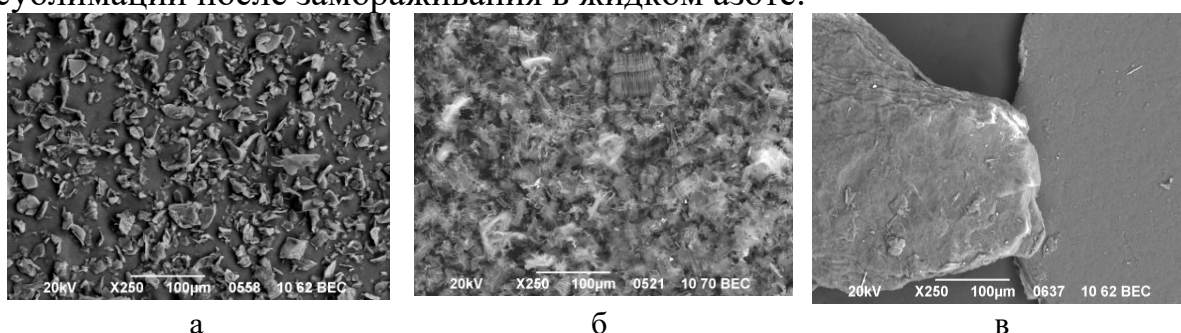


Рис. 1. СЭМ-изображения исходного графита (а), образца ОГ после высушивания методом сублимации (б) и на воздухе при 50°C (в).

Высушенный методом сублимации ОГ представляет собой слоистую структуру, в какой-то степени напоминает терморасширенный графит или гармошку, просматриваются границы исходных чешуек графита. По внешнему виду высушенный таким образом ОГ представляет собой светло-бежевый порошок. При высушивании на воздухе слои ОГ под действием сил поверхностного натяжения и Ван-дер-Ваальса укладываются в одно большое полотно, слоистая структура сохраняется, но границ отдельных чешуек уже практически не видно. Во внешнем виде также наблюдаются изменения – получаемая гибкая пленка ОГ становится темно-коричневой. По-видимому, это связано с размером кластеров ОГ.

Вид сушки влияет на степень кристалличности ОГ. На рис. 2 приведены дифрактограммы ОГ, высушенного после синтеза различными способами. После высушивания методом сублимации на дифрактограмме присутствует лишь «гало», указывающее на отсутствие дальнего порядка в ОГ. На дифрактограмме ОГ высушенного при 50°C (см. рис. 2, кривая 1) присутствует интенсивный пик, соответствующий рефлексу $00l$ что указывает на глубокий процесс кристаллизации. Процесс восстановления ОГ различными восстановителями может сопровождаться изменением адгезионных свойств получаемого частично восстановленного ОГ к стеклянной поверхности, на которой обычно проводят высушивание

образцов. На рис. 3 приведены примеры СЭМ-изображений «интересных» рулонообразных структур частично восстановленного ОГ, причем образование этих форм обусловлено процедурой соскабливания со стеклянной подложки, на которой проводили высушивание образца.

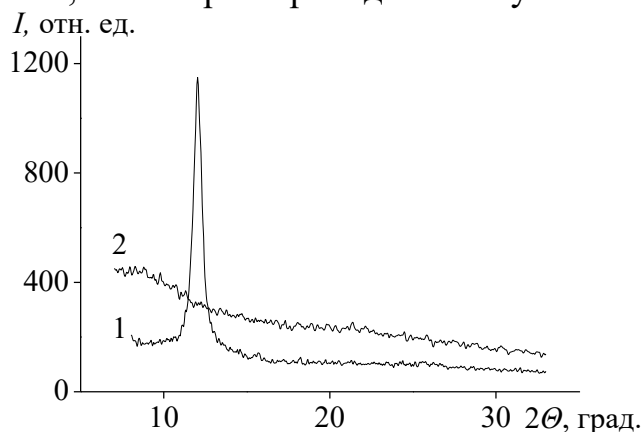


Рис. 2. Дифрактограммы ОГ, высушенного при 50°C (1) и методом сублимации (2).

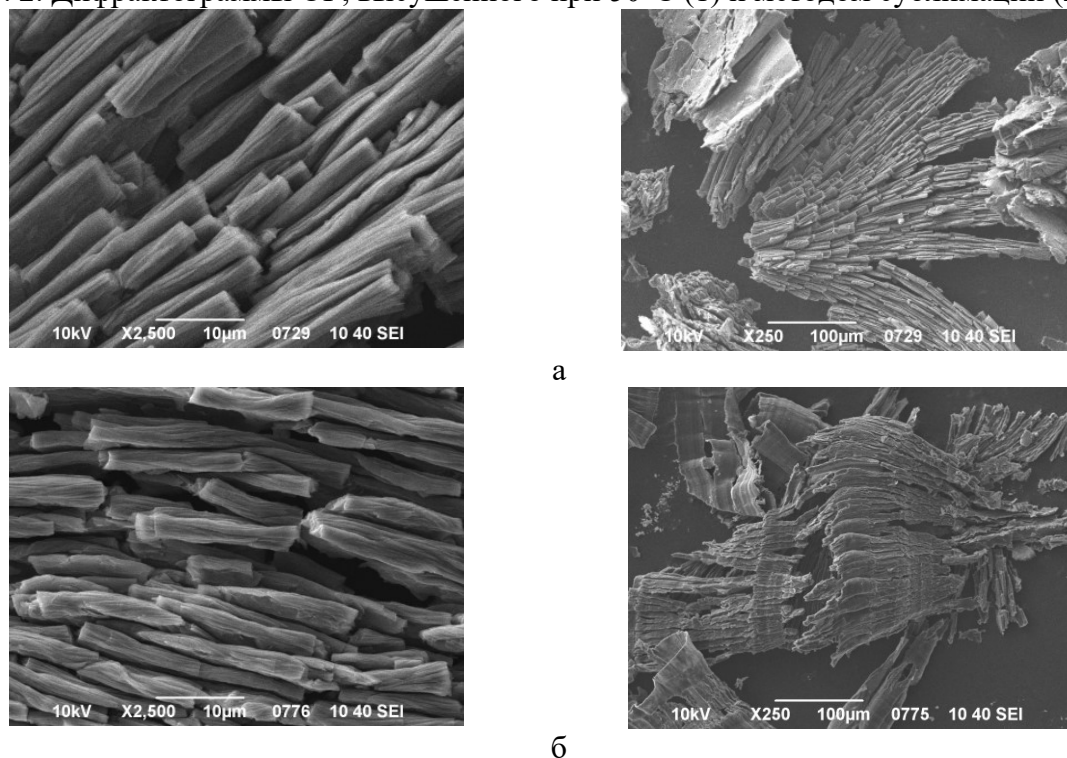


Рис. 3. СЭМ-микрофотографии $vOГ - Na_2S_2O_3$ (а) и $vOГ - NaOH$ (б) при различном увеличении.

Неожиданно оказалось, что складчатость листов ОГ может сохраняться при их исследовании методом ПЭМ после приготовления суспензии частично восстановленного ОГ в ацетоне и ультразвукового диспергирования на медную подложку. На рис. 4 приведены изображения $vOГ - PhThio$ с предварительным высушиванием и отделением образца с помощью скребка перед приготовлением ацетоновой суспензии и минуя эту стадию: приготовление ацетоновой суспензии производили сразу после

отмывки продукта восстановления.

Выявлено, что способ формирования образца для съемки ПЭМ-микрофотографий также может изменять наблюдаемую картину (рис. 5).

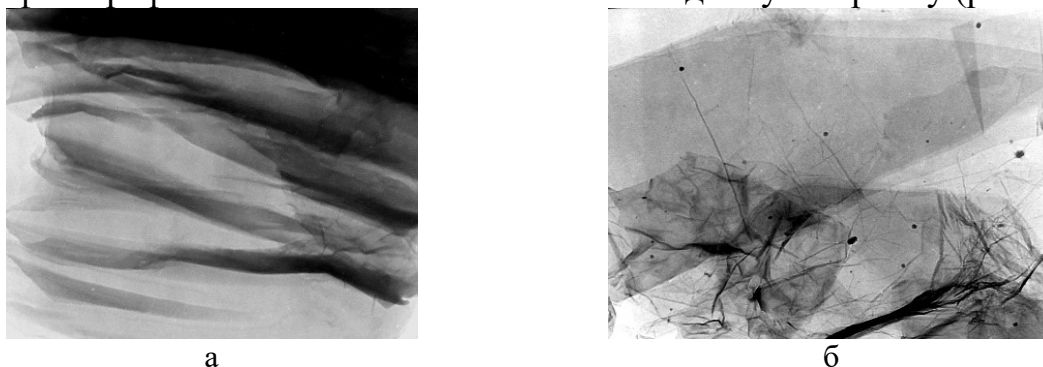


Рис. 4. ПЭМ-микрофотографии *vOG-PhThio* с предварительным высушиванием и соскабливанием продукта (а) и без этой стадии (б).

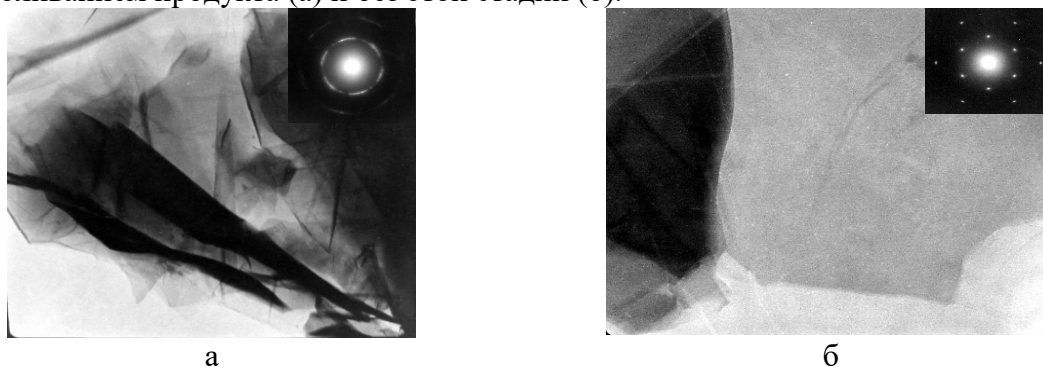


Рис. 5. ПЭМ-микрофотографии ОГ-Б с использованием ультразвукового диспергатора при нанесении образцов (а) и без него (б); на вставках – соответствующие электронограммы.

Традиционный способ нанесения наноматериала на медную сетку с помощью распыления ультразвуковым диспергатором приводит к сминанию и даже частичному скручиванию краев наночастиц ОГ-Б. В то же время без воздействия ультразвука слои ОГ-Б сохраняют исходную практически плоскую форму с возможным легким сдвигом слоев друг относительно друга в одном направлении. Существенные изменения видны на электронограмме. Без воздействия ультразвука структура ОГ-Б представляет собой практически монокристалл (см. рис. 5 б). После даже нескольких секунд воздействия ультразвука появляются характерные дужки на электронограмме, что свидетельствует о небольшом веерообразном смещении листов ОГ-Б.

Особенности ОГ как объекта исследования были отмечены при исследовании его структуры рентгеноспектральным методом. Для усреднения образца ОГ обычно его измельчали. На рис. 6 приведены дифрактограммы ОГ в виде пленки и порошка, полученного механическим измельчением этой пленки в бытовой кофемолке. Оказалось, что дополнительная стадия измельчения приводит не только к уменьшению

интенсивности сигнала при $2\theta = 11,3^\circ$, соответствующего рефлексу $00l$, но и к сдвигу максимума рефлекса в область более малых углов. По-видимому, механическое измельчение пленки частично нарушает структурированность, и, вероятно, растёт гигроскопичность образца, что сопровождается увеличением межплоскостного расстояния.

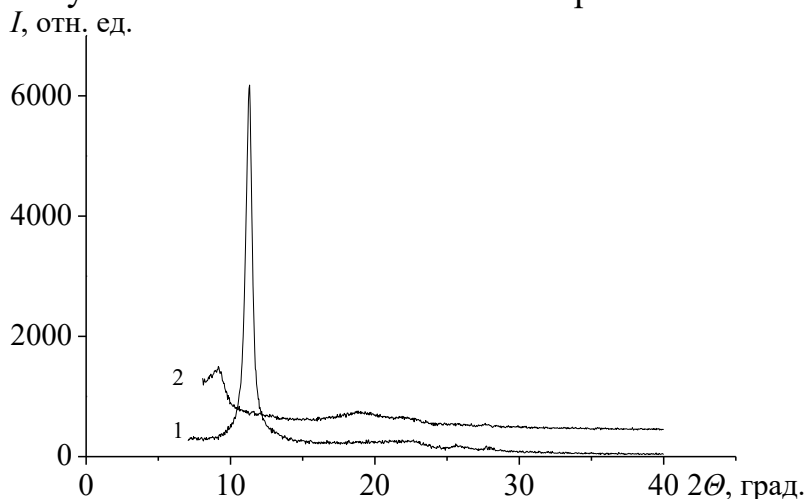


Рис. 6. Рентгеновские диффрактограммы пленки (1) и порошка (2) ОГ.

4. Заключение

Таким образом, при исследовании свойств ОГ следует учитывать, что этот материал является лабильным из-за наличия на поверхности функциональных групп, возможности $\pi-\pi$ взаимодействия базисных плоскостей листов ОГ. Листы ОГ, а особенно оксида графена, обладают гибкостью, под действием $\pi-\pi$ взаимодействий склонны к самостоятельной сборке листов с формированием 3D-структур или слоистых пленок. Под действием ультразвука ОГ способен расщепляться на отдельные слои – оксид графена. Поэтому необходимо учитывать все проводимые с ОГ манипуляции перед методами исследования морфологии поверхности и структурных характеристик, т.к. они могут приводить к получению неожиданных и различающихся результатов для одного и того же образца.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, бюджетная тема «Углеродные наночастицы с заданной морфологией: синтез, структура и физико-химические свойства, FRES-2023-0006».

Библиографический список:

1. Jiříčková, A. Synthesis and applications of graphene oxide: review / A. Jiříčková, O. Jankovský, Z. Sofer, D. Sedmidubský // *Materials*. – 2022. – V. 15. – I. 3. – P. 920-941. DOI: 10.3390/ma15030920.
2. ГОСТ ISO/TS 80004-3-2014. Нанотехнологии. Часть 3. Нанообъекты углеродные. Термины и определения; введ. 01.01.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – V, 9 с.
3. ПНСТ 500-2020/ISO/TS 80004-13:2017. Нанотехнологии. Часть 13. Графен и двухмерные (2D) материалы на его основе. Термины и определения; введ. 01.01.2021. – М.: Стандартинформ, 2017. – V, 25 с.
4. ГОСТ ISO/TS 80004-6-2016. Нанотехнологии. Часть 6. Характеристики нанообъектов и методы их

- определения. Термины и определения; введ. 01.07.2017. – М.: Стандартиформ, 2016. – VI, 28 с.
5. **ГОСТ 34684-2020.** Наноматериалы. Нанотрубки углеродные одностенные. Технические требования и методы испытаний; введ. 01.09.2021. – М.: Стандартиформ, 2021. – III, 11 с.
6. **Алемасова, Н.В.** Влияние ультразвука на структуру восстановленного тиомочевинной оксида графита / Н.В. Алемасова, С.Р. Сухова, В.В. Кравченко и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 765-774. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.765.
7. **Papaianina, O.S.** Graphite oxide – stages of formation and a new view on its structure / O.S. Papaianina, M.V. Savoskin, A.N. Vdovichenko et al. // Theoretical and Experimental Chemistry. – 2013. – V. 49. – I. 2. – P. 88-95. DOI: 10.1002/abio.370040210.
8. **Bannov, A.G.** Role of exposure time in graphite oxide synthesis / A.G. Bannov, O.V. Nikityonok, M.V. Popov, E.A. Maksimovskii // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 31. – I. 3. – P. 499-501. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.777.
9. **Kigozi, M.** Synthesis and characterization of graphene oxide from locally mined graphite flakes and its supercapacitor applications / M. Kigozi, R.K. Koech, O. Kingsley et al. // Results in Materials. – 2020. – V. 7. – Art. № 100113. – 12 p. DOI: 10.1016/j.rinma.2020.100113.
10. **Vo, T.K.** Facile synthesis of graphite oxide/MIL-101(Cr) hybrid composites for enhanced adsorption performance towards industrial toxic dyes / T.K. Vo, T.P. Trinh, V.C. Nguyen, J. Kim // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2021. – V. 95. – P. 224-234. DOI: 10.1016/j.jiec.2020.12.023.
11. **Kim, D.W.** Preparation of a graphene oxide/faujasite composite adsorbent / D.W. Kim, H. Han, H. Kim et al. // Microporous and Mesoporous Materials. – 2018. – V. 268. – P. 243-250. DOI: 10.1016/j.micromeso.2018.04.034.
12. **Gurzędą, B.** Synthesis of graphite oxide by electrochemical oxidation in aqueous perchloric acid / B. Gurzędą, P. Florczak, M. Kempniński et al. // Carbon. – 2016. – V. 100. – P. 540-545. DOI: 10.1016/J.CARBON.2016.01.044.

References:

1. Jiříčková A., Jankovský O., Sofer Z., Sedmidubský D. Synthesis and applications of graphene oxide: review, *Materials*, 2022, vol. 15, issue 3, pp. 920-941. DOI: 10.3390/ma15030920.
2. GOST ISO/TS 80004-3-2014. Nanotekhnologii. Chast' 3. Nanoob"ekty uglerodnye. Terminy i opredeleniya [Russian State Standard ISO/TS 80004-3-2014. Nanotechnology. Part 3. Carbon nanobjects. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, V, 9 p. (In Russian).
3. PNST 500-2020/ISO/TS 80004-13:2017. *Nanotekhnologii. Chast' 13. Grafen i dvukhmernye (2D) materialy na ego osnove. Terminy i opredeleniya* [Preliminary National Standard 500-2020/ISO/TS 80004-13:2017. Nanotechnology. Part 13. Graphene and two-dimensional (2D) materials based on it. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, V, 25 p. (In Russian).
4. GOST ISO/TS 80004-6-2016. *Nanotekhnologii. Chast' 6. Kharakteristiki nanoob"ektov i metody ikh opredeleniya. Terminy i opredeleniya* [Russian State Standard ISO/TS 80004-6-2016. Nanotechnology. Part 6. Characteristics of nano-objects and methods for their determination. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, VI, 28 p. (In Russian).
5. GOST 34684-2020. *Nanomaterialy. Nanotrubki uglerodnye odnostennnye. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Russian State Standard 34684-2020. Nanomaterials. Single-walled carbon nanotubes. Technical requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2021, III, 11 p. (In Russian).
6. Aлемасова N.V., Suhova S.R., Kravchenko V.V. et al. Vliyanie ul'trazvuka na strukturu vosstanovlennogo tiomochevinoj oksida grafita [Effect of ultrasound on the structure of thiourea-reduced graphite oxide], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 765-774. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.765. (In Russian).
7. Papaianina O.S., Savoskin M.V., Vdovichenko A.N. et al. Graphite oxide – stages of formation and a new view on its structure, *Theoretical and Experimental Chemistry*, 2013, vol. 49, issue 2, pp. 88-95. DOI: 10.1002/abio.370040210.
8. Bannov A.G., Nikityonok O.V., Popov M.V., Maksimovskii E.A. Role of exposure time in graphite oxide synthesis, *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 31, issue 3, pp. 499-501. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.777.
9. Kigozi M., Koech R.K., Kingsley O. et al. Synthesis and characterization of graphene oxide from locally mined graphite flakes and its supercapacitor applications, *Results in Materials*, 2020, vol. 7, art. no. 100113, 12 p. DOI: 10.1016/j.rinma.2020.100113.
10. Vo T.K., Trinh T.P., Nguyen V.C., Kim J. Facile synthesis of graphite oxide/MIL-101(Cr) hybrid composites for enhanced adsorption performance towards industrial toxic dyes, *Journal of Industrial and Engineering*

Chemistry, 2021, vol. 95, pp. 224-234. DOI: 10.1016/j.jiec.2020.12.023.

11. Kim D.W., Han H., Kim H. et al. Preparation of a graphene oxide/faujasite composite adsorbent, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 268, pp. 243-250. DOI: 10.1016/j.micromeso.2018.04.034.

12. Gurzęda B., Florczak P., Kempniński M. et al. Synthesis of graphite oxide by electrochemical oxidation in aqueous perchloric acid, *Carbon*, 2016, vol. 100, pp. 540-545. DOI: 10.1016/J.CARBON.2016.01.044.

Original paper

**GRAPHITE OXIDE: PECULIARITIES OF INVESTIGATION of this MATERIAL BY
PHYSICAL METHODS**

N.V. Alemasova¹, D.I Bugorskaya¹, V.V. Burkhovetskii², G.K. Volkova², V.A. Glazunova²,
M.Yu. Zelenskii¹, M.V. Savoskin¹

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.008

Abstract: It is shown by physical methods that the preliminary preparation of samples affects the structure and properties of graphite oxide and partially reduced graphite oxide. The graphite oxide drying technique as the last synthesis stage determines its morphology and structural properties. At drying by sublimation method, the state of graphite oxide in aqueous suspension before the beginning of the process of self-ordering of its sheets is fixed, the data of X-ray diffraction analysis testifies its X-ray amorphous state, the dried graphite oxide appearance is a light yellow powder. Drying of graphite oxide aqueous suspensions at temperatures above room temperature is accompanied by the ordering of the graphite oxide structure under the action of the surface tension and Van der Waals forces with the dark brown film formation. It is shown by scanning and transmission microscopy methods that the method of separation of partially reduced graphite oxide from glass substrates, on which the product is dried, can lead to the formation of wrinkled or roll-shaped structures. When graphite oxide is examined by transmission electron microscopy, even a short exposure to ultrasound (used in the conventional method of depositing the material on a copper grid prior to examination) results in wrinkling and partial curling of the edges of graphite oxide nanoparticles. Mechanical grinding of graphite oxide leads to disordered graphite oxide structure and to the interplanar spacing increase.

Keywords: *graphite oxide, structure, surface morphology, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray diffraction analysis.*

Алемасова Наталья Витальевна – к.х.н., старший научный сотрудник, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Бугорская Дарья Игоревна – младший научный сотрудник, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Бурховецкий Валерий Викторович – научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

Волкова Галина Кузьминична – научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

Глазунова Валентина Александровна – научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

Зеленский Михаил Юрьевич – инженер, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Савоськин Михаил Витальевич – к.х.н., старший научный сотрудник, ФГБНУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

Natalia V. Alemasova – Ph. D., Senior Researcher, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Daria I. Bugorskaya – Junior Researcher, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Valeriy V. Burkhovetskii – Researcher, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

Galina K. Volkova – Researcher, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

Valentina A. Glazunova – Researcher, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

Michael Yu. Zelenskii – Engineer, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Michael V. Savoskin – Ph. D., Senior Researcher, L.M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry

Поступила в редакцию/received: 26.07.2023; после рецензирования/revised: 23.08.2023; принята/accepted: 25.08.2023.