

ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-5-12

УДК 546-05

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СУШКИ НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ОКСИДА ГРАФЕНА, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПЕНОГРАФИТА

Панина Лидия Васильевна¹

ведущий инженер, lida1193@mail.ru

Ефимова Ольга Сергеевна¹

к.х.н., заведующий лабораторией, efimovaos@mail.ru

Попова Анна Николаевна¹

к.х.н., старший научный сотрудник, h991@yandex.ru

Исмагилов Зинфер Ришатович^{1,2}

академик РАН, заведующий кафедрой, Zinfer1@mail.ru

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
650000, Россия, г. Кемерово, Советский пр., 18

²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



Информация о статье

Поступила:

26 октября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

05 декабря 2021 г.

Ключевые слова:

пенографит; оксид графена;
модифицированный метод
Хаммерса; метод
рентгеноструктурного
анализа.

Аннотация.

В работе представлены результаты рентгеноструктурного анализа пленок оксида графена (ОГ), полученных при разных условиях сушки. Суспензию ОГ сушили при помощи сублимационной сушки (лиофилизации), естественной сушке на открытом воздухе и в сушильном шкафу при 105°C. Оксид графена (ОГ) синтезировали по модифицированному методу Хаммерса, используя в качестве исходного материала пенографит (ПГ). Кристалличность структур пленок ОГ исследовали при помощи рентгенодифракционного анализа (РФА) с использованием программы OriginPro 8, для разложения ассиметричных рефлексов на составляющие.

Полученные результаты исследования методом РФА, позволяют получить данные об изменении межплоскостного расстояния пленок ОГ, полученных при различных условиях сушки. Так, значение межплоскостного расстояния, для ОГ полученного из ПГ, по модифицированному методу Хаммерса, при различных условиях высушивания может варьироваться от 6.2 до 9.8 Å.

Для цитирования: Панина Л.В., Ефимова О.С., Попова А.Н., Исмагилов З.Р. Влияние условий сушки на структурные характеристики пленок оксида графена, полученных из пенографита // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 6 (148). – С. 5-12 – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-5-12

Введение

Оксид графена (ОГ) – лист графена атомной толщины, декорированный несколькими кислородными функциональными группами на его базальных плоскостях и его краях, приводящими к гибридной структуре, состоящей из смеси sp²- и sp³-гибридизованных атомов углерода. Изучение физико-химических свойств ОГ, полученные из различных исходных материалов является актуальной задачей. Оксид графена можно синтезировать окислением графита с последующим расслоением оксида графита до оксида графена [1-5]. Возможно получение оксида графена из антрацита [6].

Физико-химические, структурные или морфологические свойства синтезируемого ОГ значительно различаются в зависимости от используемого метода получения, даже различные партии оксида графена, полученные одним и тем же методом окисления, могут иметь несхожесть в их физико-химических свойствах из-за различия в процессах центрифугирования или сушки.

Процесс удаления влаги из твердых и пастообразных материалов путем ее испарения широко используется в химической технологии. Влагу можно удалять из материалов механическими способами (фильтрованием, центрифугированием, отстаиванием). Однако более полное обезвоживание достигается путем испарения влаги и отвода образующихся паров, т.е. с помощью тепловой сушки, при этом использование разнообразных условий сушки приводят к получению неодинаковых типов окисленного графенового материала.

Методика синтеза

Пенографит (ПГ) получали термической обработкой интеркалированного соединения графита (ИСГ) при 900 °С в муфельной печи. Интеркалированные соединения графита (ИСГ) или окисленный графит на основе нитрата графита III - ей ступени предоставлен лабораторией химии углеродных материалов Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, полученный по методике [7,8].

Окисление ПГ проводили при помощи модифицированного метода Хаммерса перманганатом калия в смеси концентрированных серной и фосфорной кислот. Суспензию ОГ осаждали на центрифуге и высушивали при помощи сублимационной сушки (лиофилизации) при -50°C (ОГ-1), естественной сушке на открытом воздухе при 25°C (ОГ-2) и в сушильном шкафу при 105°C (ОГ-3).

Оборудование

Дифрактограммы РФА ПГ и пленок ОГ были получены на порошковом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 ADVANCE A25 с использованием монохроматизированного излучения $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54060\text{\AA}$). Для поглощения не характеристического излучения использовался Ni-фильтр на первичном пучке при комнатной температуре по методу поликристалла (порошка). Условия съемки: классическая схема фокусировки по Бреггу-Брентано (для достижения высокой интенсивности дифрагированного излучения и высокого разрешения). Регистрация дифрактограмм проводилась в пошаговом режиме (шаг сканирования 0.02°, скорость сканирования 5*10-5 град/с). Дифрактограммы РФА обрабатывались с использованием программы OriginPro 8.

Обсуждение результатов

Различные партии оксида графена, полученные одним и тем же методом окисления, могут обладать структурным различием из-за процессов получения сухого продукта, т.е. высушивания. Так, в работе [9] методом СЭМ показано, что морфология получаемого продукта ОГ сильно различается в зависимости от условий сушки.

В работе, в качестве объекта исследования использовали пленки ОГ, полученные из ПГ по модифицированному методу Хаммерса, с различным методом высушивания.

Кристалличность, расположение атомов и размер кристаллов графеновых материалов могут быть исследованы с помощью рентгеновской дифракции [10-12]. На рисунке 1 представлена дифрактограмма ПГ, соответствующая [8] (а) и пример разложения рефлексов РФА (б). На рисунке 2 приведены дифрактограммы образцов ОГ-1, ОГ-2, ОГ-3 (а,в,д) и примеры разложения рефлексов РФА этих образцов (б,г,е). Рентгенограммы пленок ОГ (рис.2) имеют характерные пики дифракции при углах $2\theta = 9.3, 10.5$ и 13.8 , для образцов ОГ-1, ОГ-2, ОГ-3, соответственно. При изменении условий получения пленок ОГ-1, ОГ-2 и ОГ-3 происходит смещение положения рефлекса на рентгенограмме в область больших углов 2θ . Отсутствие пика дифракции в образцах ОГ при брэгговском угле $2\theta = 26.4$ ($d = 3.4 \text{\AA}$), соответствующее исходному материалу-ПГ, указывает о полном окислении материала, что согласуется с [13]. Увеличение межплоскостного расстояния окисленного образца ОГ, по сравнению с исходным материалом ПГ, подтверждает эффективность реакции окисления за счет введения кислородных групп. Размер межслоевого расстояния определяется количеством и природой функциональных групп на базальных поверхностях оксида графена.

Более детальное исследование дифракционных пиков, с помощью методов разложения на составляющие, позволило выявить параметры кристаллической решетки и степень расширения окисленных графеновых структур. Ассиметричные рефлексы были разложены на пики, профиль которых описывается Гауссианом с максимумом на углах 2θ , характеризующих определенные субструктуры образцов.

Результаты рентгеноструктурных характеристик образцов ПГ, ОГ-1, ОГ-2, ОГ-3 представлены в таблице 1. Согласно работе [14], межплоскостные расстояния (d_{001}) для образцов рассчитывали по формуле (1), где λ – длина волны рентгеновского излучения ($\lambda=1.54060 \text{\AA}$); θ – угол отражения (001) ((001) – (002) или (004)), n -порядок отражения, т.е. положительное целое число. Толщину пакетов полиареновых слоев

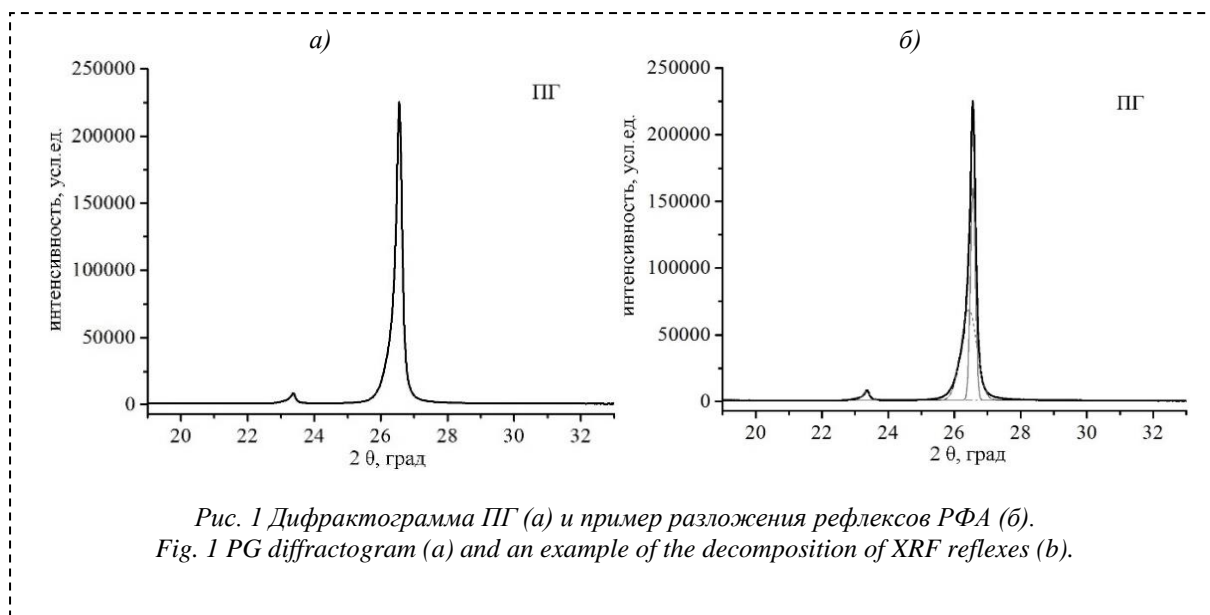


Рис. 1 Дифрактограмма ПГ (а) и пример разложения рефлексов РФА (б).
 Fig. 1 PG diffractogram (a) and an example of the decomposition of XRF reflexes (b).

(L_c) оценивали по формуле (2), где β_{001} – ширина рефлекса (001) на половине его высоты. Степень графитации фазы (соответствие структуре графита) рассчитывали по формуле (3), где 3.440 – межплоскостное расстояние в углероде турбостратного строения, 3.354 – межплоскостное расстояние в бездефектном монокристалле графита. Плотность упаковки слоев рассчитывали по формуле (4). Число полиареновых слоев в пачке (N) оценивали по формуле (5) [15,16]. Продольный размер структурных элементов (L_a) рассчитывался по формуле Уоррена (5) [17], где β_{001} – ширина рефлекса (100) на половине его высоты, θ_{001} – величина угла отражения плоскости (100).

$$d_{001} = n\lambda/2 \sin \theta_{001} \quad (1)$$

$$L_c = 0.9 \cdot \lambda / (\beta_{001} \cdot \cos \theta_{001}) \quad (2)$$

$$Y = (3.440 - d_{001}) / (3.440 - 3.354) \quad (3)$$

$$\rho = 0.762/d_{001} \quad (4)$$

$$N = L_c / d_{001} + 1 \quad (5)$$

$$L_a = 1.84 \cdot \lambda / (\beta_{001} \cdot \cos \theta_{001}) \quad (6)$$

Ниже представлены данные рентгеноструктурных характеристик ПГ, ОГ-1, ОГ-2, ОГ-3, с разложением пиков на составляющие при помощи программы OriginPro 8.

Образец ПГ (табл. 1) имеет три кристаллические фазы, с межплоскостным расстоянием $d = 3.4-3.8 \text{ \AA}$. Из рентгеноструктурной характеристики ПГ видно, что образец состоит на 2% (фаза 1), 56% (фаза 2) и 42% (фаза 3) из 73-слойных, 39- и 125-слойных пачек полиареновых слоев, соответственно. При окислении ПГ до ОГ, происходит увеличение межплоскостного расстояния, связанное с присоединением кислородных групп к поверхности графенового листа.

Из табл. 1 видно, что использование лиофильной сушки позволяет получить наибольшее значение межплоскостного расстояния $d=9.5 \text{ \AA}$, для оксида графена полученного из пенографита. Естественная сушка на открытом воздухе (ОГ-2) и в сушильном шкафу при 105°C (ОГ-3) приводит к получению образцов с меньшим межплоскостным расстоянием, чем при сублимационной сушке. Так, образец ОГ-2 соответствует межплоскостному расстоянию $d=8.5 \text{ \AA}$, ОГ-3 соответствует $d=6.4 \text{ \AA}$. При изменении температуры сушки пленок ОГ происходит уменьшение значений межплоскостного расстояния.

На рис.3 представлена зависимость значения межплоскостного расстояния (d , \AA) от температуры сушки образца ОГ ($R^2=0.9667$). На рис.4 представлена зависимость значения продольного размера структурных элементов (L_a , \AA) от температуры сушки образца (T , $^\circ\text{C}$) ОГ ($R^2=1$).

Таким образом, метод РФА позволяет получить данные об изменении межплоскостного расстояния в образцах ОГ, полученного по модифицированному методу Хаммерса из ПГ. Полученные значения межплоскостного расстояния варьируются от 6.2 до 9.8 \AA в зависимости от метода сушки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института углеродной и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН по проекту 121031500512-7. Работа выполнена с использованием оборудования КемЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

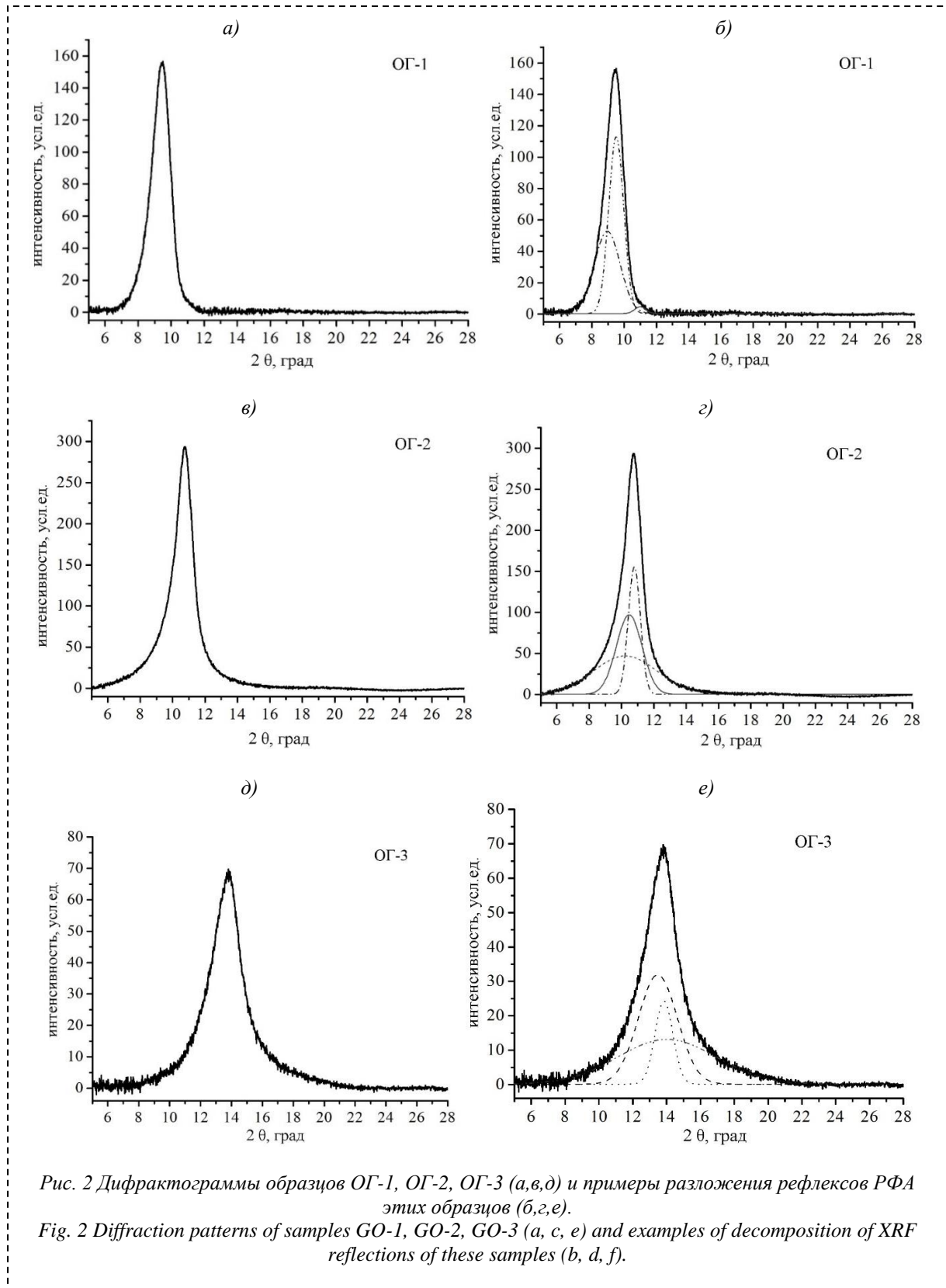


Рис. 2 Дифрактограммы образцов ОГ-1, ОГ-2, ОГ-3 (а, в, д) и примеры разложения рефлексов РФА этих образцов (б, г, е).

Fig. 2 Diffraction patterns of samples GO-1, GO-2, GO-3 (a, c, e) and examples of decomposition of XRF reflections of these samples (b, d, f).

Таблица 1. Рентгеноструктурная характеристика ПГ, ОГ-1, ОГ-2, ОГ-3.
 Table 1. X-ray structural characteristics of PG, GO-1, GO-2, GO-3.

Образец	Характеристика									
	Фаза, №	Содерж. фазы, %	R ²	2 θ, град	d, Å	L _c , Å	L _a , Å	ρ, г/см ³	N, шт	Y, %
ПГ	1	2	0.9977	23.3	3.8	350	716	2.00	73	-
	2	56		26.4	3.4	171	350	2.26	39	83
	3	42		26.6	3.4	543	1111	2.27	125	100
	1	100		26.4	3.4	331	677	2.26	76	
ОГ-1	1	1	0.9986	10.9	8.1	128	261	0.94	14	-
	2	54		9.5	9.3	87	178	0.82	8	
	3	45		9.0	9.8	54	108	0.77	5	
	1	100		9.3	9.5	72	147	0.80	7	
ОГ-2	1	35	0.9995	10.5	8.4	49	99	0.90	5	-
	2	26		10.8	8.2	106	216	0.93	11	
	3	39		10.2	8.7	19	39	0.88	2	
	1	100		10.5	8.5	52	106	0.90	5	
ОГ-3	1	44	0.9947	13.5	6.6	33	67	1.16	4	-
	2	15		13.8	6.4	74	152	1.19	10	
	3	41		14.2	6.2	12	25	1.22	2	
	1	100		13.8	6.4	31	63	1.19	4	

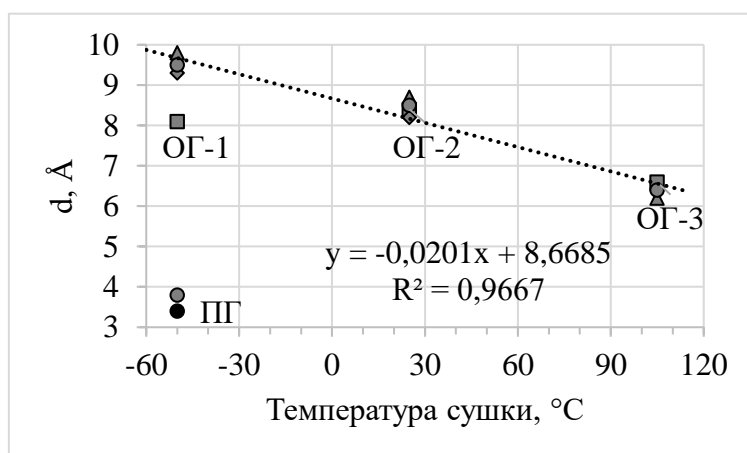


Рис. 3 Зависимость значения межплоскостного расстояния (d , Å) от температуры сушки образца (T , °C) ОГ.

Fig. 3 Dependence of the interplanar distance (d , Å) on the sample drying temperature (T , °C) of the exhaust gas.

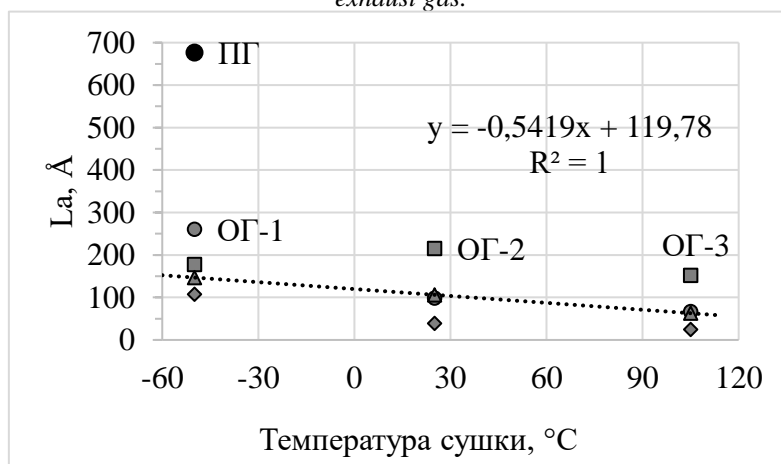


Рис. 4 Зависимость значения продольного размера структурных элементов (L_a , Å) от температуры сушки образца ОГ.

Fig. 4 Dependence of the value of the longitudinal size of structural elements (L_a , Å) on the drying temperature of the GO sample.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Long, D. Preparation of nitrogen-doped graphene sheets by a combined chemical and hydrothermal reduction of graphene oxide / W. Li, L. Ling, J. Miyawaki, I. Mochida, S. H. Yoon // *Langmuir*. – 2010. – V.26. – P. 16096–16102.
2. Zhanga, Z. Characterization of graphene oxide: Variations in reported approaches // Z. Zhang, H. C. Schniepp, D. H. Adamson // *Carbon*. – 2019. – V. 154. – P. 510-521.
3. Zhang, L. Photocatalytic patterning and modification of graphene / L. Zhang, S. Diao, Y. Nie, K. Yan, N. Liu, B. Dai, Q. Xie, A. Reina, J. Kong, Z. Liu // *Journal of the American Chemical Society*. - 2011. V. 133. - № 8. - P. 2706-2713.
4. Shulga, Y. M. Graphene oxide films as separators of polyaniline-based supercapacitors // Shulga Y. M., Baskakov S. A., Smirnov V. A., Shulga N. Y., Belay K. G., Gutsev G. L. // *J. Power Sources*. – 2014. V. 245, P. 33-36.
5. Yakovlev, A.V. Synthesis of multilayer graphene oxide in electrochemical graphite dispersion in H₂SO₄ // Yakovlev A.V., Yakovleva E.V., Vikulova M.A., Frolov I.H., Rakhmetulina L.A., Tseluikin V.N., Krasnov V.V., Mostovoy A.S. // *Russian Journal of Applied Chemistry*. - 2020. T. 93. № 2. P. 219-224.
6. Савицкий, Д.П. Получение коллоидного раствора оксида графена из природного угля / Д. П. Савицкий, А. С. Макаров, В. В. Гончарук // Доклады Национальной академии наук Украины. - 2016. - № 6. - С. 87-94.
7. Патент РФ № 2011132964/05, 08.08.2011. Сорокина Н.Е., Малахо А.П., Филимонов С.В., Годунов И.А., Павлов А.А., Авдеев В.В. Способ получения терморасширенного графита и фольга на его основе // Патент России № 2480406. 2013.
8. Композиционные наноматериалы на основе интеркалированного графита: учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» / Н.Е. Сорокина, В.В. Авдеев, А.С. Тихомиров, М.А. Лутфуллин, М.И. Саидаминов // М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. - 50 с.
9. Илькевич, Л.В. Получение оксида графена из терморасширенного графита и изучение его физико-химических свойств / Л.В. Илькевич, Т.Б. Ткаченко, А.В. Самаров, А.А. Бурцев, С.А. Созинов, Л.М. Хицова, А.Н. Попова, Ч.Н. Барнаков, А.П. Козлов // Известия Академии наук. Серия химическая. - 2018. - № 6. - С. 986-990.
10. Lee, H.C. Review of the synthesis, transfer, characterization and growth mechanisms of single and multilayer graphene / H.C. Lee, W.W. Liu, S.P. Chai, A.R. Mohamed, A. Aziz, C.S. Khe, N.M.S. Hidayah, U. Hashim // *RSC Adv*. – 2017. – V. 7 (26). – P. 15644-15693.
11. Li, F. A Mussel-inspired method to fabricate reduced graphene oxide/g-C₃N₄ composites membranes for catalytic decomposition and oil-in-water emulsion separation / F. Li, Z. Yu, H. Shi, Q. Yang, Q. Chen, Y. Pan, G. Zeng, L. Yan // *Chem. Eng.J.* – 2017. – V. 322. – P. 33-45.
12. Johra, F. T. Facile and safe graphene preparation on solution based platform / F. T. Johra, J. W. Lee, W. G. Jung // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2014. -V. 20. – I. 5. – P. 2883-2887.
13. Karthikeyan, K. The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation / K. Karthikeyan, V. Murugan, Y. Kyusik, S.J. Kim // *Carbon*. - 2013. – V. 53. - P. 38–49.
14. Попова, А. Н. Оценка кристаллографических параметров структурных углеродных материалов на примере графита методом рентгеновской дифракции. - Бултеровские сообщения, 2017. - Т.51, - № 7. - С. 86-90.
15. Khokhlova, G.P. Effect of heat treatment conditions on the catalytic graphitization of coal-tar pitch / G.P. Khokhlova, Ch.N. Barnakov, V.Yu. Malysheva, A.N. Popova, Z.R. Ismagilov // *Solid Fuel Chemistry*. - 2015. - Т. 49, № 2. P. 66-72.
16. Hector, A. B. Synthesis of fluorinated graphene oxide by using an easy one-pot deoxyfluorination reaction / A.B. Hector, C.C. Ahirton, Y.P. Mehrdad, A.V. Gabriela, F.Marcos, F. Pablo, N. C. Andronico, V. Raquel, A. L. Miguel // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2018. - V. 524. - P. 219-226.
17. Liu, Y. Mechanism of lithium insertion in hard carbons prepared by pyrolysis of epoxy resins / Y. Liu, J.S. Xue, T. Zheng, J.R. Dahn // *Carbon*. -1996. - Vol. 34. - P. 193-200.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-5-12

UDS 546-05

INFLUENCE OF DRYING CONDITIONS ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF GRAPHENE OXIDE FILMS OBTAINED FROM PENOGRAPHITE

Lydia V. Panina¹

Lead Engineer

Olga S. Efimova¹

C.Sc. in Chemistry, Head of the Laboratory

Anna N. Popova¹

C.Sc. in Chemistry, senior researcher

Zinifer R. Ismagilov^{1,2}

Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS,
650000, Kemerovo, 18, pr. Sovetsky, Russian Federation

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya St, Kemerovo, 650000, Russian Federation



Article info

Received:

26 October 2021

Revised:

30 November 2021

Accepted:

05 December 2021

Keywords: thermally expanded graphite; graphene oxide; modified Hammers method; X-ray structural analysis method.

Abstract.

This paper presents the results of X-ray diffraction analysis of graphene oxide films obtained under different drying conditions. The exhaust gas suspension was dried by freeze drying (lyophilization), natural drying in the open air, and in an oven at 105 ° C. Graphene oxide (GO) was synthesized according to the modified Hammers method using graphite foam (PG) as a starting material. The crystallinity of the structures of GO films was investigated using X-ray diffraction analysis (XRD) using the OriginPro 8 software to decompose asymmetric reflections into components.

The obtained results of the study by the XRD method make it possible to obtain data on the change in the interplanar distance of the GO films obtained under different drying conditions. Thus, the value of the interplanar distance for the exhaust gas obtained from the PG, according to the modified Hammers method, under different drying conditions can vary from 0.64-0.95 nm.

For citation Panina L.V., Efimova O.S., Popova A.N., Ismagilov Z.R. Influence of drying conditions on structural characteristics of graphene oxide films obtained from penographite. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.6 (148), pp. 5-12. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-5-12

REFERENCES

1. Long D. Preparation of nitrogen-doped graphene sheets by a combined chemical and hydrothermal reduction of graphene oxide // *Langmuir*. 2010. Vol. 26. P. 16096–16102.
2. Zhanga Z. Characterization of graphene oxide: Variations in reported approaches // *Carbon*. 2019. Vol. 154. P. 510-521.
3. Zhang L. Photocatalytic patterning and modification of graphene // *Journal of the American Chemical Society*. 2011. Vol. 133. No. 8. P. 2706-2713.
4. Shulga Y. M. Graphene oxide films as separators of polyaniline-based supercapacitors // *J. Power Sources*. 2014. Vol. 245. P. 33-36.
5. Yakovlev A.V. Synthesis of multilayer graphene oxide in electrochemical graphite dispersion in H₂SO₄ // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2020. T. 93. No 2. P. 219-224.
6. Savitskiy D.P. Preparation of a colloidal graphene oxide solution from natural coal // *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2016. No 6. P. 87-94.
7. RF Patent No. 2011132964/05, 08.08.2011. Sorokina N.E., Malakho A.P., Filimonov S.V., Godunov I.A., Pavlov

A.A., Avdeev V.V. Method of obtaining thermally expanded graphite and foil based thereon // Patent of Russia No. 2480406. 2013.

8. Sorokina N.E., Avdeev V.V., Tikhomirov A.S., Lutfullin M.A., Saidaminov M.I. Kompozitsionnye nanomaterialy na osnove interkalirovannogo grafita: uchebnoe posobie dlya studentov po spetsial'nosti «Kompozitsionnye nanomaterialy» [Composite nanomaterials based on intercalated graphite: a textbook for students in the specialty "Composite nanomaterials"]. MGU imeni M.V. Lomonosova [Moscow State University named after M.V. Lomonosov]. 2010. – P. 50.

9. Ilkevich L.V. Fabrication and physicochemical characterization of graphene oxide derived from thermally expanded graphite // Russian Chemical Bulletin. 2018. T. 67. No 6. P. 986-990.

10. Lee H.C. Review of the synthesis, transfer, characterization and growth mechanisms of single and multilayer graphene // RSC Adv. 2017. Vol. 7. No 26. P. 15644-15693.

11. Li F. A Mussel-inspired method to fabricate reduced graphene oxide/g-C₃N₄ composites membranes for catalytic decomposition and oil-in-water emulsion separation // Chem. Eng.J. 2017. Vol. 322. P. 33-45.

12. Johra F. T. Facile and safe graphene preparation on solution based platform // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. Vol. 20. I. 5. P. 2883-2887.

13. Karthikeyan, K. The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation // Carbon. 2013. Vol. 53. P. 38–49.

14. Popova A. N. Otsenka kristallograficheskikh parametrov strukturnykh uglerodnykh materialov na primere grafita metodom rentgenovskoy difraktsii [Evaluation of crystallographic parameters of structural carbon materials by the example of graphite by X-ray diffraction]. Butlerovskie soobshcheniya [Butlerov messages]. 2017. T.51. No 7. P. 86-90.

15. Khokhlova G.P. Effect of heat treatment conditions on the catalytic graphitization of coal-tar pitch // Solid Fuel Chemistry. 2015. T. 49. No 2. P. 66-72.

16. Hector A. B. Synthesis of fluorinated graphene oxide by using an easy one-pot deoxyfluorination reaction // Journal of Colloid and Interface Science. 2018. Vol. 524. P. 219-226.

17. Liu Y. Mechanism of lithium insertion in hard carbons prepared by pyrolysis of epoxy resins // Carbon. 1996. Vol. 34. P. 193-200.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).