

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОЛЬГ НА ОСНОВЕ НИЗКОПЛОТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.А. Калашник, С.Г. Ионов

Наталья Александровна Калашник \*, Сергей Геннадьевич Ионов

Кафедра химической технологии и новых материалов, Химический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ул. Ленинские горы, 1, стр. 11, Москва, Российская Федерация, 119991

E-mail: natali.koshina@gmail.com \*, ionov@highp.chem.msu.ru

*Разработана методика синтеза низкоплотного углеродного материала путем диспергирования дробленой графитовой фольги, пропитанной водными растворами поверхностно-активного вещества и фосфорной кислоты. Фосфорная кислота использовалась с целью повышения термостабильности полученного материала, в то время как использование поверхностно-активного вещества увеличивало степень диспергирования графитовой матрицы. Графитовые фольги различной толщины и плотности изготавливали прессованием низкоплотного углеродного материала без связующего с последующей холодной прокаткой на лабораторной линии. Исследованы механические свойства полученных материалов (прочность на разрыв, сжимаемость, восстанавливаемость, упругость). Отмечено, что прочность на разрыв исследуемых фольг линейно растет с увеличением плотности, и при определенной плотности изменяется угол наклона. Впервые установлено, что графитовые фольги обладают анизотропией прочности на разрыв для образцов одинаковой плотности, взятых вдоль и поперек оси прокатки. Показано, что сжимаемость графитовой фольги линейно уменьшается, а восстанавливаемость увеличивается с увеличением ее плотности. Исследованы температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности в интервале температур от 300 К до 700 К. Экспериментальная температурная зависимость теплоемкости описана с помощью уравнения Майера-Келли. Установлено, что температура начала окисления графитовой фольги, полученной с использованием поверхностно-активного вещества и фосфорной кислоты, смещается на 80 К в сторону более высоких температур. Показано, что процесс окисления фольги, полученной с использованием поверхностно-активного вещества и фосфорной кислоты, задается моделью двух параллельных реакций, которые описываются уравнениями Праута-Томпкина реакции  $n$ -ого порядка с автокатализом. Определены кинетические характеристики полученных уравнений.*

**Ключевые слова:** графитовая фольга, прочность на разрыв, упругость, сжимаемость, восстанавливаемость, теплоемкость, теплопроводность

## MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF GRAPHITE FOILS BASED ON LOW-DENSITY CARBON MATERIALS

N.A. Kalashnik, S.G. Ionov

Natalia A. Kalashnik\*, Sergey G. Ionov

Division of Chemical Technology and New Materials, Chemistry Department, Moscow State University, Leninskie Gory, 1/11, Moscow, 119991, Russia

E-mail: natali.koshina@gmail.com\*, ionov@highp.chem.msu.ru

*The method of producing low-density carbon material by thermal decomposition of graphite foil was developed. Grinded graphite foil was impregnated with distilled water, aqueous solutions of phosphoric or boric acids or surface-active substance. Low-carbon material was obtained by thermal shock at 900 °C. Flexible graphite foils with a different density and a thickness were prepared by pressing low-density carbon material without binder with subsequent rolling with a set of laboratory devices. Using phosphoric and boric acids the aim to introduce fire retardant additives as well as using surfactant the aim to decrease surface tension thereby increasing expansion ratio were pursued. The mechanical properties of produced materials (tensile strength, compressibility, reducibility and elasticity) were studied. It is shown that the tensile strength of investigated foils increases linearly with increasing in density, and a change of slope of the line  $\sigma(\rho)$  is observed at a certain density. The anisotropy of properties expressed in the difference of values of tensile strength for samples of the same density taken along and across the axis of the rolling of foils should be noted. The temperature dependences of the heat capacity and the thermal conductivity in the temperature range from 300 to 700 K were investigated. An oxidation of samples modified with phosphoric acid together with surface-active substance was described by a model of two parallel reactions (by the equations of Prout-Tompkins reaction with autocatalysis). Arrhenius parameters and reaction orders for reactions of thermal oxidation of the obtained carbon materials were determined. It is shown with thermogravimetric analysis that the introduction of phosphoric acid together with surface-active substance resulted in a shift of the temperature of the oxidation start by 80 K.*

**Key words:** graphite foil, tensile strength, elasticity, compressibility, recoverability, heat capacity, heat conductivity

### Для цитирования:

Калашник Н.А., Ионов С.Г. Механические и теплофизические свойства фольг на основе низкоплотных углеродных материалов. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 11-16

### For citation:

Kalashnik N.A., Ionov S.G. Mechanical and thermophysical properties of graphite foils based on low-density carbon materials. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 9. P. 11-16

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время несомненный интерес вызывает разработка методов получения нанослоистых углеродных материалов, в т.ч. за счет диспергирования гибкой графитовой фольги (ГФ) [1]. В ряде методик предложен способ получения низкоплотных углеродных материалов (НУМ) на основе дробленой графитовой фольги (ДФФ): пропиткой последней в различных реагентах, таких как криогенные жидкости [2], вода или водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) [3], с последующей термодеструкцией. Значения на-

сыпной плотности полученного материала достаточно высоки, что негативно сказывается на его физико-химических свойствах. Целью работы было получение НУМ с минимальной насыпной плотностью и максимально возможной термостойкостью и исследование механических и теплофизических свойств ГФ, полученной на их основе.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Низкоплотные углеродные материалы получали по следующей методике (более подробно описана в [4]): дробленую графитовую фольгу вы-

держивали в дистиллированной воде, водных растворах ПАВ (Сульфенол-П) или фосфорной кислоты с добавлением ПАВ в соотношении  $m(\Gamma\Phi) : m(\text{раствора}) = 1:5$ . Затем отфильтровывали основную часть жидкости и подвергали термообработке при 900 °С в муфельной печи.

Фосфорная и борная кислоты использовались с целью повышения термостабильности полученного материала, ПАВ – для увеличения степени диспергирования графитовой матрицы. На рис. 1 показаны значения насыпной плотности полученных низкоплотных углеродных материалов.

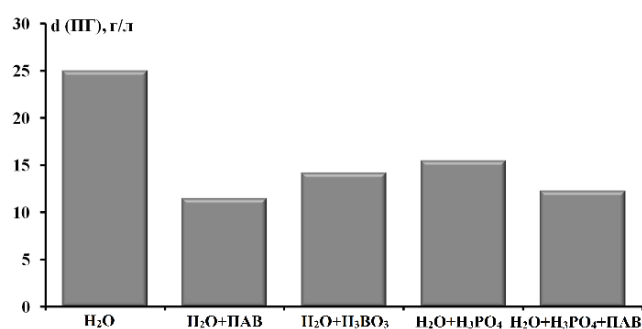


Рис. 1. Значения насыпной плотности полученных НУМ  
Fig. 1. The values of the bulk density of low-density carbon materials

Образцы графитовой фольги получали холодной прокаткой без связующего НУМ на лабораторной линии, подробно описанной в [5]. Для маркировки образцов будем использовать следующие обозначения в зависимости от жидкости, которой пропитывали ДГФ: ГФ<sub>1</sub> – пропитка водным раствором ПАВ (1,6%) в течение 2 ч; ГФ<sub>2</sub> – водным раствором фосфорной кислоты (4%) с добавлением ПАВ (1,6%) в течение 2 ч; ГФ<sub>3</sub> – дистиллированной водой в течение 3 ч; ГФ<sub>4</sub> – водным раствором борной кислоты (4,5%) в течение 30 мин.

Механические испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине *Hounsfield H5K-S*, управляемой с помощью пакета программ Qmat 3.95s. Образцы для испытаний имели форму прямоугольного параллелепипеда размерами 150×25×0,3 мм<sup>3</sup>. Измерения проводили при комнатной температуре, скорость перемещения зажима 7 мм/мин, рабочая длина образца (расстояние между зажимами) – 100 мм, предварительная нагрузка на образец – 0,5 Н. Данные измерений передавались на компьютер и фиксировались в виде зависимости величины нагрузки ( $F$ , Н) от удлинения образца ( $l$ , мм). Затем рассчитывали предел прочности на разрыв,  $\sigma = F_{max}/(b \cdot \delta)$ ,  $F_{max}$  – максимальная нагрузка,  $b$  – ширина,  $\delta$  – толщина образца.

Определение упругих свойств образцов (сжимаемость, восстанавливаемость, упругость) проводили по методике, разработанной в соответствии со стандартом ASTM F- 36-99 (2003). Размеры образцов 25×25 мм<sup>2</sup>, высота не менее 1,6 мм. Измерения упругих характеристик образцов проводили с помощью индентора диаметром  $D = 6,3$  мм. Измерения проводили на универсальной испытательной машине *Hounsfield H5K-S* при комнатной температуре и скорости перемещения верхнего зажима 0,8 мм/мин. Механические характеристики материала рассчитывали по следующим формулам:  $Rec = (L_2-L_1)/(L_0-L_1) \cdot 100\%$  (восстанавливаемость),  $\beta = (L_0-L_1)/L_0 \cdot 100\%$  (сжимаемость),  $Res = (L_2-L_1)/L_1 \cdot 100\%$  (упругость), где  $L_0$  – толщина образца под предварительной нагрузкой,  $L_1$  – толщина образца под основной нагрузкой,  $L_2$  – толщина образца после снятия нагрузки.

Измерение удельной теплоемкости проводили на дифференциальном сканирующем калориметре *NETSCH DSC 204 Phoenix* в динамической атмосфере аргона (70 мл/мин) при скорости нагревания 10 К/мин.

Определение коэффициента температуропроводности  $a$  осуществляли с помощью метода лазерного импульса на приборе *Netzsch LFA 457*. Образцы представляли собой цилиндры диаметром 12,7 мм и высотой 0,3 мм. Значения коэффициента температуропроводности пересчитывали в коэффициент теплопроводности  $\lambda$  с использованием значений удельной теплоемкости  $C_p$  и плотности  $\rho$  по формуле:  $\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho$ .

Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на синхронном термоанализаторе *NETZSCH STA 449C Jupiter* при нагреве образца в потоке воздуха (50 мл/мин) до 1400 К со скоростями: 5 К/мин, 10 К/мин и 15 К/мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость прочности на разрыв от плотности идентична для ГФ<sub>1</sub> и ГФ<sub>2</sub> и имеет две особенности: изменение угла наклона при плотности ~1,3 г/см<sup>3</sup>, а также явление анизотропии прочности на разрыв образцов, полученных вдоль (||) и поперек ( $\perp$ ) оси прокатки (рис. 2).

Зависимости хорошо описываются линейными функциями вида  $\sigma(\rho) = k_1 \cdot \rho + b_1$  до точки перегиба и  $\sigma(\rho) = k_2 \cdot \rho + b_2$  после точки перегиба, где  $k_1$  и  $k_2$  – угловые коэффициенты [МПа·см<sup>3</sup>/г],  $b_1$  и  $b_2$  – свободные члены [МПа]. Значения коэффициентов  $k$  [МПа·см<sup>3</sup>/г] и  $b$  [МПа] приведены в табл. 1.

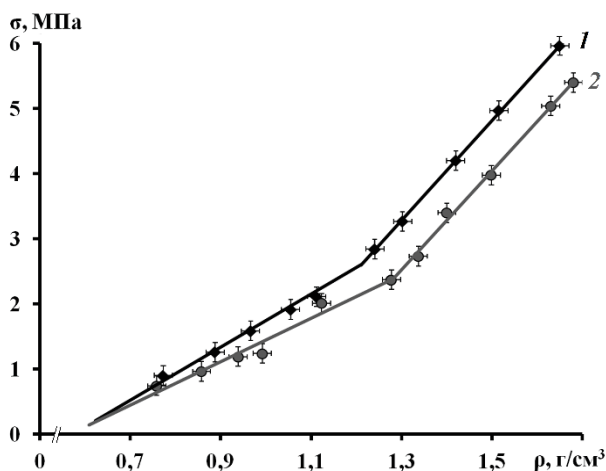


Рис. 2. Зависимость прочности на разрыв ( $\sigma$ ) графитовой фольги (ГФ1) от плотности ( $\rho$ ) вдоль (1) и поперек (2) оси прокатки

Fig. 2. The density dependence of tensile strength of graphite foil samples (GF1) along (1) and across (2) the rolling axis

Таблица 1

Угловые коэффициенты зависимости  $\sigma(\rho)$  изученных образцов

Table 1. Angular coefficients of the  $\sigma(\rho)$  dependence of graphite foil samples

Образец	$k_1$	$b_1$	$k_2$	$b_2$
ГФ <sub>1</sub> (  )	4,08	-2,33	7,67	-6,68
ГФ <sub>1</sub> (⊥)	3,34	-1,89	7,57	-7,31
ГФ <sub>2</sub> (  )	2,62	-1,28	8,03	-7,66
ГФ <sub>2</sub> (⊥)	2,33	-1,01	6,67	-6,54

Скачкообразное изменение производной  $d\sigma/d\rho$  мы связываем с резким изменением суммарной площади контактов частиц НУМ в ГФ при плотности  $\rho \sim 1,3 \text{ г/см}^3$ , которое теоретически предсказано в работе [6].

Следует отметить анизотропию предела прочности на разрыв для образцов одинаковой плотности, взятых вдоль и поперек оси прокатки фольг (рис. 2). С нашей точки зрения это связано с изменением топологии пор. По данным малоуглового рассеяния нейтронов в статье [7] показано, что при первичном прессовании низкоплотного углеродного материала образуются сферические поры, которые при повышении давления трансформируются в эллипсоидальные, причем наименьшая полуось эллипсоида располагается перпендикулярно оси прокатки.

Наряду с другими трехмерными дефектами, микропоры являются концентраторами приложенных напряжений, снижая реальную прочность материалов за счет высоких локальных перенапряжений, создаваемых между группой пор. Согласно теоретическим расчетам механики твердого

тела, максимальные нагрузки в образце  $\sigma_{\max}$  достигаются на границах пор и рассчитываются по формулам  $\sigma_{\max} = 3\sigma$  – для сферического и  $\sigma_{\max} = \sigma \cdot (1+2b/a)$  – для эллипсоидального сечения пор [8]. В связи с тем, что длина полуоси  $b$  эллипсоида превосходит длину полуоси  $a$ , максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  в образце будет развиваться в плоскости с эллипсоидальным сечением пор, т.е. в плоскости разрыва перпендикулярного образца, что и приведет к меньшему пределу прочности на разрыв  $\sigma(\rho)$ .

Сжимаемость отражает суммарную (упругую и пластическую) деформацию образца при нагрузке в процентах по отношению к исходной высоте, а восстанавливаемость – вклад упругой составляющей в общую деформацию. Пористость образцов рассчитывали по формуле  $P = 1 - \rho_{\text{ГФ}}/\rho_{\text{Г}}$  [9], где  $P$  – пористость образца,  $\rho_{\text{Г}}$  – рентгеновская плотность природного графита;  $\rho_{\text{ГФ}}$  – плотность образца графитовой фольги.

Полученные зависимости для образцов ГФ<sub>1</sub> при прилагаемой нагрузке 35 МПа представлены на рис. 3. Сжимаемость материала падает с увеличением плотности, что связано с уменьшением пористости, т.е. свободного объема, куда могут уплотняться частицы НУМ. Возрастание восстанавливаемости также объясняется сближением частиц и уменьшением свободного пространства между ними. Если при низких плотностях происходит сначала уплотнение материала, а затем уже он начинает работать как упругий элемент, то при высоких – уплотнение почти не происходит, и материал работает в своей упругой области. Об этом свидетельствуют высокие значения восстанавливаемости  $\sim 40\%$ . При нагрузке в 10 и 15 МПа получены аналогичные зависимости.

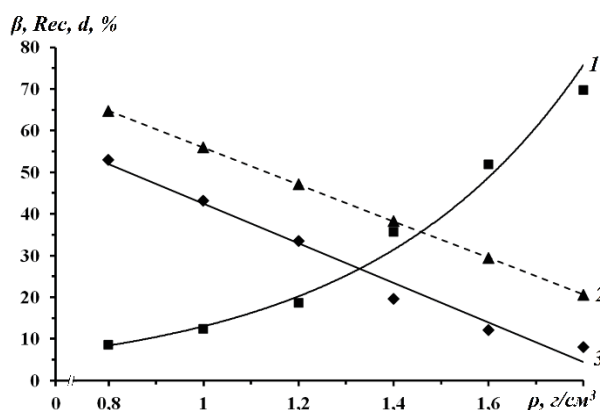


Рис. 3. Зависимость восстанавливаемости (1), пористости (2) и сжимаемости (3) образцов ГФ<sub>1</sub> от плотности при нагрузке 35 МПа

Fig. 3. The density dependence of reducibility (1), porosity (2) and compressibility (3) of GF<sub>1</sub> samples (35 MPa load)

Авторы статьи [7] с помощью малоуглового рассеяния нейтронов наблюдали изменение размеров и формы пор в образцах графитовой фольги плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup> при приложении к ней нагрузки до 108 Па и экспериментально обнаружили, что вначале происходит деформация больших пор, а затем расщепление их на более мелкие.

Зависимость упругости от плотности при нагрузке в 15 МПа можно разбить на два участка. На первом (до 1,3 г/см<sup>3</sup>) она практически не зависит от плотности и составляет ~ 10%. Второй участок характеризуется падением упругости до 6% при плотности 1,8 г/см<sup>3</sup>. С нашей точки зрения упругость фольги обусловлена наличием в ГФ закрытых пор различного размера, но при определенном давлении при прессовании (как следствие, при определенной плотности), как уже отмечалось, происходит резкое изменение распределения пор по размерам, которое мы связываем со скачкообразным ростом числа контактов между графеновыми пачками НУМ.

Для образцов ГФ<sub>1</sub> были получены температурные зависимости удельной теплоемкости и теплопроводности (рис. 4).

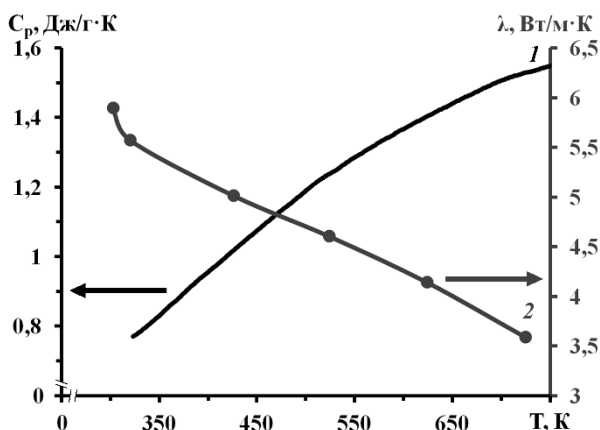


Рис. 4. Температурные зависимости удельной теплоемкости (1) и теплопроводности (2) для ГФ<sub>1</sub>

Fig. 4. The temperature dependences of heat capacity (1) and heat conductivity (2) of GF<sub>1</sub> samples

Экспериментальная температурная зависимость теплоемкости в широком интервале температур хорошо описывается уравнением Майера-Келли [10]:  $C_p(T) = A + BT + CT^{-2}$ , где для исследуемых образцов  $A = (0,345 \pm 0,006) \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $B = (0,00199 \pm 0,00001) \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$ ,  $C = (-14900 \pm 300) \text{ Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{г}^{-1}$ . Отметим, что численные значения  $C_p(T)$  для ГФ<sub>1</sub> хорошо совпадают с литературными данными для искусственных графитов [11].

В графитовой фольге реализуются два механизма теплопереноса: перенос тепловой энергии

свободными носителями заряда (электронная составляющая) и перенос тепловой энергии колебаниями атомов кристаллической решетки (фононная составляющая). Ввиду того, что концентрация носителей заряда в ГФ на порядки ниже, чем в металлах [12], электронной составляющей теплопроводности можно пренебречь.

На качественном уровне температурную зависимость  $\lambda(T)$  графитовых фольг можно описать модифицированным уравнением Дебая для фононной теплопроводности графита [11]:  $\lambda = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot c_V \cdot \cos(\varphi) \cdot l_\phi \cdot v_\phi$ , где  $\rho$  – плотность;  $c_V$  – удельная теплоемкость единицы объема;  $\cos(\varphi)$  – усредненное значение косинуса угла наклона кристаллитов к направлению теплового потока;  $l_\phi$  – средняя длина свободного пробега фононов в базисной плоскости, равная среднему расстоянию, которое они проходят между двумя последовательными столкновениями;  $v_\phi$  – средняя скорость пробега фононов в базисной плоскости. Величины  $v_\phi$ ,  $\cos(\varphi)$ ,  $\rho$  практически не зависят от температуры, поэтому температурная зависимость  $\lambda$  определяется соотношением величин  $c_V$  и  $l_\phi$  и их изменением с температурой. Наблюдаемая температурная зависимость  $\lambda(T)$  графитовых фольг связана с доминирующим влиянием уменьшения длины свободного пробега фононов над увеличением теплоемкости с ростом температуры.

Методом ТГА установлено, что температура начала окисления смещается на ~ 80 К в случае ГФ<sub>2</sub> и на ~ 100 К в случае ГФ<sub>4</sub>.

В отличие от образцов ГФ<sub>3</sub> и ГФ<sub>4</sub> (плотность 1,0 г/см<sup>3</sup>), для которых наилучшее приближение дала модель двух последовательных реакций, которые описываются уравнением Праута-Томпкинса реакции n-ого порядка с автокатализом и уравнением реакции n-ого порядка [4], образцы ГФ<sub>2</sub> описываются моделью двух параллельных реакций. Процесс окисления графитовой фольги ГФ<sub>2</sub> описывается следующими кинетическими уравнениями:

$$-\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot (1-\alpha)^{3,0 \pm 0,4} \cdot \alpha^{0,01 \pm 9 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Bna}_1),$$

$$-\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot (1-\alpha)^{0,57 \pm 0,04} \cdot \alpha^{0,69 \pm 0,09} \quad (\text{Bna}_2),$$

где  $\alpha$  – степень превращения образца;  $(1-\alpha)$  – степень незавершенности процесса;  $E_a$  – энергия активации реакции окисления;  $A$  – константа, характеризующая размерность реакции.  $\text{Bna}$  – уравнение Праута-Томпкинса реакции n-ого порядка с автокатализом. Кинетические характеристики полученных уравнений представлены в табл. 2.

**Таблица 2**  
**Кинетические параметры реакции окисления ГФ<sub>2</sub>**  
**Table 2. Kinetic parameters of GF<sub>2</sub> oxidation reaction**

Кинетическое уравнение	$E_a$ , КДж/моль	logA	Доля реакции
$Vna_1$	216±16	7,3±0,7	0,54
$Vna_2$	129±3	3,5±0,2	0,46

Модельные изотермические кривые, полученные с помощью программы Netzsch «Thermokinetics» для температуры 650 °С показали, что степень превращения  $\alpha = 1\%$  для ГФ<sub>2</sub> достигается через 65 мин от начала нагревания, для ГФ<sub>3</sub> - через 5,5 мин, а для ГФ<sub>4</sub> - через 124 мин.

#### ВЫВОДЫ

Впервые установлена анизотропия предела прочности ( $\sigma$ ) графитовой фольги из НУМ, полученного термоударом ДГФ, пропитанной водным раствором ПАВ, вдоль и поперек оси прокатки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Dhakate S.R., Chauhan N., Sharma S., Tawale J., Singh S., Sahare P.D., Mathur R.B.** An approach to produce single and double layer grapheme from re-exfoliation of expanded graphite. *Carbon*. 2011. V. 49. P. 1946-1954. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.12.068.
2. **Hayward T.P.** Patent US5582781. 1996.
3. **Meza D.V., Green B.H., Sarumaru T.** Patent US6620359B1. 2003.
4. **Калашник Н.А., Калашник А.В., Архангельский И.В., Малахо А.П., Ионов С.Г.** Физико-химические свойства низкоплотных углеродных материалов, полученных термообработкой графитовых фольг, пропитанных водными растворами. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 5. С. 41-45.
5. **Savchenko D.V., Serdan A.A., Morozov V.A., Van Tendeloo G., Ionov S.G.** Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation. *New Carbon Materials*. 2012. V. 27. N 1. P. 12-18. DOI: 10.1016/S1872-5805(12)60001-8.
6. **Filippov A.É., Popov V.L.** Jumplike variation of the contact area between randomly rough surfaces. *Tech. Phys. Lett.* 2005. V. 31. N 9. P. 735-737. DOI: 10.1134/1.2061731.
7. **Balima F., Pishedda V., Le Floch S., Brulet A., Lindner P., Duclaux L.** An in situ small angle neutron scattering study of expanded graphite under uniaxial stress. *Carbon*. 2013. V. 57. P. 460-469. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.02.019.
8. **Гольдштейн Ю.Б.** Основы механики твердого деформируемого тела. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 2005. 872 с.
9. **Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Шипков Н.Н.** Искусственный графит. М.: Металлургия. 1986. 272 с.
10. **Шулепов С.В.** Физика углеродных материалов. Челябинск: Металлургия. 1990. 336 с.
11. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Под ред. Соседова В.П. М.: Металлургия. 1975. 336 с.
12. **van Schaijk R.T.F., de Visser A., Ionov S.G., Kulbachinskii V.A., Kytin V.G.** Magnetotransport in carbon foils fabricated from exfoliated graphite. *Phys. Rev. B*. 1998. V. 57. N 15. P. 8900-8906. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.8900.

Анизотропия связана с изменением топологии пор при прессовании НУМ.

Показано, что сжимаемость графитовой фольги из НУМ, полученного термоударом ДГФ, пропитанной водным раствором ПАВ, линейно уменьшается, а восстанавливаемость увеличивается с увеличением плотности ГФ, что объясняется уменьшением пористости.

Экспериментальная температурная зависимость теплоемкости описана с помощью уравнения Майера-Келли. Изучена температурная зависимость теплопроводности. Установлено, что температура начала окисления графитовой фольги, полученной с использованием ПАВ и фосфорной кислоты, смещается на ~80 К. Показано, что процесс окисления этой фольги описывается двумя параллельными реакциями.

#### REFERENCES

1. **Dhakate S.R., Chauhan N., Sharma S., Tawale J., Singh S., Sahare P.D., Mathur R.B.** An approach to produce single and double layer grapheme from re-exfoliation of expanded graphite. *Carbon*. 2011. V. 49. P. 1946-1954. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.12.068.
2. **Hayward T.P.** Patent US5582781. 1996.
3. **Meza D.V., Green B.H., Sarumaru T.** Patent US6620359B1. 2003.
4. **Kalashnik N.A., Kalashnik A.V., Arkhangelsky I.V., Malakho A.P., Ionov S.G.** Physico-chemical properties of low-density carbon materials obtained by heat treatment of graphite foils impregnated with water solutions. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 5. P. 41-45 (in Russian).
5. **Savchenko D.V., Serdan A.A., Morozov V.A., Van Tendeloo G., Ionov S.G.** Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation. *New Carbon Materials*. 2012. V. 27. N 1. P. 12-18. DOI: 10.1016/S1872-5805(12)60001-8.
6. **Filippov A.É., Popov V.L.** Jumplike variation of the contact area between randomly rough surfaces. *Tech. Phys. Lett.* 2005. V. 31. N 9. P. 735-737. DOI: 10.1134/1.2061731.
7. **Balima F., Pishedda V., Le Floch S., Brulet A., Lindner P., Duclaux L.** An in situ small angle neutron scattering study of expanded graphite under uniaxial stress. *Carbon*. 2013. V. 57. P. 460-469. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.02.019.
8. **Goldstein J.B.** Fundamentals of mechanics of deformable bodies. Petrozavodsk: Pub. of PetrSU. 2005. 872 p. (in Russian).
9. **Ostrovsky V.S., Virgiliev Yu.S., Kostikov V.I., Shipkov N.N.** Artificial graphite. M.: Metallurgiya. 1986. 272 p. (in Russian).
10. **Shulepov S.V.** Physics of carbon materials. Chelyabinsk: Metallurgiya. 1990. 336 p. (in Russian).
11. **Sosedov V.P.** The properties of structural materials based on carbon. M.: Metallurgiya. 1975. 336 p. (in Russian).
12. **van Schaijk R.T.F., de Visser A., Ionov S.G., Kulbachinskii V.A., Kytin V.G.** Magnetotransport in carbon foils fabricated from exfoliated graphite. *Phys. Rev. B*. 1998. V. 57. N 15. P. 8900-8906. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.8900.

Поступила в редакцию (Received) 04.07.2017

Принята к опубликованию (Accepted) 07.09.2017