

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПИРОУГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ В УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

М.В. Папкина, И.В. Магнитский, С.В. Тащилов, А.Э. Дворецкий

Мария Владимировна Папкина *, Сергей Васильевич Тащилов

Научно-исследовательское отделение по разработке, производству и исследованию свойств композиционных материалов на основе стеклоугленаполнителей, Акционерное общество «КОМПОЗИТ», ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, Российская Федерация, 141017

E-mail: masshka1@gmail.com*, info@kompozit-mv.ru

Илья Владимирович Магнитский

Научно-исследовательское отделение по разработке, производству и исследованию свойств композиционных материалов на основе стеклоугленаполнителей, Акционерное общество «КОМПОЗИТ», ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, Российская Федерация, 141017

Кафедра основ конструирования машин, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 105005

E-mail: info@kompozit-mv.ru

Александр Эргардович Дворецкий

Комплекс «Неметаллические материалы», Акционерное общество «КОМПОЗИТ», ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, Российская Федерация, 141017

E-mail: info@kompozit-mv.ru

Пиролитическое уплотнение пористых подложек является одним из методов получения углерод-углеродных композиционных материалов. Формируемая при этом пироуглеродная матрица обладает рядом характеристик, исследование которых основано на понятии оптической анизотропии и угла экстинкции A_e , а также межплоскостном расстоянии d_{002} , размере кристаллитов в направлении укладки графитовых слоев L_c и среднем размере графитовых плоскостей параллельно слою в кристаллитах L_a . В данной работе были исследованы оптическим и рентгенофазовым методами три образца углерод-углеродных композиционных материалов, ранее полученных при различных параметрах термоградиентным методом. Так, исследуемые образцы отличались типом текстуры и структурными характеристиками пироуглеродной матрицы. Для образца 1 угол экстинкции составил 5° , для образца 2 и образца 3 – 19° и 41° соответственно. Диапазон угла экстинкции для пироуглеродной матрицы в исследуемых образцах углерод-углеродных композиционных материалов шире, чем представленный в литературных источниках. Согласно классификации пироуглерода, матрица образца 1 является темным ламинарным пироуглеродом, образца 2 – грубо ламинарным пироуглеродом, образца 3 – высоко текстурированным пироуглеродом. Наибольшее значение d_{002} , равное $0,3476$ нм, наблюдалось на образце 2. Пироуглеродная матрица образца 2 обладает самой низкой степенью трехмерной упорядоченности относительно образца 1 и образца 3. Наибольшей степенью трехмерной упорядоченности обладает образец 3 с высоко текстурированной пироуглеродной матрицей. Однако отсутствует прямая зависимость между текстурными и структурными характеристиками пироуглеродной матрицы. Следовательно, изучение пироуглеродной матрицы должно быть основано и на оптических, и на рентгенофазовых методах.

Ключевые слова: пироуглерод, угол экстинкции, структурные характеристики матрицы, углерод-углеродный композиционный материал, УУКМ, ПУ

Для цитирования:

Папкина М.В., Магнитский И.В., Тащилов С.В., Дворецкий А.Э. Определение характеристик пироуглеродной матрицы в углерод-углеродных композиционных материалах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 44–49

For citation:

Papkova M.V., Magnitsky I.V., Tashchilov S.V., Dvoretzky A.E. Determination of pirocarbon matrix characteristics in carbon/carbon composites. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 44–49

DETERMINATION OF PIROCARBON MATRIX CHARACTERISTICS IN CARBON/CARBON COMPOSITES

M.V. Papkova, I.V. Magnitsky, S.V. Tashchilov, A.E. Dvoretzky

Maria V. Papkova*, Sergei V. Tashchilov

Division for Glass/Carbon Filled Composite Research, Development and Production, JSC “Kompozit”, Pionerskaya st., 4, Korolev city, Moscow region, 141070, Russia
E-mail: masshka1@gmail.com*, info@kompozit-mv.ru

Ilya V. Magnitsky

Division for Glass/Carbon Filled Composite Research, Development and Production, JSC “Kompozit”, Pionerskaya st., 4, Korolev city, Moscow region, 141070, Russia
Department of Bases of Machine Designing, Bauman Moscow State Technical University, 2rd Baumanskaya st., 5, Moscow, 105005 Russia,
E-mail: info@kompozit-mv.ru

Alexander E. Dvoretzky

Complex "Non-metallic materials", JSC “Kompozit”, Pionerskaya st., 4, Korolev city, Moscow region, 141070, Russia
E-mail: info@kompozit-mv.ru

One of the methods of carbon/carbon composites (C/C composites) production is the deposition of a pyrocarbon (pyC) matrix in a porous preform. The investigation of the pyC matrix characteristics is based on the optical anisotropy with determination of the extinction angle A_e and X-ray diffraction determination of the interplanar spacing d_{002} , crystallite size in the direction of stacking of graphite layers L_c and average size of graphite planes parallel layer in crystallites L_a . In this study, three previously produced by the thermal gradient method with different parameters specimens of C/C composites were investigated by optical microscopy and X-ray diffraction methods. The studied specimens have a different type of a texture and different structural characteristics of the pyC matrix. Extinction angle A_e for specimen 1, specimen 2 and 3 was 5° , 19° and 41° , respectively. The range of the extinction angle for the pyC matrix is wider than that presented in literature. And according to the classification of pyC the matrix of specimen 1, specimen 2 and 3 is dark laminar pyC, rough laminar pyC and highly textured pyC. For specimen 2 the largest d_{002} equal to 0.3476 nm was observed. The lowest degree of three-dimensional ordering relative other specimens was for the specimen 2 with rough laminar pyC matrix. The highest degree of three-dimensional ordering was for the specimen 3 with highly textured pyC matrix. However, there is no direct relationship between the textural and structural characteristics of the pyC matrix. Therefore, the study of the pyC matrix should be based on optical and X-ray diffraction methods.

Key words: pyrocarbon, extinction angle, matrix structural characteristics, carbon-carbon composite, C/C composite, pyC

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов получения углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) является газофазное (пиролитическое) уплотнение пористых подложек (армирующих каркасов) пироуглеродной (ПУ) матрицей [1-3]. Полученные таким методом УУКМ обладают рядом физико-механических характеристик, благодаря которым находят применение в стратегически важных областях промышленности. Развитие и усовершенствование техники требует появления материалов с улучшенными свойствами [4-7].

Одним из способов управления характеристиками УУКМ является формирование матрицы – в данном случае пироуглерода (ПУ) – с заданной структурой, а следовательно, и текстурой, классификация которой основана на понятии оптической анизотропии [8]. В отечественной литературе данная классификация встречается, но наиболее подробно она освещена в иностранной литературе [8-11], где, в том числе, приводится ряд данных, по которым можно сделать вывод, что ПУ с различным типом текстуры характеризуется различными физико-механическими свойствами [12-21].

При изучении микроструктуры ПУ матрицы в плоскополяризованном свете с помощью оптического микроскопа возможно качественно и количественно анализировать текстуру, которая является отражением разориентации углеродных слоев [2-3, 8]. С этой точки зрения, ПУ подразделяется на изотропный – не обладающий оптической активностью и анизотропный – обладающий ею. Количественно принадлежность ПУ матрицы к конкретному типу текстуры определяется по углу экстинкции A_e . Он измеряется путем определения закономерности изменения яркости отдельных участков ПУ матрицы при различных взаимных положениях поляризатора и анализатора. В момент, когда анализатор перпендикулярен поляризатору, на микрофотографиях наблюдается появление так называемого мальтийского креста. При вращении анализатора против часовой стрелки из положения скрещивания первый и третий квадранты мальтийского креста гаснут, а затем снова становятся яркими. Угол экстинкции – это значение угла поворота анализатора относительно поляризатора, при котором наблюдается минимальная яркость изображения в секторе 45° первого квадранта мальтийского креста [10-11, 22].

Данная статья является началом цикла работ по изучению свойств, характеристик ПУ матрицы и УУКМ на ее основе, а также способов управления структурой и текстурой ПУ матрицы.

В данной работе были определены углы экстинкции и типы текстуры ПУ матриц для образцов УУКМ, кроме того, были определены некоторые их структурные характеристики.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования были выбраны три образца УУКМ различных марок производства АО «Композит». Образец 1 (УУКМ марки «Арголон ГЛ») получен уплотнением иглопробивного углеродного каркаса ПУ матрицей из природного газа в условиях линейно движущейся зоны пиролиза; образец 2 – иглопробивного углеродного каркаса ПУ матрицей из природного газа в условиях радиально движущейся зоны пиролиза (УУКМ марки «Арголон ГР»); 3 – плетеного углеродного каркаса ПУ матрицей из природного газа в условиях радиально движущейся зоны пиролиза (УУКМ марки «Арголон 3D»). Данные образцы УУКМ являются типичными представителями УУКМ, получаемых газозаполнением пористых подложек в АО «Композит».

Угол экстинкции ПУ матрицы для исследуемых образцов определяли обработкой микрофотографий, полученных для металлографических шлифов соответствующих образцов с помощью оптического микроскопа Olympus MX51 путем построения зависимости относительной яркости в секторе 45° первого квадранта мальтийского креста (В) от угла поворота анализатора относительно поляризатора (Q) с последующим нахождением ее минимума. Подробное изложение метода обработки данных приведено в [8, 22]. Погрешность измерения A_e составляет 1° .

Исследование таких структурных характеристик ПУ матрицы для соответствующих образцов УУКМ, как: межплоскостное расстояние d_{002} , размер кристаллитов в направлении укладки графитовых слоев L_c и средний размер графитовых плоскостей параллельно слою в кристаллитах L_a , степень графитации g , проводили с помощью дифрактометрического метода рентгенофазового анализа с помощью порошкового дифрактометра Bruker D8 Advance. Метод расчета и обработки данных соответствовал изложенному в работе [23]. Погрешность измерений составляет для d_{002} 0,05%, для L_c – 4,1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены микрофотографии образцов УУКМ с ПУ матрицей. Текстура образцов явно различна, они являются оптически активными в плоскополяризованном свете, а значит, анизотропными. При этом образец 1 проявляет более слабую оптическую активность относительно двух других. Также из рис. 1 видно, что в ПУ матрице образца 1 не наблюдается трещин на сферолитах, в то время как для образцов 2 и 3 характерно наличие концентрических трещин, причем для образца 3 их количество больше, чем для образца 2.

Зависимости относительной яркости в секторе 45° первого квадранта мальтийского креста (В) от угла поворота анализатора относительно поляризатора (Q) для трех образцов представлены на рис. 2. Минимумы зависимостей соответствуют углам экстинкции ПУ матрицы. Так, для образца 1 угол экстинкции составил 5° , для образца 2 и образца 3 – 19° и 41° соответственно. Согласно классификации, представленной в литературе [8], матрица образца 1 является темным ламинарным ПУ, образца 2 – грубо ламинарным ПУ, образца 3 – высокотекстурированным ПУ. Следует отметить, что в литературных данных отсутствуют примеры ПУ матрицы с A_e , равным 41° .

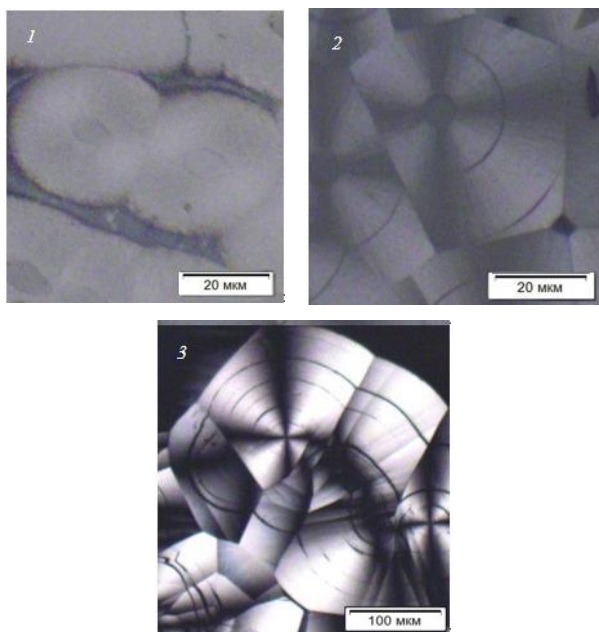


Рис. 1. Микрофотографии образцов УУКМ с ПУ матрицей:
1 – образец 1, 2 – образец 2, 3 – образец 3
Fig. 1. Micrographs of C/C composites with pyrocarbon matrix:
1 – specimen 1, 2 – specimen 2, 3 – specimen 3

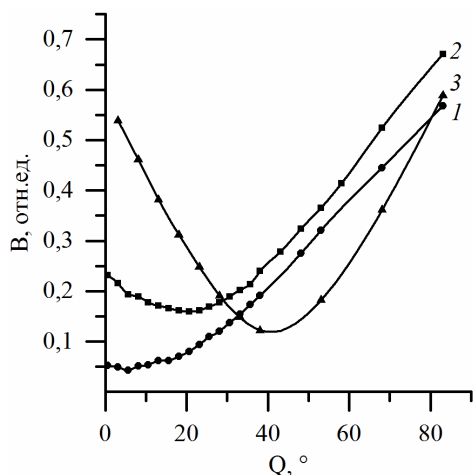


Рис. 2. Зависимости относительной яркости в секторе 45° первого квадранта мальтийского креста (B) от угла поворота анализатора относительно поляризатора (Q) для образцов УУКМ с ПУ матрицей: 1 – образец 1, 2 – образец 2, 3 – образец 3

Fig. 2. Dependences of the brightness in the 45° sector of the first quadrant of the Maltese cross (B) on the rotation angle of the analyzer relative to the polarizer (Q) for C/C composites with pyrocarbon matrix: 1 – specimen 1, 2 – specimen 2, 3 – specimen 3

В таблице и на рис. 3 представлены результаты рентгенофазового анализа и A_e исследуемых образцов. Дифрактограммы исследуемых образцов УУКМ с пироуглеродной матрицей характеризуются наличием четкого пика в районе $2\theta \approx 26^\circ$, что соответствует базисной плоскости (002) и говорит о наличии процесса графитации в материалах. Раз-

мер кристаллитов в направлении укладки графитовых слоев L_c рассчитывался согласно [24] по характеристикам пика в районе $2\theta \approx 26^\circ$. Размер графитовых плоскостей параллельно слою в кристаллитах L_a определить невозможно, поскольку на дифрактограммах отсутствует пик в районе $2\theta \approx 77^\circ$ (что соответствует базисной плоскости (110)), по характеристикам которого рассчитывается L_a .

Однако для образца 2 межслоевое расстояние больше межслоевого расстояния турбоэпитакциального графита и составляет $0,3476$ нм, поэтому степень графитации для данного образца не определялась. ПУ матрица образца 2 обладает самой низкой степенью трехмерной упорядоченности относительно образца 1 и образца 3. Наибольшей степенью трехмерной упорядоченности обладает образец 3 с высоко текстурированной ПУ матрицей. Также следует отметить, что с увеличением степени трехмерной упорядоченности (увеличение d_{002}) увеличивается и размер кристаллитов в направлении укладки графитовых слоев L_c .

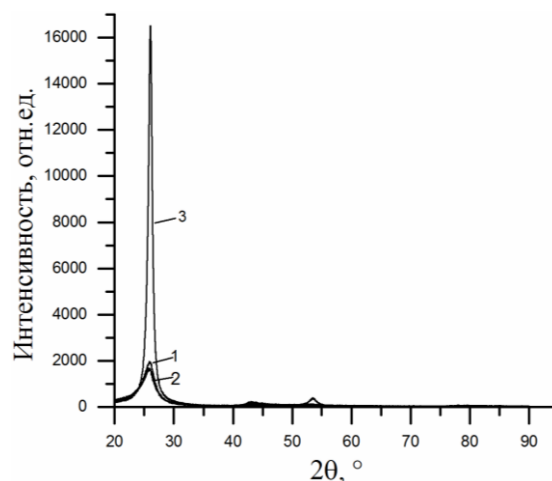


Рис. 3. Спектр РФА для образцов УУКМ с ПУ матрицей:
1 – образец 1, 2 – образец 2, 3 – образец 3
Fig. 3. XRD spectrum for C/C composites with pyrocarbon matrix: 1 – specimen 1, 2 – specimen 2, 3 – specimen 3

При анализе данных, приведенных в таблице, и литературных данных можно сделать вывод, что определенной зависимости между текстурной характеристикой ПУ матрицы (A_e) и структурными нет. Так, угол экстинкции характеризует степень разупорядоченности графитовых кристаллов относительно друг друга, а показатели, полученные с помощью рентгенофазового анализа – расположение графеновых плоскостей внутри графитовых кристаллов. Таким образом, структурные и текстурные характеристики ПУ являются независимыми друг от друга, и для полного описания

структуры матрицы требуется комплексное изучение всей совокупности ее свойств. Поэтому изучать ПУ матрицу необходимо и оптическими, и рентгенофазовыми методами.

Таблица

Структурные характеристики ПУ матрицы исследуемых образцов УУКМ

Table. Structural characteristics of the pyC matrix of the studied C/C composites specimens

№ образца	d_{002} , нм	g, %	L_c , нм	A_c , °
1	0,3437	3,5	3,6	5
2	0,3476	-	3,4	19
3	0,3417	26,7	11,1	41

Образцы УУКМ с ПУ матрицей, полученные при различных технологических режимах термостативного метода, отличаются структурой и текстурой матрицы. Следовательно, варьируя параметры получения УУКМ пиролизическим уплотнением углеродных каркасов, возможно получать

материалы с заданными характеристиками ПУ матрицы, что важно при комплексном подходе к производству и изучению свойств УУКМ на основе ПУ матрицы.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование трех ранее полученных образцов УУКМ с пироуглеродной матрицей, изготовленных при различных режимах термостативного метода, оптическими и рентгенофазовыми методами.

Отсутствует корреляция между текстурными и структурными характеристиками пироуглеродной матрицы, характеристики являются независимыми друг от друга.

Диапазон угла экстинкции для пироуглеродной матрицы в исследуемых образцах УУКМ шире, чем представленный в литературных источниках.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фиалков А.С.** Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект Пресс. 1997. 718 с.
2. **Щурик А.Г.** Искусственные углеродные материалы. Пермь: 2009. 342 с.
3. **Morgan P.** Carbon Fibers and their Composites. Boca Raton: CRC Press. 2005. 1131 p. DOI: 10.1201/9781420028744.
4. **Асеинов Н.И., Буртыль И.В.** Способы управления вектором тяги ракетных двигателей твердого топлива. Решетневские чтения. 2013. Т. 1. С. 109.
5. **Дегтярь В.Г., Калашников С.Т., Кречка Г.А., Савельев В.Н.** Углерод-углеродные композиционные материалы для изделий ракетно-космической техники. *Констр. и функц. Мат-лы*. 2013. № 2. С. 12–17.
6. **Евдокимов И.А., Овсянников Д.А., Хайруллин Р.Р., Перфилов С.А., Поздняков А.А., Сухоруков Д.В., Ломакин Р.Л., Пахомов И.В.** Транспортные свойства наноструктурных алюминоматричных композиционных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 44–49. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.4y.
7. **Евдокимов И.А., Хайруллин Р.Р., Перфилов С.А., Поздняков А.А., Кульницкий Б.А., Сухоруков Д.В., Пахомов И.В., Ломакин Р.Л.** Наноструктурный композиционный материал, модифицированный графеноподобными частицами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 37–43. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.3y.
8. **Vallerot J.-M.** De pyrocarbone: propri'et'es, structure et anisotropie optique. L'universite Bordeaux I. 2004. 276 p.
9. **Zhang M., Su Z., Xie Z., Chen J., Huang Q.** Microstructure of Pyrocarbon with Chemical Vapor Infiltration. *Proc. Eng.* 2012. V. 27. P. 847–854. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.530.
10. **Vallerot J.-M., Bourrat X., Mouchon A., Chollon G.** Quantitative structural and textural assessment of laminar pyrocarbons through Raman spectroscopy, electron diffraction and few other techniques. *Carbon*. 2006. V. 44. N. 9. P. 1833–1844. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.029.

REFERENCES

1. **Fialkov A.S.** Carbon, interlayer compounds and composites based on it. M.: Aspect Press. 1997. 718 p. (in Russian).
2. **Shchurik A.G.** Artificial carbon materials. Perm: 2009. 342 p. (in Russian).
3. **Morgan P.** Carbon Fibers and their Composites. Boca Raton: CRC Press. 2005. 1131 p. DOI: 10.1201/9781420028744.
4. **Aseinov N.I., Burtly I.V.** Methods of thrust vector control rockets solid fuel. *Reshetnevskie chteniya*. 2013. V. 1. P. 109 (in Russian).
5. **Degtyar V.G., Kalashnikov S.T., Krechka G.A., Saveliev V.N.** Carbon-carbon composite materials for products of rocket and space technology. *Konstr. Funkts. Mater.* 2013. N. 2. P. 12–17 (in Russian).
6. **Evdokimov I.A., Ovsyannikov D.A., Khairullin R.R., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Sukhorukov D.V., Lomakin R.L., Pakhomov I.V.** Transport properties of nanostructured aluminum-matrix composite materials modified with carbon nanostructures. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 44–49. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.4y.
7. **Evdokimov I.A., Khairullin R.R., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A., Lomakin R.L., Pakhomov I.V., Kulnitsky B.A.** Nanostructural composite material modified with graphene-like particles. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 37–43. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.3y.
8. **Vallerot J.-M.** De pyrocarbone: propri'et'es, structure et anisotropie optique. L'universite Bordeaux I. 2004. 276 p.
9. **Zhang M., Su Z., Xie Z., Chen J., Huang Q.** Microstructure of Pyrocarbon with Chemical Vapor Infiltration. *Proc. Eng.* 2012. V. 27. P. 847–854. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.530.
10. **Vallerot J.-M., Bourrat X., Mouchon A., Chollon G.** Quantitative structural and textural assessment of laminar pyrocarbons through Raman spectroscopy, electron diffraction and few other techniques. *Carbon*. 2006. V. 44. N. 9. P. 1833–1844. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.029.

11. **Vallerot J.-M., Bourrat X.** Pyrocarbon optical properties in reflected light. *Carbon*. 2006. V. 44. N. 8. P. 1565–1571. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.046.
12. **Zhang D.S., Li K.Z., Guo L.J., Li H.-j, Li H.-l.** Texture characterization and mechanical properties of pyrocarbon obtained by chemical vapor deposition at 1450–1550°C. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2012. V. 539. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.046.
13. **Deng H., Li K., Li H., Wang P., Xie J., Zhang L.** Effect of brake pressure and brake speed on the tribological properties of carbon/carbon composites with different pyrocarbon textures. *Wear*. 2010. V. 270. N 1. P. 95–103. DOI: 10.1016/j.wear.2010.09.010.
14. **Zhang H., Eddie L.-H., Ping X.** Fluidized bed chemical vapor deposition of pyrolytic carbon-III. Relationship between microstructure and mechanical properties. *Carbon*. 2015. V. 91. P. 346–357. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.05.009.
15. **Reznik B., Guellali M., Gerthsen D., Oberacker R., Hoffmann M.J.** Microstructure and mechanical properties of carbon–carbon composites with multilayered pyrocarbon matrix. *Mater. Lett.* 2002. V. 52. N 1. P. 14–19. DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00357-3.
16. **Piat R., Schnack E.** Modeling the effect of microstructure on the coefficients of thermal expansion of pyrolytic carbon. *Carbon*. 2003. V. 41. N 11. P. 2162–2165. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00231-8.
17. **Wang T., Zhang S., Ren B., Li K., Li W., Li H.** Optimizing mechanical and thermal expansion properties of carbon/carbon composites by controlling textures. *Curr. Appl. Phys.* 2020. V. 20. N 10. P. 1171–1175. DOI: 10.1016/j.cap.2020.08.002.
18. **Zhang D., Li K., Li H., Jia Y., Guo L., Li H.** Coefficients of thermal expansion of low texture and isotropic pyrocarbon deposited on stationary substrates. *Mater. Lett.* 2012. V. 68. P. 68–70. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.10.012.
19. **Скачков В.А., Иванов В.И., Нестеренко Т.Н., Бережная О.Р.** Некоторые физикотехнические характеристики пирогرافита. *Металлургия*. 2019. Т. 41. С. 56–59.
20. **Jia J. Zhang B.; Liu D., Ji G.** Microstructure and properties of CNTs reinforced CVI-pyrocarbon matrix. *J. Eur. Ceramic Soc.* 2020. V. 11. P. 23–31. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2020.11.023.
21. **Wang T., Li H., Shen Q., Li K., Li W., Song Q., Zhang S.** Dependence of mechanical properties on microstructure of high-textured pyrocarbon prepared via isothermal and thermal gradient chemical vapor infiltration. *Compos. Pt. B: Eng.* 2020. V. 192. P. 107–119. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107982.
22. **Li M.-L., Qi L.-H., Li H.-J., Xu G.-Z.** Measurement of the extinction angle about laminar pyrocarbons by image analysis in reflection polarized light. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2007. V. 448. N 1. P. 80–87. DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.104.
23. **Бамборин М.Ю., Ярцев Д.В., Колесников С.А.** Влияние высокотемпературной обработки на рентгеноструктурные характеристики и теплопроводность углерод-углеродных композиционных материалов. *Новые огнеупоры*. 2013. С. 27–32.
24. **Соседов В.П.** Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник. М.: Metallurgy. 1975. 336 с.
11. **Vallerot J.-M., Bourrat X.** Pyrocarbon optical properties in reflected light. *Carbon*. 2006. V. 44. N. 8. P. 1565–1571. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.046.
12. **Zhang D.S., Li K.Z., Guo L.J., Li H.-j, Li H.-l.** Texture characterization and mechanical properties of pyrocarbon obtained by chemical vapor deposition at 1450–1550°C. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2012. V. 539. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.046.
13. **Deng H., Li K., Li H., Wang P., Xie J., Zhang L.** Effect of brake pressure and brake speed on the tribological properties of carbon/carbon composites with different pyrocarbon textures. *Wear*. 2010. V. 270. N 1. P. 95–103. DOI: 10.1016/j.wear.2010.09.010.
14. **Zhang H., Eddie L.-H., Ping X.** Fluidized bed chemical vapor deposition of pyrolytic carbon-III. Relationship between microstructure and mechanical properties. *Carbon*. 2015. V. 91. P. 346–357. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.05.009.
15. **Reznik B., Guellali M., Gerthsen D., Oberacker R., Hoffmann M.J.** Microstructure and mechanical properties of carbon–carbon composites with multilayered pyrocarbon matrix. *Mater. Lett.* 2002. V. 52. N 1. P. 14–19. DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00357-3.
16. **Piat R., Schnack E.** Modeling the effect of microstructure on the coefficients of thermal expansion of pyrolytic carbon. *Carbon*. 2003. V. 41. N 11. P. 2162–2165. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00231-8.
17. **Wang T., Zhang S., Ren B., Li K., Li W., Li H.** Optimizing mechanical and thermal expansion properties of carbon/carbon composites by controlling textures. *Curr. Appl. Phys.* 2020. V. 20. N 10. P. 1171–1175. DOI: 10.1016/j.cap.2020.08.002.
18. **Zhang D., Li K., Li H., Jia Y., Guo L., Li H.** Coefficients of thermal expansion of low texture and isotropic pyrocarbon deposited on stationary substrates. *Mater. Lett.* 2012. V. 68. P. 68–70. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.10.012.
19. **Skachkov V.A., Ivanov V.I., Nesterenko T.N., Berezhnaya O.R.** Some physical and technical characteristics of pyrographite. *Metallurgiya*. 2019. V. 41. P. 56–59 (in Russian).
20. **Jia J. Zhang B.; Liu D., Ji G.** Microstructure and properties of CNTs reinforced CVI-pyrocarbon matrix. *J. Eur. Ceramic Soc.* 2020. V. 11. P. 23–31. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2020.11.023.
21. **Wang T., Li H., Shen Q., Li K., Li W., Song Q., Zhang S.** Dependence of mechanical properties on microstructure of high-textured pyrocarbon prepared via isothermal and thermal gradient chemical vapor infiltration. *Compos. Pt. B: Eng.* 2020. V. 192. P. 107–119. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107982.
22. **Li M.-L., Qi L.-H., Li H.-J., Xu G.-Z.** Measurement of the extinction angle about laminar pyrocarbons by image analysis in reflection polarized light. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2007. V. 448. N 1. P. 80–87. DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.104.
23. **Bamborin M.Yu., Yartsev D.V., Kolesnikov S.A.** Influence of high-temperature treatment on X-ray structural characteristics and thermal conductivity of carbon-carbon composite materials. *Novye Ogneupory*. 2013. P. 27–32 (in Russian).
24. **Sosedov V.P.** Properties of carbon-based structural materials. Directory. М.: Metallurgy. 1975. 336 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 21.12.2020
Принята к опубликованию 10.03.2021

Received 21.12.2020
Accepted 10.03.2021