DOI: 10.15593/2224-9982/2015.40.09

УДК 661.666:539.4

А.В. Долгодворов, А.Г. Докучаев

ОАО «Уральский научно-исследовательский институт
композиционных материалов», Пермь, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА
НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Рассмотрен углерод-углеродный материал, в котором пространственное армирование образовано системой углеродных нитей утка и основы ткани с последующей прошивкой пакета в перпендикулярном направлении высокопрочной низко модульной углеродной нитью. Основные технологические переделы при изготовлении углерод-углеродного композиционного материала включают следующие этапы: получение углепластика, карбонизацию углепластика, высокотемпературную обработку карбонизованного углепластика, получение углерод-углеродного композиционного материала.

Объектом проведенных исследований являлись физические характеристики углерод-углеродного материала на основе ткани полотняного переплетения, наработанной из высоко модульного волокна по основе и утку ткани, на трех основных этапах изготовления материала: после получения углепластиковой заготовки, ее последующей термохимической обработки, включающей карбонизацию при 850 °С, и после уплотнения заготовки пиролитическим углеродом.

Проведены исследования кажущейся плотности и открытой пористости после уплотнения материала пиролитическим углеродом, а также распределения кажущейся плотности и открытой пористости по толщине материала методом последовательного снятия слоев материала. Определены физико-механические характеристики углерод-углеродного материала.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, кажущаяся плотность, открытая пористость, предел прочности при изгибе, карбонизация углепластика, высокотемпературная термообработка, уплотнение пироуглеродом.

A.V. Dolgodvorov, A.G. Dokuchaev

OJSC "Ural Research Institute of Composite Materials",
Perm, Russian Federation

**EXPERIMENTAL STUDY OF DEPENDENCE OF MECHANICAL
PROPERTIES OF CARBON-CARBON COMPOSITE
ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES**

Carbon-carbon material is considered. Its spatial reinforcing is formed by system of carbon threads of fabric with the subsequent insertion of a package in the perpendicular direction by high-strength low-modular carbon thread. The main technological repartitions at production carbon-carbon composite material include the following stages: obtaining a coal plastic; carbonization of a coal plastic; high-temperature treatment of a coal plastic; obtaining carbon-carbon composite material.

Object of studies is physical characteristics of carbon-carbon material based on cross-woven fabric from high-modulus fiber of matrix and filling obtained on the three main stages of material production: after obtaining coal plastic blank; its further thermochemical treatment including carbonization at 850 °C; after bulk consolidation by pyrolytic carbon.

The apparent density and open porosity of material after its consolidation by pyrolytic carbon is investigated. The distribution of apparent density and open porosity along material thickness is studied by successive layer removing. The physical-mechanical properties of carbon-carbon material is determined.

Keywords: carbon-carbon composite material, apparent density, open porosity, bending strength, carbonization of a coal plastic, high-temperature heat treatment, pirocarbon cosolindation.

Введение

Материалы на основе углерода при высоких температурах имеют ряд преимуществ перед жаропрочными сплавами. Особенности графита и материалов на основе углерода является увеличение прочности с повышением температуры. Большинство конструкционных графитов имеют максимальную прочность при 2100–2800 °C, а при температурах свыше 3200 °C прочность становится такой же, как при комнатной температуре. Графит имеет две области разупрочнения: первая область включает температуру обработки 500–700 °C с максимальным значением при 600 °C; вторая наблюдается при 1500–2500 °C с максимальным значением при 2100 °C [1]. Удачное сочетание низкого модуля упругости и низкого коэффициента термического расширения делает графит одним из термостойких материалов. Но у него есть два существенных недостатка – низкая стойкость к термическому удару и невысокая механическая прочность [2].

Для существенного повышения прочностных характеристик и стойкости к термическому удару были разработаны углерод-углеродные композиционные материалы на основе углеродной матрицы, армированные непрерывными или прерывными углеродными волокнами [3]. В этой связи перспективно выглядит углерод-углеродный материал структуры 2D + 1, где пространственное армирование образовано системой углеродных нитей утка и основы ткани (структура 2D) с последующей прошивкой пакета в перпендикулярном направлении (структура 2D + 1) углеродной нитью. Среди отличительных свойств такого материала можно выделить возможность изготовления сложнопрофильных деталей без проведения дополнительной механической обработки [4]. Подобные углерод-углеродные композиты широко применяются в качестве тонкостенных несущих элементов конструкций летательных аппаратов в условиях высокотемпературного внешнего воздействия [5].

Производственный процесс изготовления углерод-углеродного композиционного материала на основе углеродной матрицы, армированной углеродными волокнами, базируется на технологии создания армирующих каркасов из углеродных волокнистых наполнителей и насыщении их углеродной матрицей [6]. В зависимости от способа получения углеродная матрица может быть коксовой, пироуглеродной, комбинированной и модифицированной [7]. Формирование структуры и свойств углерод-углеродной матрицы зависит от условий термообработки, в этом процессе можно выделить несколько стадий: карбонизация, высокотемпературная обработка, пироуплотнение.

Одной из главных задач при создании конструкций из такого материала является обеспечение высокой размерной точности деталей в процессе получения материала [8]. Высокая размерная точность достигается за счет выбора схемы армирования при изготовлении углеродного каркаса, параметров формования углепластиковой заготовки и использования формосохраняющей оснастки при проведении термохимической обработки на основных этапах технологического цикла [9]. При этом микроструктура углерод-углеродного композиционного материала оказывает определяющее влияние на физико-механические свойства на всех этапах термохимической обработки и насыщения пироуглеродом [10].

Известно, что физические свойства конструкционных композитов во многом определяются их реальной структурой [11]. В процессе изготовления материала происходит переход от одного вида микроструктуры к другому.

Во время карбонизации происходят процессы, связанные с усадкой матрицы, что ведет к образованию мелкопористой структуры кокса и появлению большого количества усадочных трещин. Процесс карбонизации сопровождается глубокой деформацией кокса под действием выделяемых газов и приводит к увеличению дефектных структур на несколько порядков. Пористая структура, образующаяся при карбонизации углепластика, наследует основные особенности исходной структуры углепластика и характеризуется широким спектром величины пор [12], определяемой в том числе и структурой наполнителя [13]. Размеры пор, образующихся при карбонизации углепластика, лежат в широком диапазоне – от десятков до тысяч микрометров с образованием большого количества протяженных межниточных пор (макропор) на гра-

нице нитей основы и утка ткани [14]. В результате в материале появляется множество макродефектов, что приводит к значительной неоднородности и снижению физико-механических характеристик.

При пироуплотнении происходят химические процессы, связанные с осаждением пиролитического углерода на углеродный наполнитель. В зависимости от принципа получения из газовой фазы можно выделить два вида пиролитического углерода, структура которых определяется температурой образования: высокотемпературный и низкотемпературный. Для получения деталей с толщиной менее 6 мм, как правило, используется изотермический метод осаждения низкотемпературного пироуглерода. Поскольку карбонизованный углепластик представляет собой поровую структуру, включающую микро-, мезо- и макропоры, очевидно, что поры, образованные в процессе карбонизации, способствуют повышению равномерности распределения пироуглеродной матрицы в объеме материала. Процесс осаждения пироуглерода в таких разномасштабных порах будет различаться и в конечном итоге определит остаточную пористость и структуру композита [15]. По мере зарастания транспортных пор поступление пиролизного газа в реакционную зону прекращается, остается замкнутый объем. Особенностью процесса газофазного гетерогенного осаждения пироуглерода [16] является то, что для равномерного заполнения пор материала по толщине необходимо обеспечить транспорт газа-реагента в срединные слои заготовки [17], что при толщинах заготовок свыше 6 мм является проблематичным. Таким образом, на этапе пироуплотнения происходит заполнение межфиламентного пространства пироуглеродом, формируются свойства углерод-углеродного композиционного материала.

В работе рассмотрен углерод-углеродный материал с комбинированной матрицей, состоящей из кокса и низкотемпературного пироуглерода. Материал получен путем прошивки многослойного тканевого пакета из слоев углеродной ткани полотняного переплетения, наработанной из высокомодульного волокна по основе и утку ткани. Формирование углеродной матрицы выполнено жидкофазным и газофазным методами [18]. Представлены исследования распределения плотности материала по толщине в направлении, перпендикулярном направлению укладки слоев. Экспериментально определены физико-химические и прочностные характеристики углерод-углеродного композиционного материала.

Методика получения материала

Исследовались образцы углерод-углеродного композиционного материала. Армирующий каркас композита получен путем прошивки многослойного тканевого пакета из слоев углеродной ткани полотняного переплетения, наработанной из высокомодульного волокна по основе и утку ткани. Для изготовления углеродной ткани полотняного переплетения использованы высокомодульные углеродные нити с модулем упругости (225 ± 20) ГПа и прочностью на растяжение не менее 3,3 ГПа.

Для получения углепластика армирующий каркас был пропитан фенолформальдегидным связующим путем погружения в пропиточную кювету с выдержкой 30 мин, после чего был подсушен в течение 120 ч при температуре $T = 18...35$ °С. Полимеризация выполнялась в специальной технологической оснастке для обеспечения необходимых геометрических параметров пластин. Нагрев производился до температуры 130 °С в течение 2 ч с выдержкой при конечной температуре 130 °С в течение 10 ч. Охлаждение выполнялось с произвольной скоростью при температуре 18 °С.

Карбонизацию углепластика проводили в защитной атмосфере азота с выдержкой конечной температуры 900 °С в течение 8 ч.

Высокотемпературную термообработку проводили в вакууме (остаточное давление не более 1 мм рт. ст.) при конечной температуре 1850 °С в течение 3 ч.

Рис. 1. Основные технологические операции получения углерод-углеродного композиционного материала

Уплотнение пироуглеродом вакуумным изотермическим методом проводили при температуре 950–1050 °С в течение 360 ч с использованием в качестве газа-реагента сетевого газа [17].

Последовательность изготовления углерод-углеродного материала представлена на рис. 1.

Методика проведения эксперимента и изготовления образцов

Для определения распределения кажущейся плотности и открытой пористости по толщине материала из пластин углерод-углеродного композиционного материала толщиной 7 мм (пластины 1, 2) и 9 мм (пластины 3, 4) изготавливались образцы размерами 50×50 мм, после чего на образцах определяли кажущуюся плотность и открытую пористость. Далее выполнялась механическая обработка – снятие материала шлифовкой на 0,5 мм по толщине с каждой стороны образца, при этом после операции механической обработки определяли кажущуюся плотность и открытую пористость, повторяя эти действия до получения образцов толщиной 3 мм.

Для определения зависимости физико-механических характеристик (предела прочности при изгибе) от фактической толщины материала из пластин углерод-углеродного композиционного материала толщиной 9 мм (пластины 3, 4) путем механической обработки были изготовлены образцы с толщинами 9; 8; 6; 4; 5; 3 мм.

Физико-механические испытания образцов проводились согласно ОСТ 92-1459–77...ОСТ 92-1461–77 при комнатной температуре.

Для выполнения измерений использовалась универсальная испытательная машина Tira Test с диапазоном нагрузки 0–100 кН и классом точности 1,0.

Кажущуюся плотность и открытую пористость определяли по собственной методике, основанной на методе гидростатического взвешивания на образцах.

Результаты определения предела прочности при изгибе, кажущейся плотности и открытой пористости в зависимости от толщины материала

Результаты определения кажущейся плотности в зависимости от толщины материала образца, полученной последовательным снятием слоев при шлифовке поверхности углерод-углеродного композиционного материала, приведены на рис. 2, 3.

Рис. 2. Характерная зависимость кажущейся плотности от толщины для пластин с исходной толщиной 7 мм: — пластина 1; — пластина 2

Рис. 3. Характерная зависимость кажущейся плотности от толщины для пластин с исходной толщиной 9 мм: — пластина 3; — пластина 4

На рис. 2, 3 видна линейная зависимость кажущейся плотности УУКМ от толщины образца, на котором она определялась, при шлифовке образца до толщины 3 мм его кажущаяся плотность линейно уменьшается на 0,02–0,04 г/см³, что составляет 1,3–2,6 % от его общей кажущейся плотности.

Результаты определения открытой пористости в зависимости от толщины материала образца, полученной последовательным снятием слоев при шлифовке поверхности углерод-углеродного композиционного материала, приведены на рис. 4, 5.

Рис. 4. Характерная зависимость открытой пористости от толщины для пластин с исходной толщиной 7 мм: — пластина 1; — пластина 2

Рис. 5. Характерная зависимость открытой пористости от толщины для пластин с исходной толщиной 9 мм: — пластина 3; — пластина 4

Анализ рис. 4, 5 позволяет говорить о линейной зависимости открытой пористости углерод-углеродного композиционного материала от толщины образца, на котором она определялась, при шлифовке об-

разца до толщины 3 мм его открытая пористость линейно увеличивается на 1,5–2 %, что существенно при исходной открытой пористости около 4,5–5 %.

Результаты определения предела прочности при изгибе от толщины материала образца, полученной последовательным снятием слоев при шлифовке поверхности углерод-углеродного композиционного материала, приведены на рис. 6.

Рис. 6. Зависимость предела прочности при изгибе от плотности образца: ♦ – пластина 3; ■ – пластина 4

Несмотря на изменение открытой пористости и кажущейся плотности УУКМ, результаты определения предела прочности при изгибе на образцах после их шлифовки свидетельствуют о том, что показанный выше градиент физико-химических характеристик материала по его толщине существенно не влияет на его физико-механические характеристики. Некоторое увеличение предела прочности при изгибе для образцов, вырезанных из пластины 3, можно предположительно объяснить тем, что при шлифовке по толщине заложенные в пластине на этапе изготовления углепластика расслоения были устранены путем удаления слоев материала.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

Углерод-углеродный композиционный материал, полученный по описанной технологии, имеет незначительный градиент кажущейся

плотности по толщине, при этом градиент открытой пористости представляется существенным, что подтверждает описанные выше закономерности процесса изотермического газофазного уплотнения пористых углеграфитовых материалов пиролитическим углеродом.

Прочность исследуемого материала, несмотря на градиент физико-химических характеристик по толщине, остается на уровне характеристик исходного материала.

В данном исследовании не было учтено возможное наличие разнородности материала на этапе изготовления углепластика, что будет являться целью дальнейшей работы.

Библиографический список

1. Костиков В.И., Варенков А.И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. – М.: Интермет. Инжиниринг, 2003. – 574 с.
2. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вотинов, А.А. Ташкинов, А.М. Постных, А.А. Чекалкин. – М.: Наука: Физматлит, 1996. – 240 с.
3. Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. Структурно-феноменологические модели прогнозирования упругих свойств высокопористых композитов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. – 2010. – № 5 (21). – С. 276–279.
4. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Kotov A.G. A structural multiscale approach to the design of spatially reinforced carbon-carbon composites // Mechanics of Composite Materials. – 1995. – Т. 31, № 2. – С. 143–148.
5. Долгодворов А.В. Влияние структуры углерод-углеродного материала на механические свойства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 2(37). – С. 187–201.
6. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multistage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells // Mechanics of Composite Materials. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 55–60.
7. Postnykh A.M., Chekalkin A.A., Khronusov V.V. Structural-statistical model of the reliability and durability of the fiber composite // Mechanics of Composite Materials. – 1991. – Т. 26, № 5. – С. 633–637.
8. Morgan P. Carbon fibers and their composites. – New Western: Taylor&Francis group, 2005. – 1131 p.

9. Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия / А.Д. Коротаев, В.Ю. Мошков, С.В. Овчинников [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 5. – С. 103–116.

10. Ташкинов А.А., Шавшуков В.А. Микромеханическое моделирование и экспериментальное определение физико-механических свойств углерод-углеродных и углерод-керамических композиционных материалов // Перспективные материалы. Спецвыпуск. – 2010. – Июнь. – С. 213–219.

11. Черноус Д.А., Шилько С.В., Панин С.В. Анализ механического поведения дисперсно-армированного нанокompозита. Метод расчета эффективных упругих характеристик // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 4. – С. 85–90.

12. Структурные и физико-механические характеристики уплотненных пироуглеродом углерод-углеродных композиционных материалов на основе тканевых наполнителей / В.И. Кулик, В.А. Борковских, Н.Н. Борковских [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 3. – С. 70–77.

13. Features of powder material deformation with cyclic loading / V.N. Antsiferov, A.V. Babushkin, Yu.V. Sokolkin, A.A. Shatsov, A.A. Cherkalkin // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2001. – Т. 40, № 11–12. – С. 569–572.

14. Ветошкин С.В., Долгодворов А.В., Сыромятникова А.И. Исследование объемной микроструктуры конструкционного углерод-углеродного композиционного материала и создание компьютерной 3D-модели исследуемого образца // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 202–221.

15. Самарина О.Ю., Долгодворов А.В. Исследование микроструктуры конструкционного композиционного материала на этапе получения углерод-углеродного композиционного материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 140–152.

16. Fizer E., Manocha L.M. Carbon reinforcements and carbon/carbon composites. – Berlin: Springer, 2008. – 342 p.

17. Докучаев А.Г., Бушуев В.М. Выбор технологических параметров процесса уплотнения пироуглеродом вакуумным изотермическим методом карбонизованного углепластика при разработке угле-

родной основы под силицирование // Перспективные материалы. – 2010. – № 9а. – С. 58–64.

18. Исследование микроструктуры углерод-углеродного композита 2D + 1 при термохимической обработке и насыщении пироуглеродом / А.В. Долгодворов, А.Г. Докучаев, П.А. Судюков, А.А. Чекалкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 12. – С. 31–33.

References

1. Kostikov V.I., Varenkov A.I. Sverkhvysokotemperaturnye kompozitsionnye materialy [Superhigh-temperature composite materials]. Moscow: Internet. Inzhiniring, 2003. 574 p.

2. Sokolkin Yu.V., Votinov A.M., Tashkinov A.A., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Tekhnologiya i proektirovanie ugle-rod-uglerodnykh kompozitov i konstruktsiy [Technology and design of carbon-carbon composites and constructions]. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1996. 240 p.

3. Makarova E.Yu., Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A. Strukturno-fenomenologicheskie modeli prognozirovaniya uprugikh svoystv vysokoporistykh kompozitov [Structurally-phenomenological models for prediction of elastic properties of high-porous composites]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetata. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, no. 5(21), pp. 276-279.

4. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Kotov A.G. A structural multiscale approach to the design of spatially reinforced carbon-carbon composites. *Mechanics of Composite Materials*, 1995, vol. 31, no. 2. pp. 143-148.

5. Dolgodvorov A.V. Vliyanie struktury ugle-rod-uglerodnogo materiala na mekhanicheskie svoystva [Influence of structure of carbon-carbon material on the mechanical properties]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 2 (37), pp. 187-201.

6. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multistage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells. *Mechanics of Composite Materials*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 55-60.

7. Postnykh A.M., Chekalkin A.A., Khronusov V.V. Structural-statistical model of the reliability and durability of the fiber composite. *Mechanics of Composite Materials*, 1991, vol. 26, no. 5, pp. 633-637.

8. Morgan P. Carbon fibers and their composites. New Western: Tailor&Francis group, 2005. 1131 p.

9. Korotaev A.D., Moshkov V.Yu., Ovchinnikov S.V. [et al.]. Nanostrukturnye i nanokompozitnye sverkhтвердые покрытия [Nanostructural and nanocomposite superhard coatings]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2005, vol. 8, no. 5, pp. 103-116.

10. Tashkinov A.A., Shavshukov V.A. Mikromekhanicheskoe modelirovanie i eksperimentalnoe opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv uglerod-uglerodnykh i uglerod-keramicheskikh kompozitsionnykh materialov [Micromechanical modeling and experimental determination of physico-mechanical properties carbon-carbon and carbon-ceramic composite materials]. *Perspektivnye materialy. Spetsvypusk*, 2010, June, pp. 213-219.

11. Chernous D.A., Shilko S.V., Panin S.V. Analiz mekhanicheskogo povedeniya dispersno-armirovannogo nanokompozita. Metod rascheta effektivnykh uprugikh kharakteristik [Analysis of the mechanical behavior of fiber-reinforced nanocomposite. Method of calculation of the effective elastic characteristics]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2010, vol. 13, no. 4, pp. 85-90.

12. Kulik V.I., Borkovskikh V.A., Borkovskikh N.N. [et al.]. Strukturnye i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki uplotnennykh pirouglерodом uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na osnove tkanevykh napolniteley [Structural and physico-mechanical characteristics of carbon-carbon composite materials based on fabric fillers condensed by pyrocarbon]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 3, pp. 70-77.

13. Antsiferov V.N., Babushkin A.V., Sokolkin Yu.V., Shatsov A.A., Chekalkin A.A. Features of powder material deformation with cyclic loading. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2001, vol. 40, no. 11-12, pp. 569-572.

14. Vetoshkin S.V., Dolgodvorov A.V., Syromyatnikova A.I. Issledovanie obemnoy mikrostrukтуры konstruksionnogo uglerod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala i sozдание kompyuternoy 3D-modeli issleduemogo obraztsa [Research of microstructure of structural carbon-carbon composite material and the creation of computer 3D model of sample studied]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 37, pp. 202-221.

15. Samarina O.Yu., Dolgodvorov A.V. Issledovanie mikrostrukтуры konstruksionnogo kompozitsionnogo materiala na etape polucheniya uglerod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala [Research of microstructure of structural composite material on the stage of the carbon-carbon composite material production]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel-*

skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, 2014, no. 38, pp. 140-152.

16. Fizer E., Manocha L.M. Carbon reinforcements and carbon/carbon composites. Berlin: Springer, 2008. 342 p.

17. Dokuchaev A.G., Bushuev V.M. Vybor tekhnologicheskikh parametrov protsessa uplotneniya pirouglerodom vakuumnym izotermicheskim metodom karbonizovannogo ugleplastika pri razrabotke uglerodnoy osnovy pod silitsirovanie [Selection of parameters of consolidation of carbon-filled plastic by pyrocarbon by vacuum isothermal method in the development of the carbon substrate for siliconization]. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 9a, pp. 58-64.

18. Dolgodvorov A.V., Dokuchaev A.G., Sudyukov P.A., Chekalin A.A. Issledovanie mikrostruktury uglerod-uglerodnogo kompozita 2D + 1 pri termokhimicheskoy obrabotke i nasyshchenii pirouglerodom [Research of microstructure of 2D + 1 carbon-carbon composite in thermochemical treatment and pyrocarbon drying]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2013, vol. 79, no. 12, pp. 31-33.

Об авторах

Долгодворов Александр Викторович (Пермь, Россия) – инженер-конструктор ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» (614000, г. Пермь, ул. Новозвягинская, д. 57, e-mail: sanya_dvor@mail.ru).

Докучаев Андрей Георгиевич (Пермь, Россия) – начальник лаборатории ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» (614000, г. Пермь, ул. Новозвягинская, д. 57, e-mail: sanya_dvor@mail.ru).

About the authors

Alexander V. Dolgodvorov (Perm, Russian Federation) – Design Engineer of OJSC “Ural Research Institute of Composite Materials” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: sanya_dvor@mail.ru).

Andrey G. Dokuchaev (Perm, Russian Federation) – Head of Laboratory of OJSC “Ural Research Institute of Composite Materials” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: sanya_dvor@mail.ru).

Получено 16.01.2015