

УДК 661.666:620.1

А.В. Долгодворов

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

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Объектом проведенных исследований являются изменения физических характеристик углерод-углеродного материала на основе ткани полотняного переплетения, наработанной из высокомодульного 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.

В ходе эксперимента исследованы основные этапы формирования микроструктуры композита, образования межфазных дефектов, сегментных трещин и областей микрорасслоений. Проведены работы по исследованию физико-химических свойств, определены физико-механические характеристики углерод-углеродного материала, а также промежуточных продуктов, таких как углепластик и карбонизованный углепластик. Комплекс вышеуказанных исследований позволил изучить процессы, протекающие на каждом технологическом переделе, определить их влияние на свойства материала каждого технологического передела, оценить вклад каждого передела в свойства конечного углерод-углеродного композиционного материала.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, микроструктура, углепластик, карбонизация, пироуглерод, поры, испытания, свойства, растяжение, сжатие, изгиб.

A.V. Dolgodvorov

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

THE EFFECT OF STRUCTURE OF CARBON-CARBON MATERIAL ON ITS MECHANICAL PROPERTIES

The object of research is changing physical properties of carbon-carbon composite material on the base of plain weave of high modulus fiber as warp and weft fabric during three base stages: after obtaining carbon fiber reinforced polymer (CFRP) model pattern, its following thermochemical treatment including carbonization at 850°C and its compression with pyrolytic carbon. The basic stages of composite microstructure formation, interfacial defects, segmental cracks and microexfoliation areas were studied during the experiment. The physical-chemical characteristics and physical-mechanical properties of carbon-carbon composite material as well as intermediate products such as CFRP and carbonized CFRP were investigated.

The research allowed to study the processes of every technological redistribution, to define their influence on material properties of every technological redistribution, to evaluate contribution of every technological redistribution to the properties of the ultimate carbon-carbon composite material.

Keywords: carbon-carbon composite material, microstructure, carbon fiber reinforced polymer, carbonation, pyrolytic carbon, pores, test properties, tensile, compression, bending.

Введение

В авиационной, космической и ракетной промышленности требуются материалы, детали и конструкции с широкими функциональными и технологическими возможностями, стабильностью к высоким температурам и агрессивным средам. Среди современных конструкционных материалов особое место занимают композиционные материалы с углеродной матрицей, армированной углеродными волокнами. Данные материалы появились как альтернативный вариант композиционным материалам с полимерной матрицей, обладающим низкой теплоустойчивостью [1].

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 $2D + 1$) [2] углеродной нитью. Среди отличительных свойств такого материала можно выделить широкие функциональные и технологические возможности, также стоит отметить возможность изготовления деталей сложной формы, часто без проведения дополнительной механической обработки.

Основные технологические пределы при изготовлении углерод-углеродного композиционного материала включают следующие этапы: получение углепластика, карбонизацию углепластика, высокотемпературную обработку карбонизованного углепластика, получение углерод-углеродного композиционного материала.

Известно, что физические свойства конструкционных композитов во многом определяются их реальной структурой [3]. В процессе изготовления материала происходит переход от одного вида микроструктуры к другому, при этом пористая структура, образующаяся при карбонизации углепластика, наследует основные особенности исходной структуры углепластика и характеризуется широким спектром величины пор, в том числе и определяемых структурой наполнителя [4]. Поры, образованные в процессе карбонизации, способствуют повышению равномерности распределения пироуглеродной матрицы в объеме материала [5], очевидно, что процесс насыщения таких разномасштабных пор будет различаться и в конечном итоге определит остаточную пористость [4] и структуру композита.

Физические свойства углерод-углеродного композита в значительной степени зависят от свойств матрицы [6] и наполнителя [7]. Свойства армирующих углеродных волокон хорошо известны [8] и поддаются изучению вне композиционного материала. Изучение свойств матрицы на каких-либо образцах в чистом виде является проблематичным. Одним из методов определения свойств матрицы является получение данных на основе микроструктурных, рентгеноструктурных и других структурных исследований составных элементов матрицы [9], а также дилатометрических исследований [10], исследований электрических характеристик и др.

Поэтому основной целью проведенных экспериментов было сравнение свойств углерод-углеродных композиционных материалов с одинаковым армирующим наполнителем, одинаковой структурой, но разной матрицей.

В ходе эксперимента исследованы основные этапы формирования микроструктуры композита, образования межфазных дефектов, сегментных трещин и областей микрорасслоений.

Экспериментально определены упругие и прочностные характеристики углерод-углеродного композиционного материала на основных этапах технологического цикла.

Методика получения материала

Объектами исследований были образцы углерод-углеродного композиционного материала на переделах изготовления, включающих получение волокнистого каркаса и последующее формирование углеродной матрицы жидкофазным и газофазным методами.

Армирующий каркас углерод-углеродного композита получен путем прошивки многослойного тканевого пакета из слоев углеродной ткани полотняного переплетения, наработанной из высокомодульного волокна по основе и утку ткани. Пространственное армирование образовано системой углеродных нитей утка и основы ткани (структура 2D) с последующей прошивкой пакета в перпендикулярном направлении (структура 2D + 1) высокопрочной низко модульной углеродной нитью.

Для изготовления углеродной ткани полотняного переплетения используются высокомодульные углеродные нити с модулем упругости 225 ± 20 ГПа и прочностью на растяжение не менее 3,3 ГПа.

Образцы углепластика получали методом пресс-камерного формования каркасов, предварительно пропитанных термореактивным фе-

нолформальдегидным связующим марки БЖ, и последующей полимеризацией с выдержкой при конечной температуре 130 °С в течение 10 ч, давление 6 атм.

Схема прессования каркаса представлена на рис. 1.

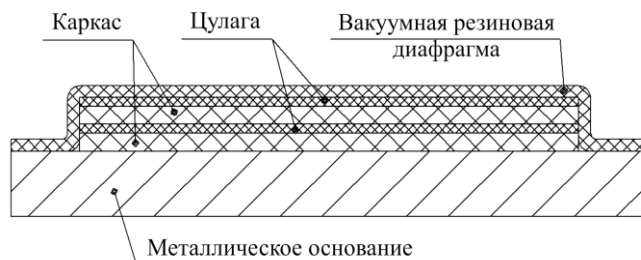


Рис. 1. Схема прессования каркаса

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.

Уплотнение пироуглеродом вакуумно-изотермическим методом проводили при температуре 950–1050 °С в течение 360 ч, с использованием в качестве газа-реагента сетевого газа [11].

Последовательность изготовления углерод-углеродного материала представлена на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность изготовления углерод-углеродного материала

Методика получения образцов и проведения эксперимента

Образцы для проведения исследований материала изготовлены механическим способом на фрезерном станке.

Для определения физико-механических характеристик, а также плотности и открытой пористости использованы образцы, вырезанные 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.

Физико-механические испытания образцов проводились согласно ОСТ 92-1459–77...ОСТ 92-1461–77 при комнатной температуре. Размеры образцов представлены на рис. 3–5.

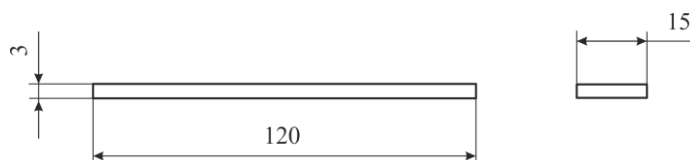


Рис. 3. Образец для испытаний на изгиб

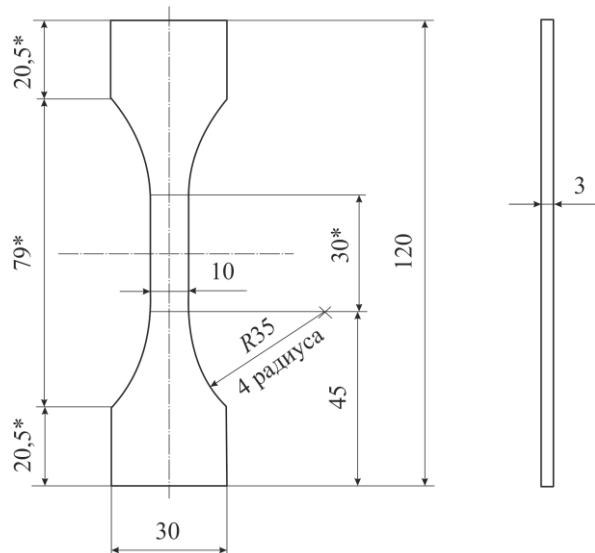


Рис. 4. Образец для испытаний на растяжение

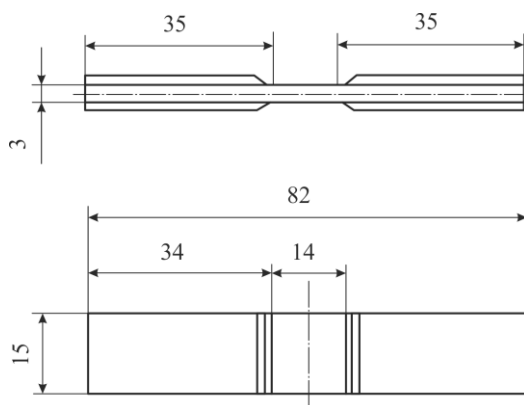


Рис. 5. Образец для испытаний на сжатие

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

Плотность и открытую пористость определяли на образцах 20×20 мм по специально разработанным методикам.

В качестве образцов структуры материала были исследованы образцы углепластика, карбонизованного углепластика и карбонизованного углепластика, уплотненного пиролитическим углеродом, полученные по приведенной выше технологии.

Образцы, вырезанные механическим путем, размером 20×20 мм и толщиной от 3 до 8 мм предварительно заливались акриловой смолой быстрого отверждения DMT-20 или эпоксидной смолой ЭД-20 с помощью вакуумного импрегнатора VACUMET, а затем обрабатывались на шлифовально-полировальном станке FORCIPOL 1S с использованием шкурки и эластичных алмазных кругов различной зернистости.

Исследования микроструктуры проводились на металлографическом инвертированном микроскопе METAM ЛВ-42 для образцов углепластика и карбонизованного углепластика в отраженном свете, а для образцов карбонизованного углепластика, уплотненного пиролитическим углеродом, – в отраженном поляризованном свете по методике, аналогичной методике, применяемой в металловедении [12], при увеличении $50^{\times}$ – $1000^{\times}$. Фотосъемка микроструктуры образца проведена цифровой видеокамерой BR-5100 LC-U с разрешением 1296×972 .

Изучение структуры и физико-механических свойств углепластика

На рис. 6 представлен снимок микроструктуры углепластика. Для структуры материала характерна плотная, равномерная укладка углеродных нитей с образованием небольшого количества некрупных межниточных пор (макропор) удлиненной формы. Содержание связующего в макропорах низкое.

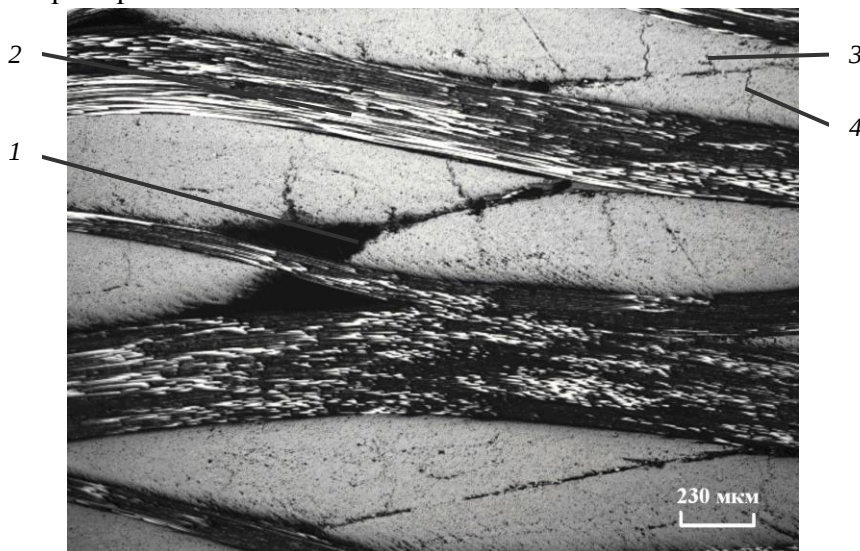


Рис. 6. Микроструктура образца углепластика: 1 – макропоры; 2 – связующее; 3 – филаменты; 4 – микропоры

Длина макропор составляет 0,20–1,30 мм, ширина – 0,03–0,3 мм. Распределение макропор и связующего равномерно по толщине образца. Распределение связующего внутри нитей материала неравномерное. Внутри нитей, как у поверхности, так и в глубине материала, наблюдаются участки с неплотной, разреженной укладкой филаментов. Межфиламентное пространство частично заполнено связующим, присутствуют многочисленные микропоры размером до 0,05 мм, свободные от связующего.

Средняя плотность углепластикового материала составила $1,42 \text{ г/см}^3$, при этом средняя открытая пористость равна 10,4 %. Средние показатели пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе составили 334,9; 80,9; 207,8 МПа соответственно.

Изучение структуры и физико-механических свойств карбонизованного углепластика

Микроструктура карбонизованного углепластика (рис. 7) представляет собой систему плотно и равномерно расположенных углеродных нитей с образованием большого количества протяженных межниточных пор (макропор) на границе нитей основы и утка ткани. Длина таких макропор составляет от 0,5 до 1,6 мм, ширина – 0,03–0,3 мм. Частицы карбонизованного связующего (кокса) наблюдаются по всей толщине материала, однако расположены они хаотично. Распределение кокса внутри нитей материала равномерное. По толщине образца в поперечных нитях наблюдаются сегментные поры, которые делят нити на сегменты. Внутри нитей, как у поверхности, так и в глубине материала, наблюдаются участки с неплотной, разреженной укладкой филаментов. Межфиламентное пространство частично заполнено коксом, присутствуют многочисленные микропоры размерами до 0,05 мм.

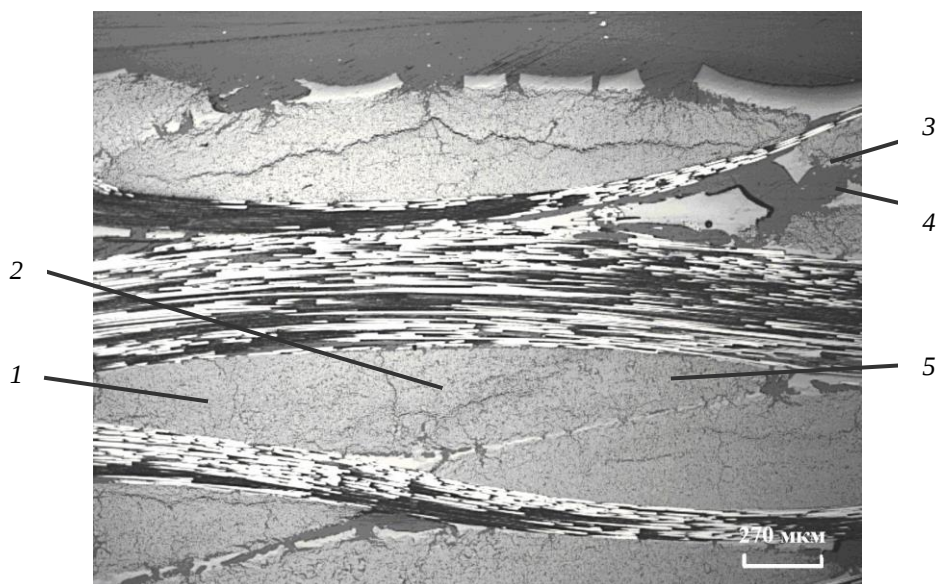


Рис. 7. Микроструктура образца карбонизованного углепластика: 1 – филаменты; 2 – сегментные поры; 3 – частицы карбонизованного связующего (кокса); 4 – поры на границе нитей основы и утка; 5 – микропоры

Средняя плотность карбонизованного углепластика составила $1,31 \text{ г/см}^3$, средняя открытая пористость равна 22,6 %. Средние показатели пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе составили 105,9; 10,3; 40,1 МПа соответственно.

Изучение структуры и физико-механических свойств карбонизованного углепластика, уплотненного пиролитическим углеродом

На рис. 8 показана микроструктура карбонизованного углепластика, уплотненного пироуглеродом. Для структуры материала характерна плотная укладка углеродных нитей. По периметру межниточных макропор имеется слой пироуглерода толщиной до 8–12 мкм. Распределение макропор и кокса равномерно по толщине образца. Распределение пироуглерода уменьшается от краев образца к середине. Распределение кокса и пироуглерода внутри нитей материала неравномерное. Внутри нитей, как у поверхности, так и в глубине материала, наблюдаются участки с неплотной, разреженной укладкой филаментов. Межфиламентное пространство частично заполнено коксом, вокруг филаментов присутствуют слой пироуглерода толщиной до 2 мкм и немногочисленные микропоры размерами до 0,03 мм.

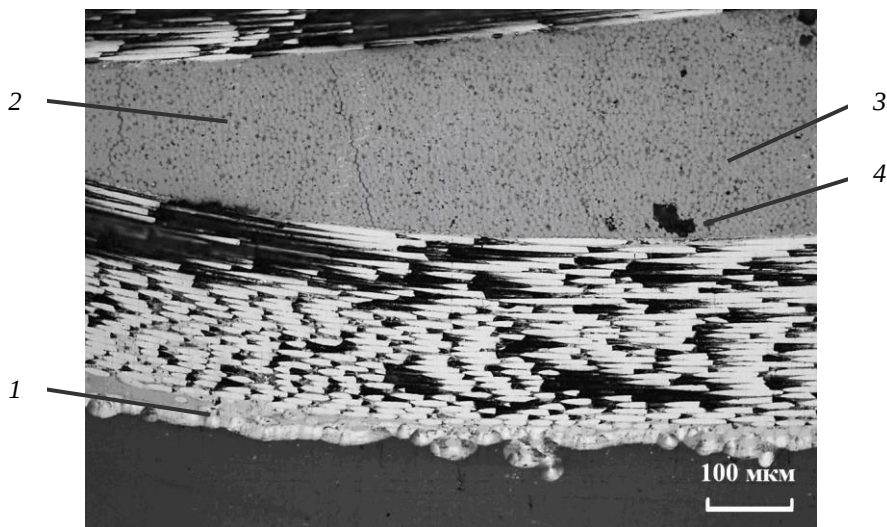


Рис. 8. Микроструктура образца карбонизованного углепластика, уплотненного пиролитическим углеродом: 1 – пироуглерод; 2 – филаменты; 3 – микропоры; 4 – кокс

После осаждения пироуглерода средняя плотность была увеличена до $1,56 \text{ г/см}^3$, а средняя открытая пористость уменьшена до 4,4 %. Средние показатели пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе составили 182,8; 49,1; 140,5 МПа соответственно.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как следует из полученных данных, средняя плотность пластины составила $1,56 \text{ г/см}^3$, что связано с особенностями структуры и технологии уплотнения заготовки пиролизическим углеродом.

Полученные прочностные характеристики образцов на трех основных этапах изготовления заготовки представлены в табл. 1 в виде отношения к исходным характеристикам углепластиковой заготовки.

Таблица 1

Прочностные характеристики образцов

Вид испытания	σ_I/E_I	σ_{II}/σ_I	σ_{II}/E_{II}	σ_{III}/σ_I	σ_{III}/E_{III}
Изгиб	5,1	0,2	4,6	0,7	5,8
Растяжение	5,2	0,3	5,7	0,6	3,2
Сжатие	1,5	0,1	1,1	0,6	1,3

Ниже представлены физико-химические характеристики образцов.

ρ_{II}/ρ_I	v_{II}/v_I	ρ_{III}/ρ_I	v_{III}/v_I
0,92	2,2	1,1	0,4

Как видно из таблиц, пределы прочности на изгиб, растяжение, сжатие снижаются на 80; 70; 90 % соответственно с уменьшением плотности на 8 % и увеличением открытой пористости на 120 % в карбонизованном углепластике.

В ходе карбонизации под воздействием температуры происходят процессы, связанные с усадкой матрицы, что выражается в образовании большого количества усадочных трещин [10] и микроскопической пористости. Пористая структура, образующаяся при карбонизации углепластика, наследует основные особенности исходной структуры углепластика и характеризуется широким спектром величины пор [4]. Размеры пор, образующихся при карбонизации углепластика, лежат в широком диапазоне – от десятков до тысяч микрометров с образованием большого количества протяженных межниточных пор (макропор) на границе нитей основы и утка ткани. В результате в материале образуется большое количество макродефектов, что приводит к значительной неоднородности и снижению физико-механических характеристик [13]. На рис. 9 представлена макропора, частично заполненная частицами карбонизованного связующего (коксом).

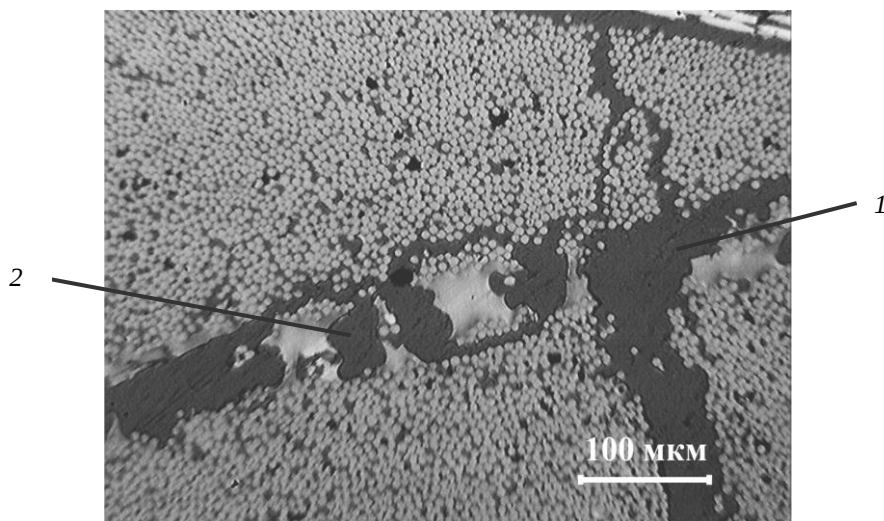


Рис. 9. Микроструктура образца карбонизованного углепластика:
1 – макропора; 2 – частицы карбонизованного связующего (кокса)

При механическом разрушении материала происходит отслоение волокон и появляются обширные области с разрушенной углеродной матрицей. Нагрузки в этом случае могут передаваться частично благодаря силам трения, возникающим между волокном и матрицей.

Уплотнение пиролитическим углеродом позволяет заполнить образовавшиеся в процессе карбонизации поры в композиционном материале и, как следствие, существенно повысить его физико-механические характеристики [14].

Особенностью процесса газофазного гетерогенного осаждения пироуглерода является то, что для равномерного заполнения пор материала по толщине необходимо обеспечить транспорт газа-реагента в срединные слои заготовки [5]. Таким образом, поры, образованные в процессе карбонизации, способствуют повышению равномерности распределения пироуглеродной матрицы в объеме материала.

После уплотнения материала пиролитическим углеродом наблюдается уменьшение пределов прочности на изгиб, растяжение, сжатие по отношению к исходному углепластиковому материалу на 30; 40; 40 % соответственно, при этом плотность увеличивается на 10 %, а открытая пористость уменьшается на 60 %.

Основная причина того, что не удается достичь прочностных характеристик углепластика, заключается в более слабой адгезии воло-

кон к осажденной углеродной матрице, чем к полимерной, отрицательном влиянии процесса высокотемпературной обработки, неравномерности заполнения межфиламентного пространства пироуглеродом.

В качестве варианта частичного решения данной проблемы предлагается рассмотреть использование газов-реагентов с большим удельным содержанием углерода (например, ацетилена), применение импульсных режимов насыщения с периодическим вакуумированием реакционной зоны для удаления летучих продуктов разложения из пор материала, снижения скорости осаждения.

Библиографический список

1. Костиков В.И., Варенков А.И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. – М.: Интермет. Инжиниринг, 2003. – 574 с.
2. Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А., Бабушкин А.В. Прогнозирование физических и механических свойств порошковых и армированных высокопрочными волокнами металлических материалов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1995. – № 2. – С. 53–57.
3. Features of powder material deformation with cyclic loading / V.N. Antsiferov, A.V. Babushkin, Yu.V. Sokolkin, A.A. Shatsov, A.A. Chekalkin // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2001. – Vol. 40, № 11–12. – P. 569–572.
4. 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.
5. Колесников С.А., Бутырин Г.М., Костиков В.И. Эффективность уплотнения пироуглеродом при вариации пористой структуры углеродных материалов // Химия твердого топлива. – 1990. – № 5. – С. 127–131.
6. 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.
7. 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, № 2. – P. 143–148.

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

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

10. Sokolkin Yu.V., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Probabilistic model of the strength, crack resistance, and fatigue life of a unidirectionally reinforced fibrous composite // Mechanics of Composite Materials. – 1992. – Vol. 28, № 2. – P. 133–139.

11. Докучаев А.Г., Бушуев В.М. Выбор технологических параметров процесса уплотнения пироуглеродом вакуумным изотермическим методом карбонизованного углепластика при разработке углеродной основы под силицирование // Перспективные материалы. – 2010. – № 9а. – С. 58–64.

12. Металловедение и термическая обработка стали. Т. 1. Методы испытаний и исследования: справочник / Бернштейн М.Л. [и др.]. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

13. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multi-stage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells // Mechanics of Composite Materials. – 1994. – Vol. 30, № 1. – P. 55–60.

14. Zhang M., Xie Z. Growth of pyrocarbon by multi-physics fields chemical vapor infiltration // The open material science. – 2011. – № 5. – P. 61–65.

References

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

2. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Babushkin A.V. Prognozirovaniye fizicheskikh i mekhanicheskikh svoystv poroshkovykh i armirovannykh vysokoprochnymi voloknami metallicheskih materialov [Forecasting of physical and mechanical properties of the metal materials powder and reinforced by high-strength fibers]. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Cvetnaya metallurgiya*, 1995, no. 2, pp. 53-57

3. 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.

4. Kulik V.I., Borkovskikh V.A., Borkovskikh N.N. [et al.] Strukturnye i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki uplotnennykh pirouglerodom uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na osnove tkanevykh napolniteley [Structural and physicomachanical characteristics condensed pirouglerody carbon-carbon composite materials on the basis of fabric fillers]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 3, pp. 70-77.

5. Kolesnikov S.A., Butyrin G.M., Kostikov V.I. Effektivnost uplotneniya pirouglerodom pri variatsii poristoy struktury uglerodnykh materialov [Efficiency of consolidation pirocarbon at a variation of porous structure of carbon materials]. *Khimiya tverdogo topliva*, 1990, no. 5, pp. 127-131.

6. Makarova E.Yu., Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A. Strukturno-fenomenologicheskie modeli prognozirovaniya uprugikh svoystv vysokoporistyykh kompozitov [Structural-phenomenological models predict the elastic properties of highly porous composites]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, no. 5 (21), pp. 276-279.

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

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

9. 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 physicomachanical properties carbon – carbon and carbon – ceramic composite materials]. *Perspektivnye materialy*. Special release, 2010, June, pp. 213-219.

10. Sokolkin Yu.V., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Probabilistic model of the strength, crack resistance, and fatigue life of a unidirectionally reinforced fibrous composite. *Mechanics of Composite Materials*, 1992, vol. 28, no. 2, pp. 133-139.

11. Dokuchaev A.G., Bushuev V.M. Vybor tekhnologicheskikh parametrov protsessa uplotneniya pirouglerodom vakuumnym izotermicheskim metodom karbonizovannogo ugleplastika pri razrabotke uglerodnoy osnovy pod silitsirovanie [Selection process parameters pyrocarbon seal vacuum isothermal method carbonized carbon fiber in the development of the carbon substrate under siliconising]. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 9a, pp. 58-64.
12. Bernshteyn M.L. [et al.]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali. Metody ispytaniy i issledovaniya [Metallurgy and heat treatment of steel. Test methods and studies]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 352 p.
13. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multi-stage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells. *Mechanics of Composite Materials*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 55-60.
14. Zhang M., Xie Z. Growth of pyrocarbon by multi-physics fields chemical vapor infiltration. *The open material science*, 2011, no. 5, pp. 61-65.

Получено 15.03.2014

Об авторах

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

About the authors

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