

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ 3D-МАТЕРИАЛА ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Г.Е. Мостовой
А.П. Карпов
А.К. Проценко
И.В. Шишков

mostovoy@yandex.ru
andrew.karpow@gmail.com
aprocenko@niigrafit.org
garshiv@gmail.com

АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы особенности поведения экспериментального трехмерно-армированного углерод-углеродного материала при испытании на сжатие образцов в температурном диапазоне 1600...1800 °С в среде аргона с постоянно действующей нагрузкой в течение 60 мин. Показано, что при воздействии предельных силовых нагрузок, равных 0,95 максимальной разрушающей нагрузки, он остается работоспособным при указанных условиях, поскольку деформации ползучести не превышают 0,05 %

Ключевые слова

Ползучесть, пек, углерод-углеродный композиционный материал, 3d-материал, фибриллы, предельная деформация

Поступила в редакцию 21.11.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Для получения стабильного углерод-углеродного 3d-материала используются стержни из высокомодульного углеродного волокна марки ВМН-4 ($E \approx 350$ ГПа). Особенность волокна ВМН-4 заключается в высокой термостабильности его физико-механических свойств до 2200 °С, в том числе модуля упругости: он практически не изменяется при термообработке в указанном температурном диапазоне в течение ~60 мин [1]. Поэтому после многократного прохождения технологических циклов — пропитка стержневого каркаса высокотемпературным каменноугольным пеком + термомеханическая обработка для достижения заданной плотности 1,97 г/см³ получаемого композиционного материала — первоначальная жесткость стержневого каркаса также не изменяется.

Цель эксперимента. Определение возможности использования 3d-материалов на основе ортогонального армирующего каркаса из углеродных стержней в условиях длительного термосилового воздействия на элементы конструкций гиперзвуковых летательных аппаратов.

Методическая часть. Исследования выполнены на универсальной испытательной машине LFMZ-50 фирмы Walter+tb, позволяющей проводить кратковременные механические испытания при температуре до 2000 °С, а также испытания на ползучесть при температуре до 1800 °С длительностью не больше 60 мин. Оснастка (тяги и захваты) выполнена из углерод-углеродного 4d-материала разработки АО «НИИГрафит».

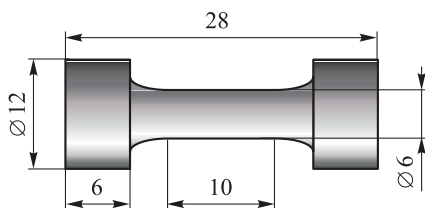


Рис. 1. Образец для испытаний на ползучесть при сжатии

Для исследований использованы небольшие образцы катушечного типа, принятые для кратковременных испытаний при высоких температурах на машине ИМГр-3000-1000 [1]. Выбор образцов такой геометрии связан с особенностями конструкции испытательной машины LFMZ-50. Из-за больших размеров температурной камеры и нагревателя данной машины и, соответственно, большой общей длины тяг и захватов (~ 0,65 м) в сочетании с малым диаметром резьбовых соединений тяг с металлическими адаптерами (M12) при сжатии происходит преждевременная потеря устойчивости стандартных углеродных образцов и разрушение оснастки в местах резьбовых соединений. Размеры испытанных образцов показаны на рис. 1.

Для недопущения физико-химического взаимодействия при высокотемпературных испытаниях углеродного материала образца с материалом оснастки, обычно изготавливаемой из вольфрама или молибдена [2], захваты выполняются из композиционного углерод-углеродного 4d-материала, нагреватель — из высокоплотного графита, а экраны — из углеродного прессованного войлока.

Температуру на поверхности рабочей части образца определяли через кварцевые иллюминаторы с помощью двух пирометров спектрального отношения, которые расположены с двух противоположных сторон образца и находятся вне испытательной камеры. Достоинством данных пирометров является их нечувствительность к загрязнению кварцевых стекол иллюминаторов вследствие образования пленок напыленного углерода при длительных высокотемпературных испытаниях.

Испытания на ползучесть углерод-углеродного 3d-материала длительностью $\tau \approx 60$ мин проводили при температурах от 1600 °С, поскольку при более низких температурах исследованному материалу присуще только хрупкое, линейно-упругое деформирование вплоть до момента разрушения.

Другой особенностью деформационных процессов для исследованного материала в диапазоне 20...1600 °С является уменьшение предельной деформации с повышением температуры испытания, аналогично конструкционным графитовым материалам [3]. Предельная деформация достигает минимального значения в диапазоне 1400...1600 °С (рис. 2) и составляет 0,6 исходного значения при комнатной температуре из-за более интенсивного роста значений модуля упругости по сравнению с ростом значений предела прочности ($\sigma_{сТ}$, E_T и $\varepsilon_{прТ}$ и $\sigma_{с20}$, E_{20} и $\varepsilon_{пр20}$ — предел прочности, модуль упругости и предельная деформация при сжатии при заданной и комнатной температуре соответственно).

Поскольку предел прочности исследуемого материала при сжатии в температурном диапазоне 1500...2000 °С меняется незначительно, то в пределах разброса экспериментальных данных ($\leq 10\%$) значение максимального напряжения при сжатии при испытании на ползучесть задавали как долю усредненного значения предела прочности при сжатии σ_b для указанного температурного интервала.

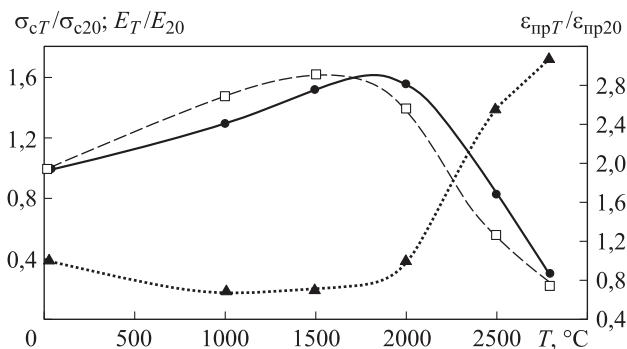


Рис. 2. Влияние температуры испытания на изменение механических свойств при сжатии экспериментального углерод-углеродного 3d-материала:

—●— $\sigma_{сТ} / \sigma_{с20}$; —□— E_T / E_{20} ; ...▲... $\epsilon_{прТ} / \epsilon_{пр20}$

Исходя из линейного характера диаграмм деформирования практически до момента разрушения исследованного материала, его реологические свойства при ползучести исследовали при максимальном напряжении сжатия $\sigma = 220$ МПа ($0,95 \sigma_{в}$). Выход на заданные температуры составлял ~ 15 мин, выдержка 20 мин. Длительность нагружения до заданной нагрузки составляла 3,4 мин при скорости нагружения 1500 Н/мин. Длительность испытания после приложения заданной нагрузки 60 мин.

Деформацию образца фиксировали по перемещению графитовых опор, бесконтактным способом с помощью лазерного луча после соприкосновения опор с образцом. Перемещение образца регистрировали на экране монитора компьютера в координатах: деформация ϵ —длительность испытания τ . Записываемые диаграммы ползучести включали в себя как деформацию непосредственно ползучести $\epsilon_{плз}$, так и деформацию нагружения $\epsilon_{нгр}$.

Типичные диаграммы деформирования приведены на рис. 3. Их условно можно разбить на три участка. Первый участок отражает плавное и непрерывное нагружение по линейному закону до заданной нагрузки σ за 2...4 мин со скоростью деформирования $v = 1 \cdot 10^{-3}$ м/мин. Второй участок является переходным и нагружение протекает нелинейно с замедлением скорости деформирования (при температурах 1600 и 1700 °С — 1...2 мин, а при 1800 °С — ~ 13 мин). Третий участок, основной, характеризует процесс деформирования, протекающий практически линейно в течение 45...57 мин.

По своему характеру полученные диаграммы формально аналогичны диа-

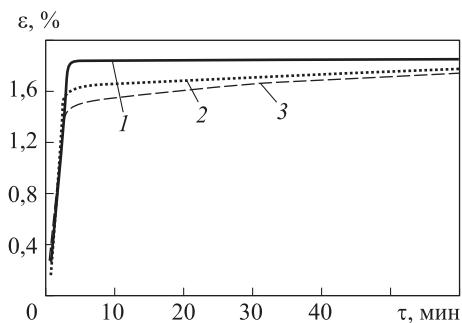


Рис. 3. Диаграммы ползучести при сжатии 3d-материала вдоль направления армирования:

1 — 1600 °С; 2 — 1700 °С; 3 — 1800 °С

граммам ползучести для жаропрочных сплавов и керамических материалов, несмотря на различный механизм деформирования [4, 5].

Как показали проведенные испытания, увеличение температуры от 1600 до 1800 °С обозначило только тенденцию к росту средних значений деформации первого участка $\epsilon_{нгр}$: увеличение составило только 9 % и находится в пределах разброса экспериментальных данных (таблица).

Влияние температуры на деформационный процесс при испытании на ползучесть

T, °С	Деформация, %		Скорость ползучести ν , % / мин
	нагружения $\epsilon_{нгр}$	ползучести $\epsilon_{плз}$	
1600	1,73	0,07	$2,7 \cdot 10^{-4}$
1700	1,65	0,21	$2,6 \cdot 10^{-3}$
1800	1,59	0,41	$3,2 \cdot 10^{-3}$

Примечание. $\epsilon_{нгр}$, $\epsilon_{плз}$ — средние значения деформации нагружения и деформации ползучести, ν — скорость ползучести на третьем этапе.

В отличие от процесса нагружения первого участка деформирование при ползучести на третьем этапе существенно ускоряется во всем интервале температур 1600...1800 °С: при 1700 °С $\epsilon_{плз}$ увеличивается в 9,6 раза по сравнению с $\epsilon_{плз}$ при 1600 °С, а при 1800 °С — в 11,6 раза.

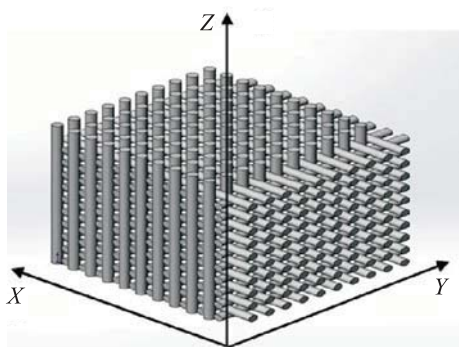


Рис. 4. Схематичное изображение 3d армирующего каркаса заготовок углеродного 3d-материала КМС-3М

Различие в характере температурных зависимостей для деформаций $\epsilon_{нгр}$ и $\epsilon_{плз}$ можно объяснить влиянием скорости воздействия сжимающей нагрузки на разных этапах испытания на элементы структуры материала образцов, изготовленных на основе ортогонального трехмерного каркаса, собранного из углеродных стержней диаметром 0,9 мм (рис. 4).

Испытываемые продольное сжатие Z-стержни имеют большую жесткость и устойчивость благодаря боковому поджатию со стороны матрицы и стержней, расположенных в плоскостях XY.

Длительность нагружения до $R_{нгр}$ составляла всего 2...4 мин, что в 16...30 раз меньше времени постоянного действия $R_{плз}$. Поэтому за короткое время не успевают проявиться релаксационные процессы, обусловленные перемещениями структурных элементов в углеродных волокнах [6] и карбонизованного матричного пека [7, 8], заполняющего поровое пространство 3d-материала как между волокнами в стержнях, так и между стержнями.

При длительной выдержке под сжимающей нагрузкой $R_{плз}$ эти процессы начинают активироваться и, как показали измерения испытанных образцов

(после испытания), в процессе ползучести происходят, наряду с обратимыми, также и необратимые структурные изменения, обусловленные микропластическими деформациями.

В диапазоне 1600...1700 °С необратимое уменьшение высоты образцов, измеренное после охлаждения образцов до комнатной температуры, составило 0,008 мм (0,03 %). При 1800 °С процесс микропластической деформации активизируется и значение необратимой деформации сжатия возрастает в 1,75 раза — до 0,014 (0,05 %) мм.

Таким образом, результаты исследований по ползучести позволяют предположить, что наличие стержневого 3d армирующего каркаса из углеродного волокна замедляет процесс графитации матрицы, стабилизирует ее и превращает в трудно графитирующуюся стеклоуглеродную структуру с температурой получения 2200 °С в отличие от однородного графитированного графита ВПП с температурой получения 3000 °С, у которого явления ползучести проявляются уже при температурах, в 2...3 раза меньших температуры получения [9].

Выводы. Исследованный экспериментальный углерод-углеродный 3d-материал имеет большую устойчивость к воздействию силовых нагрузок и работоспособен при критических значениях нагрузки, равных 0,95 максимальной разрушающей нагрузки в течение 60 мин в исследованном диапазоне температур 20...1800 °С. Деформация ползучести образцов в течение 60 мин при указанной нагрузке для исследованного материала при 1800 °С не превысила 0,05 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мостовой Г.Е., Карпов А.П. Особенности механических испытаний углеродных и углерод-углеродных материалов при температурах до 3000 °С // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 5. С. 56–62.
2. Никольский Б.П., ред. Справочник химика. Л.: Химия, 1971. 1168 с.
3. Соседов В.П., ред. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. М.: Металлургия, 1975. 336 с.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
5. Будников П.П., Полубоярицев Д.Н., ред. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: Стройиздат, 1972. 553 с.
6. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. М.: Химия, 1974. 376 с.
7. Варшавский В.Я. Углеродные волокна. М.: ВИНТИ, 2005. 500 с.
8. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: Сайнс-пресс, 2007. 194 с.
9. Дергунов Н.Н., Паперник Л.Х., Работнов Ю.Н. Анализ поведения графита на основе нелинейной наследственной теории // ПМТФ. 1971. № 2. С. 76–82.

Мостовой Геннадий Ефимович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит» (Российская Федерация, 111524, Москва, Электродная ул., д. 2).

Карпов Андрей Павлович — научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит» (Российская Федерация, 111524, Москва, Электродная ул., д. 2).

Проценко Анатолий Константинович — канд. техн. наук, заместитель директора по ГОЗ АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит» (Российская Федерация, 111524, Москва, Электродная ул., д. 2).

Шишков Игорь Викторович — инженер АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит» (Российская Федерация, 111524, Москва, Электродная ул., д. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мостовой Г.Е., Карпов А.П., Проценко А.К., Шишков И.В. Экспериментальная оценка сопротивляемости образцов 3d-материала постоянно действующей сжимающей нагрузке при высоких температурах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 5. С. 29–35. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-29-35

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE DEGREE TO WHICH SAMPLES OF A 3D MATERIAL ARE ABLE TO WITHSTAND CONSTANT COMPRESSION LOADING AT HIGH TEMPERATURES

G.E. Mostovoy

A.P. Karpov

A.K. Protsenko

I.V. Shishkov

mostovoy@yandex.ru

andrew.karpov@gmail.com

aprocenko@niigrafit.org

garshiv@gmail.com

**Stock Company Research Institute of Graphite-Based Materials NIIGrafit,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

The study considered specific behaviour of an experimental three-dimensionally reinforced carbon-carbon material during compression tests of samples in an argon environment at temperatures in the 1600...1800 °C range for 60 minutes. We show that when the ultimate loads affecting the material equal 0,95 of the maximum failure load, the material remains functional under the conditions given because creep strain does not exceed 0,05 %

Keywords

Creep, pitch, carbon-carbon composite material, 3d material, fibrils, ultimate strain

Received 21.11.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Mostovoy G.E., Karpov A.P. Features of mechanical testing of carbon and carbon-carbon composite materials at a temperature up to 3000 °C. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2017, vol. 83, no. 5, pp. 56–62 (in Russ.).
- [2] Nikol'skiy B.P., ed. *Spravochnik khimika* [Chemist handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., 1971. 1168 p.
- [3] Sosedov V.P., ed. *Svoystva konstruktsionnykh materialov na osnove ugleroda* [Properties of carbon-based construction materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 336 p.

- [4] Rabotnov Yu.N. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of deformable solids]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 744 p.
- [5] Budnikov P.P., Poluboyartsev D.N., eds. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneuporov [Chemical technology of ceramics and refractories]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 553 p.
- [6] Konkin A.A. Uglerodnye i drugie zharostoykie voloknistye materialy [Carbon-based and other heat-resistant fibrous materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 376 p.
- [7] Varshavskiy V.Ya. Uglerodnye volokna [Carbon fibers]. Moscow, VINITI Publ., 2005. 500 p.
- [8] Meleshko A.I., Polovnikov S.P. Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity [Carbon, carbon fibers, carbon composites]. Moscow, Sayns-press Publ., 2007. 194 p.
- [9] Dergunov N.N., Papernik L.Kh., Rabotnov Yu.N. Analysis of behavior of graphite on the basis of nonlinear heredity theory. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics (PMTF)*, 1971, vol. 12, no. 2, pp. 235–240. DOI: 10.1007/BF00850695

Mostovoy G.E. — Cand. Sc. (Eng.), Leading Research Fellow, Stock Company Research Institute of Graphite-Based Materials NIIgrafit (Elektrodnaya ul. 2, Moscow, 111524 Russian Federation).

Karpov A.P. — Research Fellow, Stock Company Research Institute of Graphite-Based Materials NIIgrafit (Elektrodnaya ul. 2, Moscow, 111524 Russian Federation).

Protsenko A.K. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Director in charge of Government Defence Procurement, Stock Company Research Institute of Graphite-Based Materials NIIgrafit (Elektrodnaya ul. 2, Moscow, 111524 Russian Federation).

Shishkov I.V. — Engineer, Stock Company Research Institute of Graphite-Based Materials NIIgrafit (Elektrodnaya ul. 2, Moscow, 111524 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Mostovoy G.E., Karpov A.P., Protsenko A.K., Shishkov I.V. Experimental Estimation of the Degree to which Samples of a 3d Material are able to Withstand Constant Compression Loading at High Temperatures. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 5, pp. 29–35 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-29-35