

УДК 620.179

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕ

© 2014 М.В. Постнова, В.И. Постнов

Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ

Поступила в редакцию 28.10.2014

Углерод-углеродные композиционные материалы широко применяются в авиационной технике в конструкциях, работающих при мощном воздействии тепловых потоков и высоких температур. В работе приведены исследования механических свойств данных материалов в условиях динамического нагружения при комнатной и повышенной температурах.

Ключевые слова: *углеродные материалы, теплостойкость, износостойкость, динамическое нагружение, демпфирующие свойства*

В современных изделиях авиационной и ракетной техники многие нагруженные детали подвергаются одностороннему воздействию больших тепловых потоков. Это ставит перед разработчиками новых изделий трудную задачу в подборе материалов, устойчивых к воздействию высоких температур порядка 800÷2000°C с сохранением достаточной прочности. Одним из видов таких материалов являются композиционные материалы (КМ) на основе углерода, объединенные общим названием «углерод-углеродные композиционные материалы» (УУКМ), широко используемые в современной технике для изготовления конструкций, работающих при тепловых потоках большой мощности и высоких температурах [1-3]. УУКМ содержат в себе углеродный формирующий элемент в виде дискретных волокон, непрерывных нитей или жгутов, войлоков, лент, тканей с плоским и объемным плетением, объемных каркасных структур, которые объединены углеродной матрицей в одно целое. Предопределяющими факторами при выборе материала матрицы являются состав, свойства и структура кокса. К количеству специальных свойств УУКМ относится низкая пористость, низкий коэффициент термического расширения, сохранение стабильной структуры и свойств, а также размеров изделий при нагревах до 2000°C и охлаждении, высокие механические свойства. Перечисленные преимущества УУКМ позволяют успешно их применять в качестве тормозных дисков в авиационном производстве,

соплах ракетных двигателей, защитных накладках крыльев космических челноков, пресс-формах, тиглях, роторах турбин, труб высокого давления, для подшипников скольжения, уплотнений и во многих других случаях. Эти материалы находят также применение в изделиях, подверженных воздействию динамического нагружения при повышенных температурах. Механические свойства таких материалов при температурах до 450°C и динамическом нагружении изучены недостаточно полно.

Цель работы: исследование механических свойств УУКМ, изготовленных по двум технологическим вариантам (с термостатированием и без него) в условиях динамического нагружения при температурах 20°C и 450°C.

Были отработаны методические вопросы испытаний и определены механические свойства углеродных материалов (на образцах в виде стержней) при нормальной и повышенной температурах. В качестве объектов исследования служили углерод-углеродные материалы двух вариантов изготовления:

1. Углерод-углеродный материал (УУМ-2), состоящий из углеродного жгута УКН-П/5000 и углеродной матрицы, полученный со стадией термостатирования. Схема армирования следующая: 0/90/0/90/0/90/0/90/0 (угловая ориентация слоев дана начиная с наружного слоя относительно продольной оси образца). Образцы изготовлены в виде стержней постоянного поперечного сечения.

2. Углерод-углеродный материал (УУМ-3), состоящий из углеродного жгута УКН-П/5000 и углеродной матрицы, полученный без стадии термостатирования. Схема армирования следующая: 0/90/0/90/0/90/0/90/0 (угловая ориентация

Постнова Мария Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник. E-mail: untcviam@gmail.com

Постнов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, доцент, начальник филиала

слоев дана начиная с наружного слоя относительно продольной оси образца). Образцы изготовлены в виде стержней постоянного поперечного сечения. У всех образцов данной группы имелись дефекты в виде расслоений, которые располагались на разных расстояниях от наружной поверхности ($h_{\text{деф}}$ изменялась от $h/9$ до $h/2$, где h – толщина образца) для разных образцов. По длине образцов эти расслоения наблюдались как в центре образцов, так и в районе боковых торцов. У образцов УУМ-3/7 имелся кроме того вырыв наружного слоя ($\varphi=0^\circ$) на одной поверхности образца. На рис. 1 в качестве примера приведены дефекты, наблюдаемые на образце УУМ-3/5. В табл. 1 приведены механические свойства углерод-углеродных материалов при статическом нагружении и температуре 20°C .

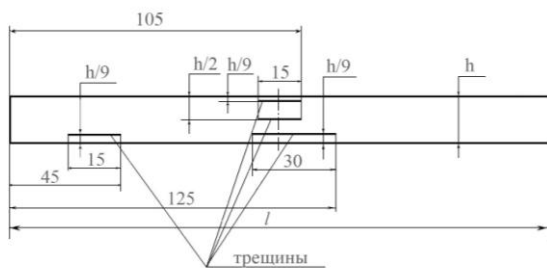


Рис. 1. Вид дефектов образца УУМ-3/5

Таблица 1. Механические свойства углерод-углеродных материалов при статическом нагружении

Маркировка	Модуль упругости при изгибе $E_{\text{вн}} \cdot 10^{-6}$, МПа	Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{вн}}$, МПа	Плотность ρ , г/см ³
УУМ-2	13,0	900,0	1,49
УУМ-3	12,5	750,0	1,42

Испытания углеродных материалов при повышенных температурах (до 450°C) проводились в резонансном режиме нагружения на приспособлении, состоящем из узла подвески образцов в узловых линиях основной формы изгибных колебаний и электрической печи для нагрева средней части образцов. Испытания проводились с использованием обычных фольговых и специальных высокотемпературных тензорезисторов. Высокотемпературные тензорезисторы наклеивались в средней части образцов (в зоне максимальных температур), здесь же наклеивалась хромель-копельная термопара для контроля максимального уровня температур в образце испытаний. Образец в целом имеет неравномерное температурное поле. Центральная часть образца, находящаяся в печи, нагрета до температуры,

соответствующей температуре испытаний. Свободные концы образцов имеют температуру выше температуры окружающей среды. При длине образцов 200 мм на образцах имеется участок длиной $30 \div 40$ мм с равномерным температурным полем. При испытании образцов на струнах по первой изгибной форме место максимальных относительных деформаций находится в середине образца по длине, т.е. в равномерном температурном поле. Испытания углеродных материалов при нормальной температуре (20°C) также проводились в резонансном режиме нагружения. Образцы закреплялись в приспособлении на струнах в узловых линиях первой формы изгибных колебаний. В табл. 2 приведены средние значения динамического модуля упругости при изгибе углерод-углеродных материалов (температура испытаний 20°C) и значения коэффициента Пуассона. Коэффициент вариации модуля упругости составил 3,9% для образцов с термостатированием и 5,7% для образцов без термостатирования. Значения динамических модулей упругости оказались ниже приведенных в табл. 1, особенно для образцов без термостатирования. Это может быть связано с начальными дефектами.

Таблица 2. Упругие свойства углерод-углеродных материалов

Маркировка	Модуль упругости $E_{\text{ср}} \cdot 10^{-6}$, МПа	Коэффициент Пуассона μ
УУМ-2	12,5	0,020
УУМ-3	11,0	0,015

Влияние температуры на модуль упругости оказалось не велико. Получено, что в интервале температур $20 \div 450^\circ\text{C}$ максимальное уменьшение E составило $\approx 4\%$ по сравнению с первоначальным. Проводилась также расчетным путем оценка изменения E с ростом температур, учитывающая неравномерность температурного поля в образце, которая дала аналогичный результат. На рис. 2 приведена зависимость логарифмического декремента колебаний углеродных материалов от уровня относительных деформаций ϵ при температуре 20°C . Даны средние значения логарифмического декремента колебаний. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что коэффициент вариации в зависимости от уровня относительных деформаций составляет $\nu=6 \div 15\%$. Из рис. 2 видно, что для углеродного материала с термостатированием зависимость логарифмического декремента колебаний от уровня относительных деформаций мала. Для материала без термостатирования зависимость δ от ϵ выражена в большей

степени, что обусловлено значительными дефектами в образцах. Определение логарифмического декремента колебаний δ при температуре 450 °С не показало его зависимости от температуры при таком определении температур по образцам. Все полученные результаты укладывались в границы, определенные коэффициентом вариации для испытаний при температуре 20°С.

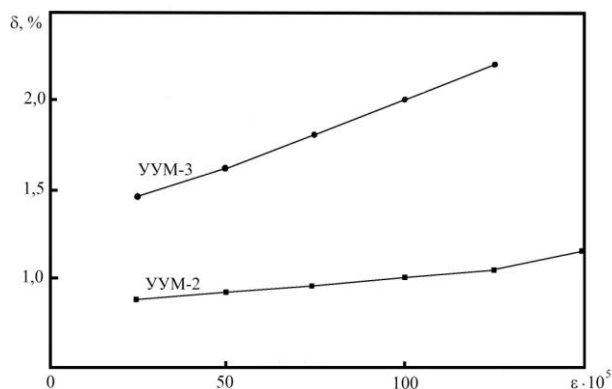


Рис. 2. Зависимость логарифмического декремента колебаний углерод-углеродных материалов от уровня ϵ

Усталостные испытания образцов проводились в режиме постоянных относительных деформаций на базе $N=10^6$ циклов. Для исключения выработки материала под струнами на образцы в этих местах наклеивались никелевые наклейки. Результаты усталостных испытаний углерод-углеродных материалов при температуре

20°С приведены в табл. 3. При испытании образца УУМ-3/1 не удалось выйти на высокий уровень ϵ и образец разрушился на уровне $\epsilon=50 \cdot 10^{-5}$. О наличии большого количества начальных дефектов в этом образце (по сравнению с другими) говорит и такой факт, что логарифмический декремент колебаний образца УУМ-3/1 на уровне $\epsilon=50 \cdot 10^{-5}$ составил $\delta \approx 4,0\%$, тогда как у других образцов среднее значение δ на этом уровне составило 1,6%. Из табл. 3 видно, что деформационный предел выносливости материала УУМ-2 составил $\epsilon_{-1} \approx 150 \cdot 10^{-5}$ на базе 10^6 циклов и материала УУМ-3 $\epsilon_{-1} \approx 75 \cdot 10^{-5}$ (без учета образца УУМ-3/1). Следует отметить, что начальные дефекты в образцах УУМ-3 существенно снизили их деформационный предел выносливости. Изменение резонансной частоты образцов происходило в виде ступенек, практически без начального падения частоты. Разрушение материала УУМ-2 проявлялось в виде отслоения наружных слоев по кромкам образцов в центре (по длине образцов). У материала УУМ-3 разрушение носило другой характер, оно проявлялось в виде расслоения между слоями (по толщине) как в центре образцов, так и в районе узловых линий. Наблюдались так же продольные трещины в отдельных слоях (расслоение между волокнами в слое). В табл. 4. приведены результаты усталостных испытаний материала УУМ-3 при температуре 450°С остался прежним.

Таблица 3. Результаты усталостных испытаний углерод-углеродных материалов при нормальной температуре (20°С)

Материал	№ образца	Уровень относит. деформ. $\epsilon \cdot 10^5$	Резонансная частота, f_p , Гц			Число циклов наработки N_u		Примечание	
			начальная	в момент нач. разруш.	конечная	до нач. разруш.	общее		
УУМ-2	2/3	100	528	-	525	-	10^6	цел	
		150	524	-	517	-	10^6	цел	
		200	513	501	468	$7,3 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^5$	разрушен	
	2/4	200	515	498	474	$2,1 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	разрушен	
		2/5	150	541	-	538	-	10^6	цел
			200	537	520	483	$1,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	разрушен
2/7	250	532	521	485	$4,5 \cdot 10^4$	10^5	разрушен		
УУМ-3	3/1	50	461	438	331	$2,2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	разрушен	
		70	509	-	488	-	10^6	цел	
	3/3	90	481	462	365	$3,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	разрушен	
		80	485	470	376	$4,0 \cdot 10^4$	$8,0 \cdot 10^4$	разрушен	
	3/7	80	474	447	375	$1,3 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$	разрушен	
	3/8	75	507	-	506	-	10^6	цел	
	100	506	488	371	$1,7 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	разрушен		

Таблица 4. Результаты усталостных испытаний углерод-углеродных материалов при повышенной температуре (450°C)

Материал	№ образца	Уровень относит. деформ. $\varepsilon \cdot 10^5$	Резонансная частота, f_p , Гц			Число циклов наработки N_n		Примечание
			начальная	в момент нач. разруш.	конечная	до нач. разруш.	общее	
УУМ-2	2/1	200	539	528	493	$1,6 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	разрушен
	2/2	100	532	-	530	-	10^6	цел
		150	529	-	526	-	10^6	цел
		200	524	506	483	$8,6 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	разрушен
	2/6	150	521	-	518	-	10^6	цел
200		516	495	465	$1,1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	разрушен	
2/8	250	526	512	475	$6,2 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^4$	разрушен	

Выводы:

1. Определены упруго-демпфирующие и усталостные свойства углерод-углеродных материалов при температуре 20°C. Получено, что для образцов с термостатированием значение модуля упругости несколько выше, чем без термостатирования, причем снижение динамического модуля упругости по сравнению со статическим у материала УУМ-2 меньше, чем у материала УУМ-3 (что может быть связано с наличием начальных дефектов в этих образцах). Демпфирующая способность материала УУМ-3 оказалась примерно в 2 раза выше, чем у материала УУМ-2 (что связано с наличием начальных дефектов).

2. Деформационные пределы выносливости на базе $N=10^6$ циклов углерод-углеродных материалов составил: $\varepsilon_{-1}=150 \cdot 10^{-5}$ для материала УУМ-2 и $\varepsilon_{-1}=75 \cdot 10^{-5}$ для материала УУМ-3.

3. Испытания при повышенной температуре 450°C материала УУМ-2 показали, что данный уровень температур практически не оказывает влияния на упругодемпфирующие

и усталостные свойства этого материала. Максимальное уменьшение модуля упругости E в диапазоне температур 20÷450°C составило 4%. Демпфирующая способность и усталостная прочность это материала при температуре 450°C не изменилась.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Фиалков, А.С.* Углерод, межслоевые соединения и композиты на их основе. – М.: Аспект Пресс, 1997. 718 с.
2. *Гардымов, Г.П.* Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении / *Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев.* – СПб.: СпецЛит, 1999. 271 с.
3. *Кузнецов, С.И.* Отражательная способность углеграфитовых КМ и углеродных тканей / *С.И. Кузнецов, А.Л. Петров, А.Ю. Паршиков* // Известия Самарского научного центра РАН. 2002. Т. 4, №11. С. 31-36.

INFLUENCE OF TESTS TEMPERATURE ON FATIGUE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS ON THE CARBON MATRIX

© 2014 M.V. Postnova, V.I. Postnov

Ulyanovsk Scientific and Technological Center VIAM

Carbon-carbon composite materials are widely applied in the aircraft equipment in constructions, working at powerful influence of thermal streams and high temperatures. Researches of mechanical properties of these materials in the conditions of dynamic loading at the room and increased temperatures are given in work.

Key words: carbon materials, heat resistance, wear resistance, dynamic loading, damping properties

Maria Postnova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Fellow. E-mail:

untcviam@gmail.com

Vyacheslav Postnov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Branch