

Исследования механических свойств металло-керамоматричного композиционного материала

Низовцев В.Е., Климов Д.А., Бортников А.Д., Ступеньков М.И.,
Бредихина Е.Н., Мыктыбеков Б.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: mistupenkov@ciam.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований на растяжение, сжатие и изгиб для образцов из композиционных материалов на основе карбонитрида титана. Испытания проведены при температурах до 1000°C. Приведены значения пределов прочности и кривые деформирования материалов.

Ключевые слова: композиционный материал, металлокерамоматричный материал, прочность.

Cermet-matrix composite material studies

Nizovtsev V.E., Klimov D.A., Bortnikov A.D., Stupen'kov M.I.,
Bredikhina E.N., Myktybekov B.

CIAM, Moscow

The experimental results are represented for samples of cermet-matrix composite materials based on titanium carbonitride. Tensile strength, compressive strength and bending strength at temperatures up to 1000°C are presented. Deflection curves are shown.

Keywords: composite material, cermet-matrix material, strength.

Введение

Увеличение КПД газотурбинных двигателей за счет повышения температуры газа перед турбиной требует применения сложных и дорогостоящих способов термозащиты деталей, изготовленных из металлических сплавов, либо разработки новых высокотемпературных материалов, обладающих требуемыми физико-механическими, теплофизическими и специальными свойствами [1–4]. Одним из таких материалов является металлокерамоматричный композиционный материал (МКМКМ), концепция создания которого заключается во внедрении в матрицу основного материала наночастиц другого вещества, активирующих образование металлокерамоматричных соединений.

Высокие твердость, термостойкость и благоприятное сочетание других физико-механических свойств композиционных материалов на основе карбидов [5], нитридов, силицидов и боридов [6] переходных и тугоплавких металлов позволяют обеспечить высокую надежность и большой ресурс деталей авиационных двигателей.

Технологический цикл изготовления МКМКМ включает синтез, размол, рафинирование, грануляцию, шихтование, химико-термическую и механохими-

ческую обработки, прессование, термогазодинамическую и термогазокомпрессионную обработки, обработку на станке с ЧПУ с использованием оригинального сверхтвердого инструмента, отпуск. Прохождение всех стадий обеспечивает создание МКМКМ с однородной ультрамелкозернистой структурой (рис. 1), позволяющей проводить обработку резанием, точением, шлифованием с помощью алмазного инструмента и электроэрозионную резку. В результате обеспечивается низкий для керамических материалов разброс упругих и прочностных характеристик.

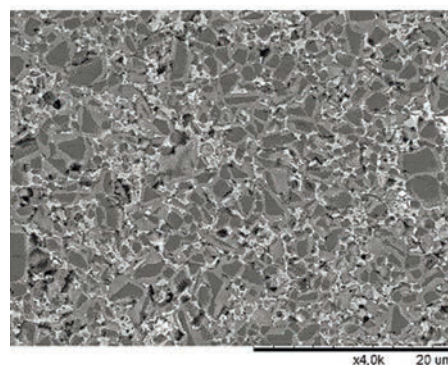


Рис. 1. Микроструктура МКМКМ на основе карбонитрида титана

Испытания металлокерамоматричного композиционного материала

В ЦИАМе проведены экспериментальные исследования прочностных свойств перспективных МКМКМ с целью оценки возможности их применения для изготовления ответственных деталей горячей части двигателя. Для этого были разработаны и утверждены оригинальные методики и программы испытаний образцов из композиционных материалов, регламентирующие виды, объем и методы проведения испытаний и методы обработки экспериментальных результатов [7–10]. Разработка методик опиралась преимущественно на анализ зарубежных методов определения механических характеристик керамических композиционных материалов, представленных в стандартах ASTM [11–13] и справочнике [14]. В России нормативная база для проведения испытаний образцов из высокопрочной керамики практически отсутствует.

Исследованы МКМКМ двух марок:

1) «Карбопром-15»: 15...20% – частицы Fe, Co, W, Re размерами 0,15...5 мкм, остальное – матрица TiCN карбонитрида титана 5...20 мкм (ТУ 159500-011-86495092–2011, [15]);

2) «Карбопром-75»: 5...10% – частицы Fe, Co, W, Re размерами 0,15...5 мкм, остальное – матрица TiCN 5...20 мкм (ТУ 159500-002-86495092-2010, [16]).

Основные свойства материалов: теплопроводность 20...60 Вт/м·К; плотность 7,2...8,3 г/мм³; коэффициент термического расширения (8,5...11)·10⁻⁶ 1/°С; скорость окисления на воздухе 7,5·10⁻⁶ г/(см²·мин) при 500°С, 5,0·10⁻⁴ г/(см²·мин) при 1000°С.

Для деталей, изготовленных из исследованных МКМКМ, не требуется нанесение защитных покрытий при рабочих температурах до 1400°С.

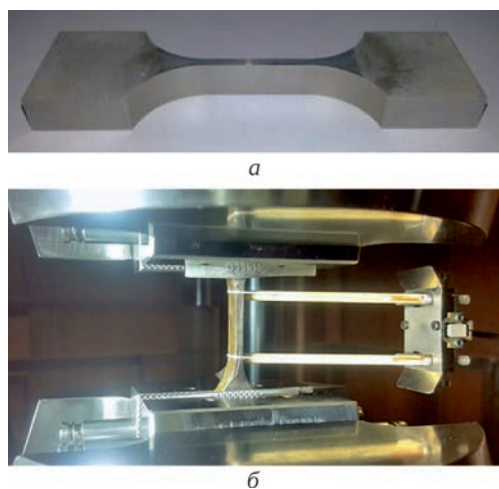


Рис. 2. Испытания на растяжение: а – плоский образец из «Карбопрома-15»; б – закрепление образца в оснастке стенда

Определение предела прочности при растяжении.

При статическом растяжении испытано 16 плоских образцов из «Карбопрома-15», имеющих форму «песочные часы» (рис. 2,а). Наружная поверхность образцов гладкая, без сколов, трещин и других дефектов. Размеры рабочей части: длина 25 мм, ширина 10 мм, толщина 3 мм.

Испытания на растяжение проведены на сервогидравлической многофункциональной испытательной машине POZ909 фирмы Schenck. Образец зажимался

Таблица 1. Результаты испытаний образцов из «Карбопрома-15» на растяжение при температуре 20°С

№ образца	Параметр		
	E, ГПа	$\sigma_{\text{пц}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
22	201,98	1702,4	2178,5
1	211,57	1789,7	2100,1
9	210,98	–	1801,1
13	209,19	1715,5	2181,0
3	214,85	1771,0	2096,0
26	205,18	–	1817,1
23	209,11	1715,5	2181,0
8	212,73	–	1982,1
7	217,61	1722,2	2011,2
5	208,66	1733,8	2073,1
10	214,04	1808,5	2108,2
24	213,44	–	1874,4
4	208,57	1711,3	2135,9
12	205,64	2027,0	2287,6
Среднее значение	210,11	1769,7	2059,1
Среднеквадратическое отклонение	4,3	97,51	145,54
Коэффициент вариации, %	2,08	5,51	7,07

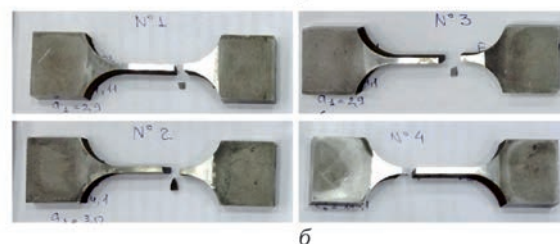
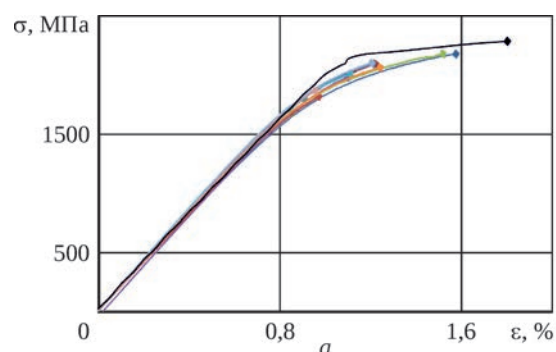


Рис. 3. Кривые деформирования образцов из «Карбопрома-15» при растяжении (а) и разрушенные образцы (б)

в клиновидные гидравлические захваты (рис. 2,б) и нагружался со скоростью 0,5 мм/мин растягивающим усилием до полного разрушения. Для предотвращения выскользывания образцов из захвата и обеспечения равномерного сцепления использованы специальные алюминиевые накладки. Продольную и поперечную деформации измеряли двухосным экстензометром Epsilon 3560-BIA-025M-010-НТ2.

Результаты испытаний приведены на рис. 3 и в табл. 1, где E – модуль упругости; $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности; $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности при растяжении.

Среднее значение предела прочности для «Карбопрома-15» при растяжении при температуре 20°C составило 2059,1 МПа. Коэффициент вариации 7,07%. Разрушение образцов происходило в рабочей зоне (рис. 3,б). Образцы № 8, 9, 24 и 26 разрушились до достижения предела текучести.

Определение предела прочности при сжатии.

При статическом сжатии испытано 10 цилиндрических образцов из «Карбопрома-15» и 11 – из «Карбопрома-75» (рис. 4). Высота образцов 12,7 мм, диаметр 6,35 мм.

Испытания на сжатие проведены на машине Amsler 300 HFP5100 Zwick и сервогидравлической испытательной машине LFV HH100 Walter Bai. Образец зажимался в клиновидные гидравлические захваты и

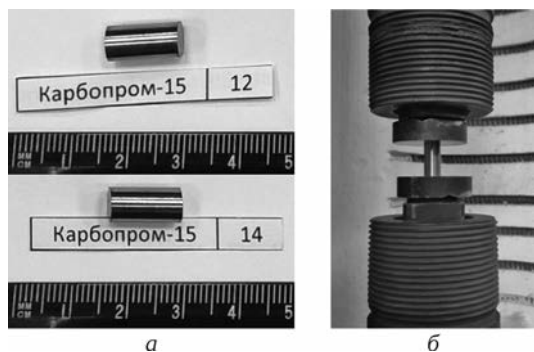


Рис. 4. Испытания на сжатие:

а – цилиндрические образцы из «Карбопрома-15»;
б – закрепление образца в оснастке стенда

Таблица 2. Результаты испытаний на сжатие образцов из «Карбопрома-15» при температуре 20°C

№ образца	Параметр		
	E , ГПа	P , кН	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
1	258,90	106,10	3349,50
2	228,00	99,10	3109,10
3	221,50	107,80	3385,30
6	216,40	104,50	3325,80
7	218,40	105,20	3344,70
Среднее значение	228,64	104,54	3302,88
Среднеквадратическое отклонение	17,54	–	110,44
Коэффициент вариации, %	7,48	–	3,34

нагружался со скоростью 0,5 мм/мин сжимающим усилием до полного разрушения. Деформацию измеряли экстензометром фирмы Epsilon 3560-BIA-025M-010-НТ2 с продольно отшлифованными ножами в целях возможности установки на рабочей части образца.

Результаты испытаний образцов при сжатии приведены в табл. 2 – табл. 5, где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности при сжатии; E – модуль упругости; P – максимальная нагрузка.

Таблица 3. Результаты испытаний на сжатие образцов из «Карбопрома-15» при температуре 500°C

№ образца	Параметр		
	E , ГПа	P , кН	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
4	–	73,00	2284,60
5	–	67,30	2099,60
8	–	63,30	1979,70
9	–	71,10	2217,80
10	–	66,00	2065,20
Среднее значение	–	68,14	2129,38
Среднеквадратическое отклонение	–	–	121,78
Коэффициент вариации, %	–	–	5,72

Таблица 4. Результаты испытаний на сжатие образцов из «Карбопрома-75» при температуре 20°C

№ образца	Параметр		
	E , ГПа	P , кН	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
1	363,80	106,00	3325,70
2	362,30	109,00	3421,60
3	398,50	109,60	3439,90
4	–	107,80	3403,90
6	361,30	89,70	2814,00
7	388,90	79,60	2498,90
Среднее значение	374,96	100,28	3150,67
Среднеквадратическое отклонение	17,46	–	397,48
Коэффициент вариации, %	4,66	–	12,62

Таблица 5. Результаты испытаний на сжатие образцов из «Карбопрома-75» при температуре 500°C

№ образца	Параметр		
	E , ГПа	P , кН	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
5	–	79,80	2511,80
8	–	81,30	2552,80
9	–	85,90	2687,40
10	–	85,80	2686,00
11	–	67,10	2119,90
Среднее значение	–	79,98	2511,58
Среднеквадратическое отклонение	–	–	232,62
Коэффициент вариации, %	–	–	9,26

Для образцов из «Карбопрома-15» среднее значение предела прочности при сжатии при температуре 20°C составило 3302,9 МПа; минимальное значение – 3109,1 МПа, максимальное – 3385,3 МПа; коэффициент вариации – 3,34%. При температуре 500°C среднее значение предела прочности при сжатии составило 2129,4 МПа; минимальное значение – 1979,7 МПа, максимальное – 2284,6 МПа; коэффициент вариации – 5,72%.

Для образцов из «Карбопрома-75» среднее значение предела прочности при сжатии при температуре 20°C составило 3150,7 МПа; коэффициент вариации – 12,62%. Если из выборки исключить образец №7, то среднее значение прочности составит 3281 МПа, коэффициент вариации 8,07%, что является хорошим показателем для данного вида испытания. Среднее значение предела прочности при сжатии при температуре 500°C составило 2511,6 МПа, коэффициент вариации – 9,26%.

Снижение прочности при сжатии при высокотемпературных испытаниях, не характерное для типичной керамики, объясняется влиянием металлических компонентов МКМКМ. При этом снижение предела прочности для «Карбопрома-15» составляет 35%, для «Карбопрома-75» – 25%. В составе «Карбопрома-75» меньше металлических легирующих компонентов, поэтому влияние температуры на предел прочности менее выражено.

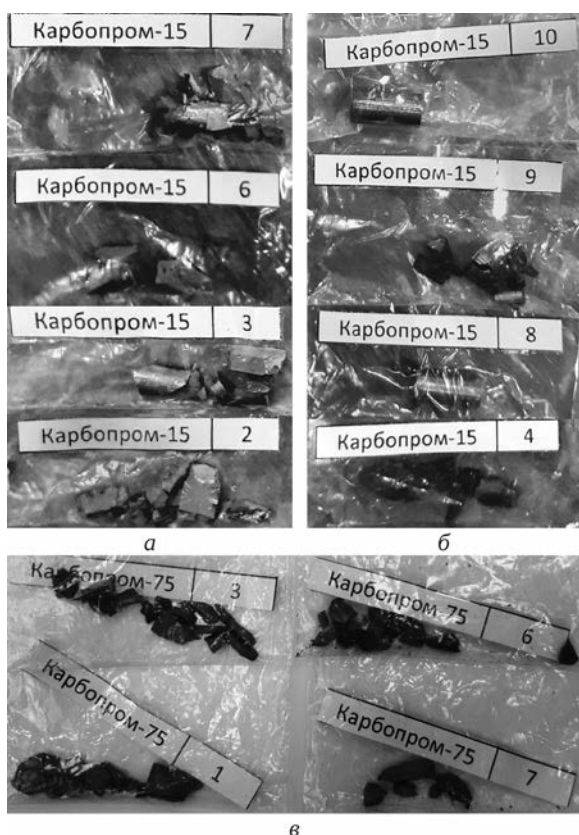


Рис. 5. Разрушенные при сжатии образцы МКМКМ: а – «Карбопром-15» при 20°C; б – «Карбопром-15» при 500°C; в – «Карбопром-75» при 20°C

Для образцов из «Карбопрома-15» и «Карбопрома-75» характерно разрушение в виде однородных фракций обломков (рис. 5), что демонстрирует гомогенность структуры и морфологии материала и определяет малый разброс параметров относительно других керамических материалов.

Результаты испытаний указывают на высокую прочность и уровень технологической стабильности материалов «Карбопром-15» и «Карбопром-75».

Определение предела прочности при изгибе. Испытания на изгиб проведены на установках Instron 5985 и W+B LFV-НН100 (рис. 6). Прочность на изгиб определена путем приложения нагрузки через специальную оснастку по центру образца с постоянной скоростью 0,5 мм/мин.

Для испытаний при комнатной температуре использована металлическая оснастка с возможностью изменения расстояния между опорами и датчик Epsilon 3560 для измерения прогиба в центре пролета.

Для высокотемпературных испытаний использована оснастка из керамического материала на основе оксида алюминия, имеющая фиксированное расстояние между опорами 40 мм.

Для определения характеристик при изгибе было испытано 12 образцов из «Карбопрома-15» при четырехточечном изгибе при температурах 20 и 500°C и 10 образцов из «Карбопрома-75» при трехточечном изгибе при температуре 20°C и при четырехточечном изгибе при температуре 500°C.

В связи с ограничением на величину максимальной нагрузки $P = 1$ кН образцы, испытанные при температуре 500°C, не были разрушены. Два образца из «Карбопрома-75», из числа неразрушенных, были дополнительно испытаны при четырехточечном изгибе при температуре 1000°C.

Размеры образцов: длина 45 мм, ширина 4 мм, толщина 3 мм.

Результаты испытаний образцов из «Карбопрома-15» и «Карбопрома-75» приведены в табл. 6 – табл. 10, где $b \times h$ – размеры поперечного сечения; P – максимальная нагрузка; σ_b – предел прочности при изгибе; σ – напряжение при изгибе; σ_{max} – наибольшее напряжение при изгибе; ε – деформация при изгибе.

Среднее значение предела прочности при четырехточечном изгибе образцов из «Карбопрома-15» при температуре 20°C достигает 4168 МПа, коэффициент вариации 6%. Образцы, разрушенные при испытаниях на изгиб при комнатной температуре, показаны на рис. 7. При температуре 500°C образцы не удалось довести до разрушения из-за ограничения оснастки.

Для образцов из «Карбопрома-75» средний предел прочности при изгибе при температуре 20°C составил 1497 МПа, коэффициент вариации – 11,6%.

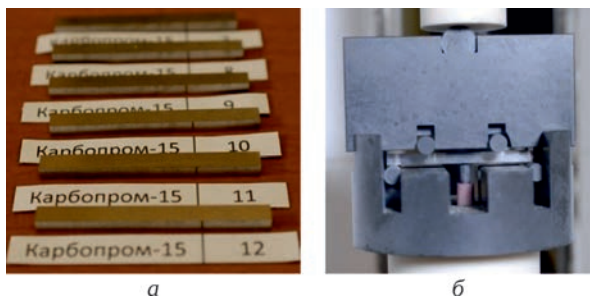


Рис. 6. Испытание образцов при четырехточечном изгибе при повышенных температурах:
 а – плоские образцы из «Карбопрома-15»; б – закрепление образцов в высокотемпературной оснастке

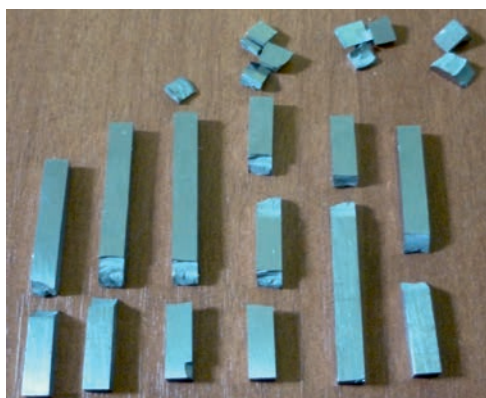


Рис. 7. Разрушенные образцы из «Карбопрома-15» при испытании на изгиб при комнатной температуре

Таблица 6. Результаты испытаний на четырехточечный изгиб образцов из «Карбопрома-15» при температуре 20°C

№ образца	Параметр		
	$b \times h$, мм	P , кН	σ_B , МПа
1	4,012×3,025	5,531	4520
2	4,013×3,028	5,142	4192
3	4,027×3,027	4,695	3817
4	4,046×3,031	5,340	4310
5	4,029×3,030	4,890	3966
6	4,031×3,037	5,211	4204
Среднее значение			4168
Среднеквадратическое отклонение			248,98
Коэффициент вариации, %			6,0

Таблица 7. Результаты испытаний на четырехточечный изгиб образцов из «Карбопрома-15» при температуре 500°C

№ образца	Параметр			
	$b \times h$, мм	P , Н	σ , МПа	ϵ , %
7	4,034×3,032	1000,00	808,96	0,472
8	4,051×3,030		806,63	0,476
9	4,026×3,028		812,71	0,466
10	4,019×3,031		812,52	0,454
11	4,025×3,036		808,64	0,472
12	4,040×3,035	1000,02	806,18	0,457

Таблица 8. Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов из «Карбопрома-75» при температуре 20°C

№ образца	Параметр			
	$b \times h$, мм	P , Н	σ_B , МПа	ϵ , %
1	4,056×3,076	1000,9	1564,8	0,383
2	4,052×3,060	760,7	1203,0	0,237
3	4,061×3,135	986,2	1482,5	0,377
4	4,045×3,075	1030,3	1616,2	0,371
5	4,056×3,106	1055,6	1618,6	0,382
Среднее значение			1497,0	0,35
Среднеквадратическое отклонение			173,38	–
Коэффициент вариации, %			11,6	–

Таблица 9. Результаты испытаний на четырехточечный изгиб образцов из «Карбопрома-75» при температуре 500°C

№ образца	Параметр			
	$b \times h$, мм	P , Н	σ_{max} , МПа	ϵ , %
6	4,10×3,20	1000,02	714,57	0,236
7		1000,01		0,240
8		1000,00	714,56	0,245
9		1000,01		0,253
10		1000,04	714,58	0,237
Среднее значение				0,24

Таблица 10. Результаты повторных испытаний на четырехточечный изгиб образцов из «Карбопрома-75» при температуре 1000°C

№ образца	Параметр			
	$b \times h$, мм	P , Н	σ_{max} , МПа	ϵ , %
6	4,10×3,20	393,42	281,12	0,873
7		411,01	293,69	0,870

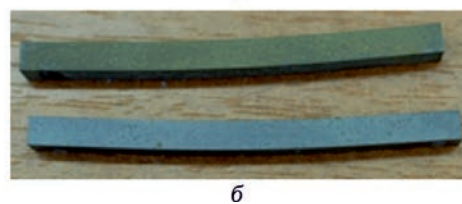
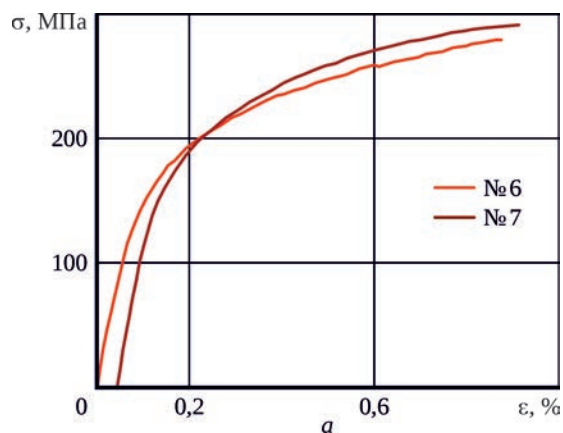


Рис. 8. Испытания на изгиб при температуре 1000°C:
 а – кривые деформирования; б – неразрушенные образцы из «Карбопрома-75» после испытаний (б)

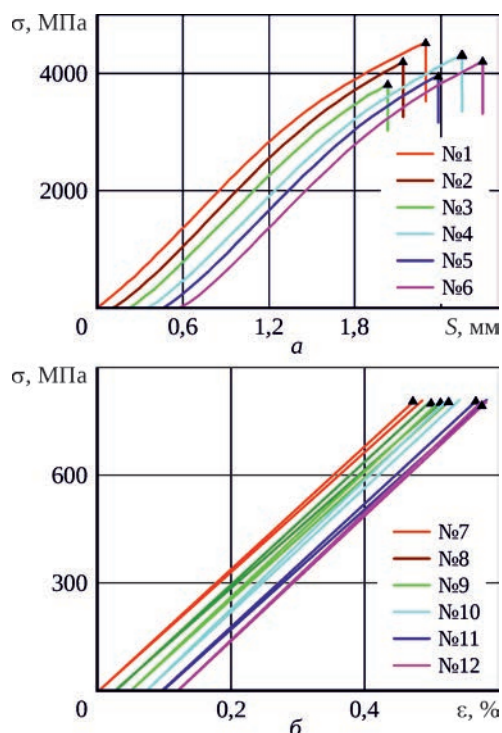


Рис. 9. Результаты испытаний образцов из «Карбопрома-15»: а – зависимость напряжения от перемещения нижнего захвата испытательной машины при температуре 20°C; б – зависимость напряжения от деформации при четырехточечном изгибе при температуре 500°C

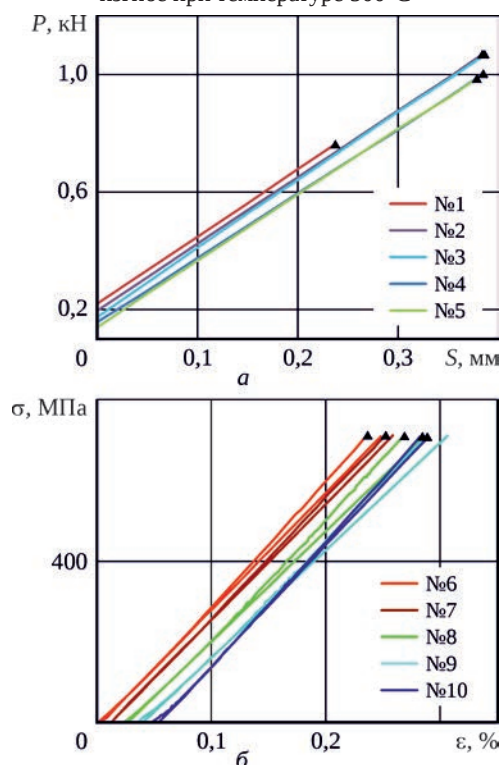


Рис. 10. Результаты испытаний образцов из «Карбопрома-75»: а – зависимость нагрузки от перемещения нижнего захвата испытательной машины при трехточечном изгибе при температуре 20°C; б – зависимость напряжения от деформации при четырехточечном изгибе при температуре 500°C

После испытаний образцов при температуре 500°C остаточных деформаций не обнаружено, образцы не доведены до разрушения.

На рис. 8,а приведены кривые деформирования образцов из «Карбопрома-75» при повторных испытаниях при температуре 1000°C. В связи с ограничением датчика прогиба разрушить образцы не удалось. Отмечено наличие пластических деформаций (рис. 8,б).

Результаты испытаний образцов из «Карбопрома-15» и «Карбопрома-75» дополнительно проиллюстрированы графиками зависимостей напряжения от перемещения S нижнего захвата испытательной машины и от деформации ε (рис. 9 и рис. 10).

Заключение

Проведены экспериментальные исследования на растяжение, сжатие и изгиб образцов из металло-керамоматричных композиционных материалов «Карбопром-15» и «Карбопром-75» при температурах 20, 500 и 1000°C.

При температуре 20°C:

- «Карбопром-15» имеет средний предел прочности при растяжении 2059 МПа, при сжатии 3302 МПа, при изгибе – 4168 МПа;

- «Карбопром-75» имеет средний предел прочности при сжатии 3150 МПа, при изгибе – 1497 МПа.

При температуре 500°C средний предел прочности при сжатии для «Карбопрома-15» составляет 2129 МПа, а для «Карбопрома-75» – 2511 МПа.

При сжатии материалы имеют характерные для керамических материалов высокие пределы прочности. Однако при растяжении и изгибе «Карбопром-15» имеет повышенный предел временной прочности. Величина предела прочности на растяжение «Карбопрома-15» составляет 2059 МПа при температуре 20°C, что является очень высоким значением для керамики (в среднем значения составляют 600...800 МПа).

На кривых деформирования исследованных материалов заметно влияние металлических компонентов, выраженное в наличии пластических деформаций, что не характерно для керамических материалов. При испытаниях образцов из «Карбопрома-75» на изгиб при температуре 1000°C наблюдается пластическое деформирование образцов, что может благоприятно повлиять на работоспособность и надежность детали.

Несмотря на то что при изгибе не удалось довести образцы до разрушения при температурах 500 и 1000°C, достигнуты достаточно высокие значения напряжений.

Низкие для керамических материалов коэффициенты вариации (для «Карбопрома-15» – 3,34...7,1%; для «Карбопрома-75» – 9,3...12,6%) при испытаниях указывают на стабильность и гомогенность структуры

материала типа «Карбопром», что является показателем совершенства технологии изготовления.

По результатам испытаний можно сделать промежуточный вывод о перспективности применения металлокерамоматричных композиционных матери-

алов для изготовления деталей ГТД, работающих в условиях высоких температур и нагрузок. В дальнейшем планируется исследование трещиностойкости и малоциклового усталости материалов «Карбопром».

Литература

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Сварка и родственные технологии. 2013. С. 23-32.
2. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. № 5, 2012. С. 231–242.
3. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 20–24.
4. Низовцев В.Е., Климов Д.А., Бортников А.Д., Низовцева О.В. О перспективах применения наноструктурных гетерофазных полифункциональных композиционных материалов в авиадвигателестроении // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 1. С. 122–127.
5. Шкарупа И.Л., Плясункова Л.А., Шкарупа М.И., Климов Д.А. Исследование свойств материалов на основе карбида кремния // Новые огнеупоры. № 6, 2009. С. 26–28.
6. Williams P.A., Sakidia R., Perepezko J.H. Oxidation of ZrB₂-SiC ultra-high temperature composites over a wide range of SiC content // J. Eur. Cer. Soc. 2012. Vol. 32. P. 3875–3883.
7. Методика испытания образцов из керамического композиционного материала на растяжение при температуре до 500°C. М.: ЦИАМ, 2017. 12 с.
8. Методика испытания образцов из керамического композиционного материала на сжатие при температуре до 500°C. М.: ЦИАМ, 2017. 13 с.
9. Методика испытания образцов из керамического композиционного материала на изгиб при температуре до 500°C. М.: ЦИАМ, 2017. 12 с.
10. Программа испытаний образцов из композиционных материалов. М.: ЦИАМ, 2017. 7 с.
11. ASTM C1275-16 «Standard Test Method for Monotonic Tensile Behavior of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Solid Rectangular Cross-Section Test Specimens at Ambient Temperature».
12. ASTM C1424-15 «Standard Test Method for Monotonic Compressive Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature».
13. ASTM C1161-13 «Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature».
14. Справочник по композиционным материалам МО США «Керамические композиционные материалы» MIL-HDBK-17-5. Т. 5.
15. Технические условия 159500-011-86495092–2011. «Детали из металлокерамоматричного композита на основе карбонитрида титана «Карбопром-15». Москва, 2011. 8 с.
16. Технические условия 159500-002-86495092–2010. «Детали из металлокерамоматричного композита на основе карбонитрида титана «Карбопром-75». Москва, 2010. 8 с.

References

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Strategicheskie napravleniia razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda. [Strategic development directions of materials and technologies for their processing for the period until 2030]. Svarka i rodstvennye tekhnologii [Welding and related technologies]. 2013. P. 23–32.
2. Grashchenkov D.V., Chursova L.V. Strategiia razvitiia kompozitsionnykh i funktsional'nykh materialov [Development strategy of composite and functional materials]. Aviationsionnye materialy i tekhnologii [Aircraft materials and technologies]. 2012. No. 5. P. 231–242.
3. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozitsionnye materialy [Perspective high-temperature ceramic composite materials]. Rossiiskii khimicheskii zhurnal. 2010. Vol. LIV. No. 1. P. 20–24.
4. Nizovtsev V.E., Klimov D.A., Bortnikov A.D., Nizovtseva O.V. O perspektivakh primeneniia nanostrukturnykh geterofaznykh polifunktsional'nykh kompozitsionnykh materialov v aviadvigatelistroenii [About application

-
- perspective of the nanostructured heterophase polyfunctional composite materials in the aero-engine manufacturing]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2015. Vol. 14. No. 3. Part 1. P. 122–127.
5. Shkarupa I.L., Pliasunkova L.A., Shkarupa M.I., Klimov D.A. Issledovanie svoystv materialov na osnove karbida kremniia [Investigation of the materials properties based on silicon carbide]. Novye ogneupory. 2009. No. 6. Pp. 26–28.
 6. Williams P.A., Sakidia R., Perepezko J.H. Oxidation of ZrB₂-SiC Ultra-high Temperature Composites Over a Wide Range of SiC Content. J. Eur. Cer. Soc., 2012. Vol. 32. P. 3875–3883.
 7. Metodika ispytaniia obraztsov iz keramicheskogo kompozitsionnogo materiala na rastiazhenie pri temperature do 500°C [The tensile test procedure of ceramic composite material sample at temperatures up to 500°C]. Moscow: TsIAM, 2017. 12 p.
 8. Metodika ispytaniia obraztsov iz keramicheskogo kompozitsionnogo materiala na szhatie pri temperature do 500°C [The compression test procedure of ceramic composite material sample at temperatures up to 500°C]. Moscow: TsIAM, 2017. 13 p.
 9. Metodika ispytaniia obraztsov iz keramicheskogo kompozitsionnogo materiala na izgib pri temperature do 500°C [The bending test procedure of ceramic composite material sample at temperatures up to 500°C]. Moscow: TsIAM, 2017. 12 p.
 10. Programma ispytaniia obraztsov iz kompozitsionnykh materialov [Test program of composite materials samples]. Moscow: TsIAM, 2017. 7 p.
 11. ASTM C1275-16 «Standard Test Method for Monotonic Tensile Behavior of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Solid Rectangular Cross-Section Test Specimens at Ambient Temperature».
 12. ASTM C1424-15 «Standard Test Method for Monotonic Compressive Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature».
 13. ASTM C1161-13 «Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature».
 14. Spravochnik po kompozitsionnym materialam MO SShA «Keramicheskie kompozitsionnye materialy» [Handbook of composite materials US Department of Defense «Ceramic composite materials»] MIL-HDBK-17-5. Vol. 5.
 15. Tekhnicheskie usloviia 159500-011-86495092-2011. «Detali iz metallokeramomatrichnogo kompozita na osnove karbonitrida titana «Karboprom-15» [Specifications 159500-011-86495092-2011. «Parts from metal-ceramic matrix composite based on titanium carbonitride «Carboprom-15»]. Moscow, 2011. 8 p.
 16. Tekhnicheskie usloviia 159500-002-86495092-2010. «Detali iz metallokeramomatrichnogo kompozita na osnove karbonitrida titana «Karboprom-75» [Specifications 159500-011-86495092-2011. «Parts from metal-ceramic matrix composite based on titanium carbonitride «Carboprom-75»]. Moscow, 2010. 8 p.
-