

УДК 674.038

*Д.В. Севастьянов<sup>1</sup>, М.С. Дориомедов<sup>1</sup>, М.И. Дасковский<sup>1</sup>, С.Ю. Скрипачев<sup>1</sup>***БИОМОРФНЫЕ КОМПОЗИТЫ:  
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КЛАСС МАТЕРИАЛОВ (обзор)  
Часть 2. Механические свойства, область применения**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-61-69

*Выполнен анализ механических свойств биоморфных композитов. Показано, что свойства биоморфных материалов в аксиальном направлении превышают таковые в радиальном и тангенциальном направлении. Данный факт объясняется сохранением в композитах микроструктуры, характерной для исходной древесины. Обсуждены перспективы применения биоморфных композитов в различных отраслях промышленности, в частности, в качестве подложки катализаторов, брони, фильтрующих элементов, а также в медицине, радиоэлектронике, энергетике.*

**Ключевые слова:** биоморфные композиты, механические свойства, область применения биоморфных композитов, карбид кремния.

*D.V. Sevastyanov<sup>1</sup>, M.S. Doriomedov<sup>1</sup>, M.I. Daskovsky<sup>1</sup>, S.Yu. Skripachyov<sup>1</sup>***BIOMORPHIC COMPOSITES:  
A PROMISING CLASS OF MATERIALS (review)  
Part 2. Mechanical properties, application**

*Analysis of mechanical properties for biomorphic composites was performed. It was shown that properties in axial direction exceeded the ones in radial and tangential directions. This fact can be explained by the preservation of microstructure on going from a piece of wood to a biomorphic composite. Prospects for application of biomorphic composites in various industrial fields (as catalyst support, high-temperature gas filtration materials, armor materials as well as in medicine, radio electronics, and power engineering) were discussed.*

**Keywords:** biomorphic composites, mechanical properties, application area of biomorphic composites, silicon carbide.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Данная работа является продолжением предыдущей статьи, в которой приведены общие сведения о биоморфных композитах, история их разработки, а также методы получения, и посвящена анализу механических свойств и выявлению перспективных областей применения данного класса композиционных материалов.

**Механические свойства биоморфных композитов SiC/Si  
и пористого биоморфного карбида кремния**

В таблице суммированы механические свойства биоморфного SiC, а также биоморфных композитов SiC/Si при комнатной температуре. Как следует из данных таблицы, свойства биоморфных SiC материалов в аксиальном направлении превышают таковые в радиальном и тангенциальном направлении. Данный факт объясняется сохранением в композитах микроструктуры, характерной для исходной древесины.

В работе [1] показано, что механические свойства (особенно предел прочности при изгибе) биоморфных SiC материалов зависят не только от макроскопических параметров (плотность, объемная доля пор и/или кремния, распределение пор по размерам и т. п.), но и от особенностей микроструктуры исходной древесины.

Так, трещины чаще всего наблюдаются по годичным кольцам, лучам или группам пор, изначально присутствующим в исходной древесине [1, 2]. Механические свойства SiC/Si композитов повышаются с увеличением доли карбида кремния, а также с уменьшением пористости образца.

Механические свойства пористого биоморфного карбда кремния и композитов SiC/Si при комнатной температуре

Вид исходной древесины	Состав биоморфного материала	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Направление	$\sigma_{\text{в.в.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{сж.}}$ , МПа	E, ГПа	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$	Литература
Бамбук	SiC-C/Si, % (объемн.) SiC: 26,3±4,5 Si: 52,6±0,4 C: 20,6±1,5	2,44±0,07	-	Аксиальное	120-180	-	-	1,75	[3]
	SiC/Si, % (по массе) Si: 37								
Бук	SiC/Si, % (по массе) Si: 37	2,57	3 (открытая)	Аксиальное	90-130	438	220-280	-	[1]
	SiC/Si	2,10	-	Аксиальное	228	1080	-	2	[4]
Береза	SiC/Si, % (по массе) Si: 37	2,50	-	Аксиальное	216	330-480	115-130	1,1-1,4	[5]
	SiC	Высокопористый	~53	Аксиальное	-	~24	10-27	0,5-0,7	[5]
Береза	SiC/Si, % (объемн.) SiC: 45,9±1,2 Si: 54,0±1,4	2,74±0,03	-	Аксиальное	210-320	-	-	2,4-4,3	[3]
	SiC/Si								
Бубинга	SiC/Si	2,60	-	Аксиальное	226	1410	-	4,2	[4]
	SiC/Si	2,63	-	Аксиальное	290	1420	170±10	~2,7	[7]
Эвкалипт	SiC/Si	2,63	-	Аксиальное	290	1420	170±10	~2,7	[7]
	SiC	Высокопористый	45-53	Аксиальное	-	160-190	35-110	0,7-1,22	[5]
Махагониевое дерево	SiC	Высокопористый	45-53	Радиальное	-	57-75	15-21	0,46-0,6	[5]
	SiC/Si	2,0±0,3	45-53	Тангенциальное	-	31-35	12-20	-	[5]
Клен	SiC/Si, % (по массе) Si: 23	2,58	3 (открытая)	Аксиальное	144±13	-	178±18	2,0±0,2	[8]
	SiC/Si, % (по массе) Si: 23	2,27±0,07	-	Аксиальное	344±58	-	250±23	2,6±0,2	[8]
Сосна	SiC/Si, % (по массе) Si: 50	2,84	2,2	Аксиальное	200	-	-	-	[9]
	SiC/Si, % (по массе) Si: 50	2,84	2,2	Аксиальное	300±24	-	-	-	[10]
Тополь	SiC/Si, % (объемн.) SiC: 31,9±3,5 Si: 68,1±0,7	2,62±0,05	-	Аксиальное	175-225	-	-	1,8-4,1	[3]
	SiC/Si, % (по массе) Si: 50								
Тополь	SiC	Высокопористый	59-64	Радиальное	50-65	-	150-200	-	[1]
	SiC	Высокопористый	64-65	Аксиальное	-	135-250	30-76	0,8-1,1	[5]
			58-60	Радиальное	-	12	1	-	[5]
				Тангенциальное	-	16-24	6-8	-	[5]

Окончание таблицы

Вид исходной древесины	Состав биоморфного материала	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Направление	$\sigma_{з.в.}$ МПа	$\sigma_{з.сж.}$ МПа	$E$ , ГПа	$K_{1с}$ МПа $\sqrt{м}$	Литература
Дуб	SiC	Высокопористый	47-50	Аксиальное	-	220-270	28-60	0,9-1,8	[5]
			44-46	Радиальное	-	8-18	5	-	
			44-47	Тангенциальное	-	5-28	8	-	
Дуб	SiC/Si, % (по массе) Si: 27	2,16	8 (открытая)	Аксиальное	100-120	-	160-210	-	[1]
			-	Радиальное	30-60	-	150-200	-	
			-	Аксиальное	-	-	216,93	-	
Сипель	SiC	Высокопористый	-	Аксиальное	-	-	144,08	-	[11]
			-	Аксиальное	-	-	15-22	-	
			54-59	Аксиальное	-	50-127	15-22	-	
Сипель	$\beta$ -SiC/Si	2,04	55-59	Радиальное	-	-	6-14	-	[5]
			54-57	Тангенциальное	-	13-18	7-10	-	
			-	Аксиальное	-	-	193	-	
ДВП средней плотности	SiC/Si, % (объемн.) SiC: 42,8±1,2 Si: 57,2±0,9	2,70±0,02	-	-	125-245	-	-	2,4-3,2	[3]
			-	-	-	-	-	-	
			-	-	-	-	-	-	
Липа	SiC/Si, % (объемн.) Si: ~30	2,60	-	-	-	-	261	-	[13]
			-	-	-	-	152	-	
			2,26	-	-	133±16	-	-	
Береза плосколистная	SiC/Si	-	-	-	-	-	-	-	[14]
			-	-	-	107,6	1,004	-	
			-	Аксиальное	31,4	-	-	-	
Береза плосколистная	SiC/Si (пиролиз прессованного порошка (35 мкм)+инфильтрация Si)	3,01	-	-	388±36	-	364±22	3,5±0,3	[16]
			-	-	-	-	-	-	
			2,87	-	Аксиальное	277±39	-	314±20	
Эвкалипт	$\beta$ -SiC/Si	2,28	-	-	-	-	235,12	-	[11]
			-	-	-	-	182,75	-	
			2,00	-	Аксиальное	-	-	-	
Павловния	SiC/Si, % (по массе) SiC: 63,4 Si: 34,7 C: 1,9	2,36	-	-	-	~1100	-	-	[17]
			-	-	-	-	-	-	
			-	Аксиальное	-	-	-	-	
ДВП высокой плотности	SiC/Si, % (по массе) SiC: 79,4 Si: 16,6 C: 4,0	2,95	-	-	-	~2000	-	-	[17]
			-	-	-	-	-	-	
			-	-	-	-	-	-	

### Применение биоморфных композитов на основе SiC

Биоморфная керамика на основе карбида кремния обладает уникальной комбинацией свойств (экономичность процесса производства, возможность варьирования характеристик с целью соответствия требованиям конкретного приложения, возможность получения изделий сложной формы, направленная пористость), которая позволяет применять данные материалы в многочисленных приложениях.

#### *Применение в качестве подложки катализаторов*

Благодаря большой площади поверхности и удлиненной конфигурации пор биоморфный карбид кремния может применяться в качестве подложки катализаторов, в особенности катализаторов высокотемпературных процессов. Так, в работе [18] предложен катализатор процесса окисления метана до синтез-газа. Процесс проводят в кварцевом реакторе с неподвижным слоем при температуре 800°C. В качестве активного вещества катализатора применяют никель, размещенный на подложке из биоморфного карбида кремния. С целью снижения потерь никеля при проведении процесса, для модифицирования поверхности карбида кремния применяют Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Катализатор Ni/SiC или Ni/SiC–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> готовят методом пропитки.

В работе [19] описан новый биоморфный Ni/SiC катализатор, который повышает эффективность конверсии биомассы в водород. В качестве подложки применяют биоморфный карбид кремния на основе клена серого.

В работе [20] предложен катализатор сжигания водорода, активным веществом которого является платина, а в качестве подложки выступает биоморфный карбид кремния на основе трех видов древесины: пихта белая, сапелль, ДВП средней плотности.

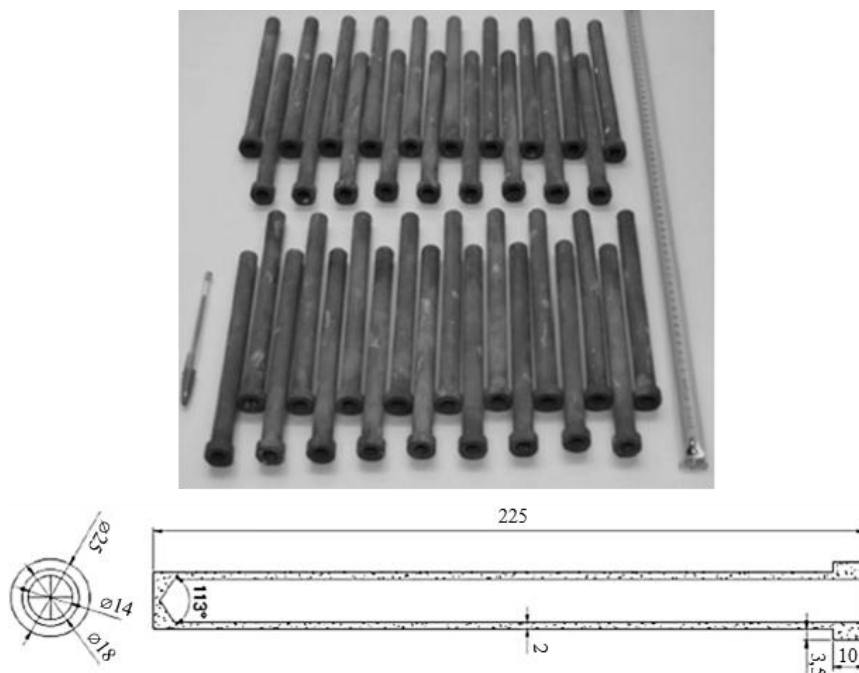
Кроме того, существует ряд работ, посвященных применению монолитов на основе биоморфного SiC в комбинации с цеолитами, предназначенных для сорбции и катализа [21–24].

#### *Применение в качестве фильтрующих элементов*

Пористый биоморфный карбид кремния также может применяться в качестве высокотемпературного фильтрующего элемента при очистке горячих газов (в частности, при газификации угля с получением синтез-газа), поскольку он характеризуется относительно высокой газопроницаемостью при комнатной температуре ( $10^{-12}$ – $10^{-13}$  м<sup>2</sup>), которая зависит от пористости (45–72%) [25].

Как следует из результатов, представленных в работе [26], величины предела прочности при изгибе пористого SiC (пористость 43–57%) на основе ДВП средней плотности при комнатной температуре (93±15 МПа) и при 800°C (59±13 МПа) делают данную керамику перспективной для применения в качестве фильтрующего элемента в высокотемпературных фильтрах.

В работе [27] представлены результаты испытаний опытных образцов свечных фильтрующих элементов (см. рисунок), изготовленных из пористого карбида кремния на основе ДВП средней плотности и предназначенных для очистки горячих газов (800°C). Испытания проводились на опытно-промышленной установке по фильтрации при высоких температуре и давлении. Определены оптимальные условия фильтрации. Показано, что изготовленные опытные образцы применимы для очистки горячих газов в условиях, типовых для процесса сжигания и газификации угля.



Опытные образцы свечных фильтрующих элементов из биоморфного карбида кремния [26]

#### *Применение в медицине*

Уникальная ячеистая микроструктура биоморфных SiC материалов на основе древесины, включающая взаимосвязанную пористость, делает такие материалы подходящими для использования в качестве медицинских имплантов (в том числе дентальных имплантов), в особенности при замене кортикального вещества кости, где традиционно применяемые биологически активные стекла и изотропные пористые материалы не могут быть использованы вследствие недостатка механической прочности [2].

В работах [28, 29] показано, что биоморфный карбид кремния является таким же нецитотоксичным и биосовместимым, как широко применяемый в стоматологии титановый сплав Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V.

Методы увеличения биосовместимости биоморфного карбида кремния включают нанесение различных покрытий [30], химическую функционализацию и биоактивацию [31] и др.

Подробная информация о применении биоморфного карбида кремния в медицине приведена в монографии [32].

#### *Применение в качестве брони*

В работах [33–35] рассматривается возможность применения биоморфного карбида кремния и биоморфных SiC/Si композитов в качестве материала керамической брони. Так, в статье [33] сравнивались защитные характеристики образцов брони на основе биоморфного SiC/Si композита (получен из ДВП средней плотности) и на основе двух C/C–SiC композитов различного состава по отношению к бронебойной пуле 7,62×51 мм. Показано, что образец брони на основе биоморфного SiC/Si композита (~79% (объемн.) SiC и ~20% (объемн.) Si) характеризуется лучшими показателями в случае одиночного попадания (предельная баллистическая скорость 850 м/с, поверхностная плотность 50 кг/м<sup>2</sup>), в то время как C/C–SiC композиты обладают преимуществом при многократных попаданиях благодаря значительно меньшей площади разрушения.

В работе [34] представлены образцы брони на основе биоморфных SiC/Si композитов и биоморфных SiC/Si композитов, армированных короткими углеродными волокнами (C/Si–SiC композиты). Введение углеродных волокон в SiC/Si композиты осуществляли с целью повышения пластичности и стойкости к повреждениям. Баллистические характеристики проверяли на пластинах брони размером 100×100×9 мм (на подложке) по отношению к бронебойной пуле 7,62×51 мм. Исследовано восемь образцов различного состава, полученных на основе ДВП средней плотности (два образца), древесных опилок (измельченные древесные опилки+фенольная смола – три образца) и активированного угля (мелкодисперсный активированный уголь+фенольная смола – три образца). Короткие углеродные волокна вводили в образцы на основе древесных опилок (один образец) и активированного угля (два образца). Исследованные биоморфные материалы характеризуются плотностью в диапазоне 2,6–3,0 г/см<sup>3</sup>, открытой пористостью в диапазоне 0–0,24%. Содержание остаточного углерода во всех образцах не превышает 6%, содержание SiC в образцах составляет 75% (объемн.) и более. Предел прочности при изгибе для образцов находится главным образом в диапазоне значений 160–210 МПа (в зависимости от состава образца), модуль упругости – в диапазоне значений 300–370 ГПа. Найдено, что броня из биоморфных композитов SiC/Si обладает хорошими защитными свойствами только при одиночном попадании, в то время как броня на основе C/Si–SiC композитов характеризуется повышенной эксплуатационной живучестью при многократных попаданиях.

В работе [35] изучены характеристики брони из биоморфного композита SiC/Si, изготовленного на основе ДВП средней плотности, по отношению к бронебойным патронам NATO Ball FMJ 7,62×51 мм, R LPS 7,62×54 мм, AP M2 7,62×63 мм. Плотность SiC/Si композита составляет 2,8 г/см<sup>3</sup>, содержание SiC: 60–65% (объемн.), содержание Si: 30–35% (объемн.), содержание остаточного углерода – менее 3% (объемн.). Модуль упругости для SiC/Si композита составляет 290 ГПа, предел прочности при изгибе 230 МПа,  $K_{1c}=2,3$  МПа√м. Для исследований применяли образцы размером 100×100 мм и толщиной 9,5; 7,5 и 6 мм. Найдено, что синтезированный биоморфный SiC/Si композит обладает удовлетворительными защитными характеристиками по отношению ко всем трем видам бронебойных патронов.

#### *Применение в радиоэлектронике*

В работе [36] рассмотрены свойства и возможные области применения керамических материалов AlN, BeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC/Si в конструкциях радиоэлектронных устройств. Приводя примеры применения биоморфных SiC/Si композитов, авторы [36] утверждают, что высокая теплопроводность карбида кремния может обеспечить эффективный отвод тепла. Это свойство в сочетании с высокими допустимыми рабочими температурами и большими скоростями насыщения носителей делает SiC-приборы весьма перспективными для использования в силовой электронике. Наличие высокого пробивного напряжения в сочетании с высокой теплопроводностью дает возможность использовать SiC-корпуса в электронике, которые могут обеспечить надежную изоляцию и увеличить эффективность отвода тепла от нагреваемых модулей радиоэлектронных средств. Биоморфная керамика SiC/Si может использоваться в качестве легких сверхпрочных материалов в приборостроении для изготовления корпусов радиоэлектронных модулей. Данное применение позволило бы увеличить срок службы приборов при эксплуатации их в условиях больших механических и температурных нагрузок. Это особенно актуально при проектировании электронных бортовых систем в авиационной и автомобильной промышленности.

*Применение в энергетике*

В диссертационной работе [37] сообщается о применении в ПАО «НПО Сатурн» высокотемпературных термозондов из биоморфного SiC/Si композита с газоплотным SiC-покрытием для измерения температуры газового потока при стендовых испытаниях камер сгорания газотурбинной техники. Термозонд представляет собой вставку в виде цилиндрической трубки с размещенной в ней термопарой. На одном конце вставки имеется осевая камера торможения и отводящие каналы в области спая термопары, на противоположном конце вставки – фланец для фиксации в водоохлаждаемом корпусе измерителя температуры. В акте о внедрении в производство подчеркивается, что применение биоморфных SiC/Si композитов в качестве материала вставки позволяет увеличить диапазон измеряемых температур до 1750°C, при кратковременном повышении до 2000°C. Карбидокремниевое покрытие обеспечивает термоокислительную стойкость при сохранении целостности покрытия в условиях испытаний. Кроме того, покрытие обеспечивает повышенные механические характеристики за счет снижения вклада поверхностных дефектов при изгибе, сжатии и растяжении, которые испытывает вставка в процессе работы термозонда.

В работах [38–44] рассматривается возможность применения биоморфных SiC/Si композитов и карбида кремния в пористых керамических горелках и высокотемпературных теплообменниках.

**Заключение**

Отмеченное в опубликованной ранее первой части данного исследования ограничение по габаритным размерам можно дополнить вторым важным ограничением, которое заключается в недостаточном уровне механических свойств (пределы прочности при изгибе и сжатии) биоморфной керамики, что связано с недостаточной связностью между ячейками каркаса (бывшими клеточными стенками в исходной древесине), а также между зернами внутри ячейки. Одним из путей решения данной проблемы является модификация исходной древесины.

Так, в работе [16] для получения SiC/Si композита осуществляли пиролиз прессованного мелкодисперсного березового порошка (средний диаметр частиц 35 мкм) с последующей инфильтрацией кремния в углеродную преформу. Как следует из таблицы (см. ранее), предел прочности при изгибе и модуль упругости полученного SiC/Si композита существенно выше аналогичных величин для композита, полученного пиролизом цельной древесины. Более того, данные величины являются максимальными по всему спектру исследованных в данном обзоре работ.

Следует также отметить, что в сравнении с широко используемыми в последние десятилетия C/C и C/SiC композитами, биоморфные материалы на основе древесины характеризуются более низким уровнем механических свойств, но при этом обладают гибкостью в подборе требуемой микроструктуры (путем выбора исходной древесины) и оптимальным отношением «прочность–плотность».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Greil P., Lifka T., Kaindl A. Biomorph cellular silicon carbide ceramics from wood: II. Mechanical properties // Journal of the European Ceramic Society. 1998. Vol. 18. No. 14. P. 1975–1983.
2. Ramirez-Rico J., Martinez-Fernandez J., Singh M. Biomorph ceramics from wood-derived precursors // International Materials Reviews. 2017. Vol. 62. No. 8. P. 465–485.
3. Qiao G., Ma R., Cai N., Zhang C., Jin. Z. Mechanical properties and microstructure of Si/SiC materials derived from native wood. // Materials Science and Engineering A. 2002. Vol. 323. No. 1–2. P. 301–305.

4. Presas M., Pastor J.Y., Llorca J. et al. Mechanical behavior of biomorphic Si/SiC porous composites. // *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 53. No. 10. P. 1175–1180.
5. Kaul V.S., Faber K.T., Sepulveda R. et al. Precursor selection and its role in the mechanical properties of porous SiC derived from wood // *Materials Science and Engineering A*. 2006. Vol. 428. No. 1–2. P. 225–232.
6. Singh M., Martinez-Fernandez J., De Arellano-Lopez A.R. Environmentally conscious ceramics (ecoceramics) from natural wood precursors // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2003. Vol. 7. P. 247–254.
7. Presas M., Pastor J.Y., Llorca J. et al. Microstructure and fracture properties of biomorphic SiC // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2006. Vol. 24. No. 1–2. P. 49–54.
8. Singh M., Salem J.A. Mechanical properties and microstructure of biomorphic silicon carbide ceramics fabricated from wood precursors // *Journal of the European Ceramic Society*. 2002. Vol. 22. No. 14–15. P. 2709–2717.
9. Sieber H., Hoffmann C., Kaendl A., Greil P. Biomorphic cellular ceramics // *Advanced Engineering Materials*. 2000. Vol. 2. No. 3. P. 105–109.
10. Park H.S., Jang J.J., Lee K.H. et al. Effects of microstructure on flexural strength of biomorphic C/SiC composites // *International Journal of Fracture*. 2008. Vol. 151. P. 233–245.
11. Кардашев Б.К., Нефагин А.С., Смирнов Б.И. и др. Упругие и неупругие свойства биоморфных композитов SiC/Si и биоморфных SiC на основе дуба и эвкалипта // *Физика твердого тела*, 2006. Т. 48. №9. С. 1617–1621.
12. Кардашев Б.К., Орлова Т.С., Смирнов Б.И. и др. Модуль Юнга и внутреннее трение биоморфного композита SiC/Si на основе биоматрицы дерева сапели // *Физика твердого тела*. 2009. Т. 51. №4. С. 709–712.
13. Кардашев Б.К., Орлова Т.С., Смирнов Б.И. и др. Упругость и неупругость биоморфных углерода, карбида кремния и композита SiC/Si, полученных на основе микродревесной фибры MDF // *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52. №10. С. 1937–1942.
14. Bautista M.A., Quispe Cancapa J., Martinez-Fernandez J. et al. Microstructural and mechanical evaluation of porous biomorphic silicon carbide for high temperature filtering applications // *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31. No. 7. P. 1325–1332.
15. Gordic M.V., Babic B.M., Static J.M. et al. Mechanical properties of biomorphic silicon carbide ceramics // *Science of Sintering*. 2011. Vol. 43. No. 2. P. 215–223.
16. Yan Z., Liu J., Zhang J. et al. Biomorphic silicon/silicon carbide ceramics from birch powder // *Ceramics International*. 2011. Vol. 37. No. 3. P. 725–730.
17. Lee D.J., Jang J.J., Park H.S. et al. Fabrication of biomorphic SiC composites using wood preforms with different structures // *Ceramics International*. 2012. Vol. 38. No. 4. P. 3089–3095.
18. Wang Q., Sun W.-Z., Jin G.-Q. et al. Biomorphic SiC pellets as catalyst support for partial oxidation of methane to syngas // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. Vol. 79. No. 4. P. 307–312.
19. Church T.L., Fallani S., Liu J. et al. Novel biomorphic Ni/SiC catalysts that enhance cellulose conversion to hydrogen // *Catalysis Today*. 2012. Vol. 190. No. 1. P. 98–106.
20. Arzac G.M., Rico-Ramirez J., Gutierrez-Pardo A. et al. Monolithic supports based on biomorphic SiC for the catalytic combustion of hydrogen // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. P. 66373–66384.
21. Zampieri A., Sieber H., Selvam T. Biomorphic cellular SiSiC/Zeolite ceramic composites: from rattan palm to bioinspired structured monoliths for catalysis and sorption // *Advanced Materials*. 2005. Vol. 17. No. 3. P. 344–349.
22. Zampieri A., Kullmann S., Selvam T. et al. Bioinspired rattan-derived SiSiC/Zeolite monoliths: preparation and characterization // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2006. Vol. 90. No. 1–3. P. 162–174.
23. Rambo C.R., Junkes J., Sieber H., Hotza D. Biomorphic ceramics as porous supports for zeolite coating // *Advances in Science and Technology*. 2006. Vol. 45. P. 819–828.
24. Wang Y.-Y., Jin G.-Q., Guo X.-Y. Growth of ZSM-5 coating on biomorphic porous silicon carbide derived from durra // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2009. Vol. 118. No. 1–3. P. 302–306.

25. Gomez-Martin A., Orihuela M.P., Becerra J.A. et al. Permeability and mechanical integrity of porous biomorphic SiC ceramics for application as hot-gas filters // *Materials and Design*. 2016. Vol. 107. No. 5. P. 450–460.
26. Bautista M.A., Quispe Cancapa J., Martinez-Fernandez J. et al. Microstructural and mechanical evaluation of porous biomorphic silicon carbide for high temperature filtering applications // *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31. No. 7. P. 1325–1332.
27. Alonso-Farinas B., Lupion M., Rodriguez-Galan M., Martinez-Fernandez J. New candle prototype for hot gas filtration industrial applications // *Fuel*. 2013. Vol. 114. P. 120–127.
28. Gonzalez P., Borrajo J.P., Serra J. et al. A new generation of bio-derived ceramic materials for medical applications // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2009. Vol. 88A. No. 3. P. 807–813.
29. Gonzalez P., Borrajo J.P., Serra J. et al. Extensive studies on biomorphic SiC ceramics properties for medical applications // *Key Engineering Materials*. 2004. Vol. 254–256. P. 1029–1032.
30. Borrajo J.P., Serra J., Liste S. et al. Pulsed laser deposition of hydroxylapatite thin films on biomorphic silicon carbide ceramics // *Applied Surface Science*. 2005. Vol. 248. No. 1–4. P. 355–359.
31. Will J., Hoppe A., Muller F.A. et al. Bioactivation of biomorphous silicon carbide bone implants // *Acta Biomaterialia*. 2010. Vol. 6. No. 12. P. 4488–4494.
32. Mahmoodi M., Ghazanfari L. Fundamentals of biomedical applications of biomorphic SiC // *Properties and Applications of Silicon Carbide*. 2011. P. 297–344.
33. Heidenreich B., Krenkel W., Lexow B. Development of CMC-materials for lightweight armor // *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. 2003. Vol. 24. P. 375–381.
34. Heidenreich B., Crippa M., Voggenreiter H. Development of biomorphic SiSiC- and C/SiSiC-materials for lightweight armor // *Advances in Ceramics Armor VI*. 2010. Vol. 31. Issue 5. P. 207–220.
35. Heidenreich B., Gahr M., Medvedovski E. Biomorph reaction bonded silicon carbide ceramics for armor applications // *Ceramic Transactions*. 2006. Vol. 178. P. 45–53.
36. Заенчковский П.В., Макаров О.Ю. Перспективы применения керамических материалов в радиоэлектронной промышленности // *Вестник ВГТУ*. 2009. Т. 5. №7. С. 47–50.
37. Ершов А.Е. Получение пространственно-упорядоченных биоморфных композитов, их свойства и применение: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Черноголовка, 2016. 22 с.
38. Heidenreich B., Schmidt J., Denis S. et al. CMC materials and biomorphic SiSiC for energy applications // *Ceramic Transactions*. 2010. Vol. 210. P. 115–123.
39. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
40. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
41. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.07.2018).
42. Оспенникова О.Г., Каблов Е.Н., Шункин В.Н. Разработка и исследование пластификатора для модельных композиций на основе природных восков // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. №3. С. 68–70.
43. Гращенков Д.В., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-318-328.
44. Каблов Д.Е., Симонов В.Н., Алексеева М.С. Исследование строения фильтра и особенностей фильтрации примесей пористой керамикой из оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 47–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-47-53.