

**ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ КОМПОЗИЦИИ  
АЛМАЗ - КАРБИД КРЕМНИЯ – НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

(получена редакцией 27.06.2015, принята в печать 30.06.2015)

**Гордеев С.К<sup>1</sup>, Ежов А.Ю., Каримбаев Т.Д., Корчагина С.Б.<sup>1</sup>, Мезенцев М.А.**

*ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», г. Москва,*

*<sup>1</sup> ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов», г. Санкт-Петербург.*

Описан процесс получения дисперсно-упрочненного композиционного материала (ДУКМ) алмаз – карбид кремния, представляющего собой новую группу сверхтвердых композиционных материалов. Особенностью технологии, отличающейся от получения известных сверхтвердых материалов (алмаз, кубический нитрид бора), является возможность создания изделий сложных форм и больших размеров. Эта особенность позволяет рассматривать ДУКМ алмаз/SiC, как особый вид инженерной керамики, сочетающий в себе уникальные свойства по износостойкости, жесткости, теплопроводности, температурному расширению.

**Ключевые слова:** алмаз, карбид кремния, композиты с упрочняющими частицами, сопловая лопатка, газовая турбина, структура, прочность, модуль Юнга.

**NEW MATERIALS FOR MACHINERY ENGINEERING: SILICON CARBIDE REINFORCED WITH DIAMOND PARTICLES**

A process of obtaining composites containing silicon carbide matrix and diamond particles ( $C_p/SiC$ ) is disclosed. The process differs from well known fabrication technologies of producing super materials, such as diamond or cubic boron nitride by providing a possibility to make elements of both complicated shapes and large sizes. This allows consider a new type of the composite as structured material of unique combination of high wear resistance, rigidity, thermal conductivity and low thermal expansion.

**Key words:** diamond, silicon carbide, particulate composite, microstructure, strength, Young's modulus, gas turbine, vanes.

**1. Введение**

Карбиды рассматриваются как перспективные материалы в алмаз содержащих композиционных материалах инструментального назначения [1, 2]. В отличие от органической, металлической, керамической матриц, карбидные матрицы обладают высокой твердостью и повышенной износостойкостью. Наиболее часто в качестве карбидной матрицы используют твердые сплавы типа ВК на основе карбида вольфрама [1]. Разработанные в ИСМ АН УССР материалы «Славутич», «Твесал» состоят из крупных (500 мкм) алмазных зерен высокого качества в матрице из WC-Со. Они обладают высокой твердостью и прочностью и успешно используются в условиях интенсивного абразивного износа.

Особое место среди карбидных материалов занимают карбидокремниевые керамики, как спеченные (SiC), так и реакционно-связанные (Si/SiC), обладающие низкой плотностью, хорошими механическими свойствами и износостойкостью, низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), устойчивостью в окислительной среде при высоких температурах. Дальнейшее улучшение свойств SiC-керамик возможно при их армировании нитевидными кристаллами и непрерывными волокнами [2].

Анализ свойств SiC-керамик и других материалов показывает, что одной из наилучших пар для SiC-керамик является алмаз (Табл. 1). Последний обладает механическими и теплофизическими свой-

ствами, заметно превосходящими карбид кремния. Представляется, что армирование SiC-керамик алмазными частицами приведет к получению композиции с уникальным сочетанием механических, физических и эксплуатационных свойств и обеспечит их эффективное применение в качестве материалов конструкционного назначения.

Таблица 1

Свойства карбидных керамик и алмаза [3]

	SiC	Si/SiC	Алмаз
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,0	3,1	3.5
Модуль упругости, ГПа	350	400	1100
Твердость, ГПа	25	30	100
Теплопроводность, Вт/м/К	80	150	500-2000
ТКЛР, 10 <sup>-6</sup> /К	4	4	1.5

Однако, высокая температура переработки карбида кремния в изделия и склонность алмаза при высоких температурах, превышающих 1200°С, к графитации (превращению в более термодинамически стабильную фазу – графит [3]) являются определенным барьером при создании композиции алмаз-карбид кремния методом спекания. Исключить графитацию алмаза удается [4] применением высоких давлений ( $P = 8.5$  ГПа) и температур при создании композиции алмаз-карбид кремния. В этих случаях композиция имеет структуру взаимопроникающих каркасов алмаза и карбида кремния с частичным спеканием исходных алмазных зерен. Эти композиционные материалы обладают хорошими механическими свойствами, термостойкостью, износостойкостью. В то же время, использование камер высокого давления ограничивает ассортимент получаемых продуктов, ограничивая возможность изготовления деталей больших габаритов и сложных форм и, следовательно, их применение в машиностроении.

В ЦНИИМ разработан альтернативный метод получения тугоплавких и композиционных материалов и изделий из них требуемого размера и формы путём реализации химических реакций в объеме заготовки (Рис.1) [5]. Метод состоит в том, что уже на стадии изготовления заготовки из исходных веществ, как правило, порошков, формуется изделие требуемой формы. После чего состав, структура исходной заготовки материала преобразуется посредством химических реакций. Правильный выбор химической реакции позволяет реализовать неизменность и формы и размеров заготовки и, наконец, получение конечного изделия требуемого состава и структуры. Схема получения материала в виде изделия представлена на рис. 1.

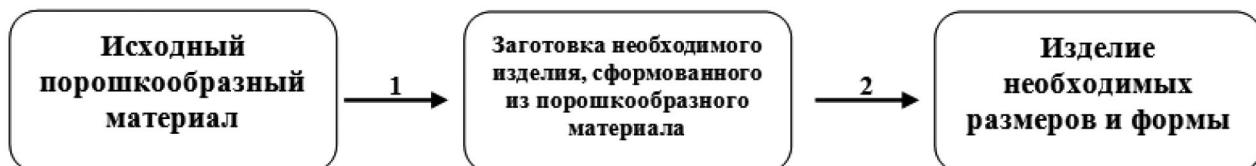


Рис. 1. Стадии процесса: 1 - приданье заготовке необходимых формы и размеров, 2 - осуществление химических реакций, не изменяющих форму и размеры, но преобразующих состав и строение материала заготовки

Fig. 1. Two main stages of fabrication technology: 1- Shaping the blank to provide necessary sizes; 2- chemical reaction, which produce a microstructure of the future material

Использование описанного подхода актуально при получении сверхтвердых материалов. Высокая твердость и износостойкость крайне затрудняют механическую обработку конечных изделий. Поэтому приданье формы изделию на ранних стадиях технологического процесса и последующее преобразование состава и структуры материала внутри заготовки является не только перспективным, но и единственно возможным.

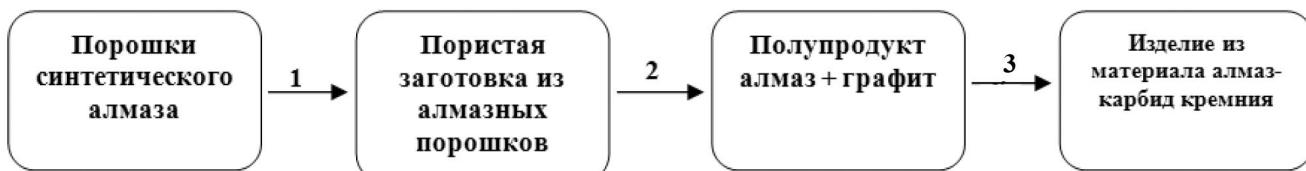
Ниже представлены результаты по получению дисперсно-упрочненного композиционного материала (ДУКМ) алмаз - карбид кремния за счет химической реакции между кремнием и углеродом непосред-

ственно в объеме заготовки. При этом весь процесс создания материала осуществляется при давлении не выше атмосферного и обеспечивает получение изделий сложных форм и больших размеров с уникальными свойствами, что демонстрируется изготавлением основных деталей соплового аппарата (СА).

## **2. Схема получения дисперсно-упрочненного композиционного материала алмаз - карбид кремния**

В работе исходными материалами служили коммерческие марки порошков алмаза ACM 5/3, ACM 7/5, ACM 14/10, ACM 28/20, ACM 40/28 AC6 63/50 по ГОСТ 9206-80, имеющих размеры частиц, соответственно, 3-5, 5-7, 10-14, 20-28, 28-40 и 50-63 мкм. Использовался чистый кремний с содержанием примесей менее 0,08 % масс.

Получение ДУКМ осуществляли по схеме, приведенной на Рис. 2 и состоящей из холодного формования заготовок из алмазных порошков (1), термообработку заготовок (2) и пропитку жидким кремнием (3). Формование порошков в заготовки (диаметром 20 и высотой 2 мм) осуществлялось «в сухую» или с добавлением временного связующего (10% от массы алмаза 25%-ного спиртового раствора фенолформальдегидной смолы) при давлении 200 МПа. Формование (стадия 1) это обычный для технологии тугоплавких материалов процесс придания формы и размеров конечному изделию при наибольшем объемном содержании алмазных частиц. Термообработку и пропитку жидким кремнием (2 и 3 стадии) осуществляли в вакуумной печи при давлении 0,1 мм рт. ст. и температуре 1550 °C. Рентгеноструктурные исследования выполнялись на дифрактометре ДРОН-3 с использованием рентгеновской трубки с медным катодом. Структурные исследования поверхности проводились электронным микроскопом JEOL-840.



*Рис. 2. Стадии процесса: 1 - Формование заготовки, 2 - Термообработка заготовки, 3 - Пропитка жидким кремнием*

*Fig. 2. Details of the three stages of the fabrication technology: 1- Making a blank, 2- Heat treatment of the blank, 3- Impregnation of the blank with liquid silicon*

**2.1. Особенности термообработки и пропитки.** Используя алмаз в качестве сырья, следует учесть его относительно низкую термическую устойчивость. При температурах выше 1200 °C происходит процесс частичной графитации алмаза, т.е. его превращение в более термодинамически стабильную графитоподобную структуру [6]. Этот процесс начинается с поверхности зерна и постепенно проникает вглубь. Повышение температуры интенсифицирует процесс графитации алмаза. Так как пропитка образцов кремнием осуществляется при температурах выше 1500 °C, то необходимо учесть, что в ходе его нагрева и изотермической выдержки значительная доля алмаза преобразуется в графитоподобную структуру. Об этом свидетельствуют результаты рентгеноструктурного анализа заготовок, изготовленных из алмазного порошка и термообработанных при 1550 °C.

Последующая пропитка термообработанных заготовок кремнем приводит к преобразованию образовавшегося графитоподобного углерода в карбид кремния. Действительно, рентгеноструктурные исследования показывают наличие в составе пропитанных кремнем материалов алмаза карбида кремния ( $\beta$ -SiC) и кремния. При этом присутствие графитоподобного углерода и других фаз не обнаружено. Анализируя фазовый состав ДУКМ, можно аналитически [5] получить зависимость его плотности  $\rho$  от плотностей ( $\rho_C$ ,  $\rho_{SiC}$ ,  $\rho_{Si}$ ) его компонентов

$$\rho = \rho_C \Phi_C + \rho_{SiC} \Phi_{SiC} + \rho_{Si} \Phi_{Si}. \quad (1)$$

где  $\Phi_C$ ,  $\Phi_{SiC}$  и  $\Phi_{Si}$  – объёмное содержание алмаза, карбида кремния и кремния соответственно; при этом  $\Phi_C$ ,  $\Phi_{SiC}$  и  $\Phi_{Si}$  зависят от параметра  $\alpha$ , характеризующего долю алмаза, которая превратилась в графитоподобный углерод, а затем и в карбид кремния.

Равенство (1) и соотношения, использованные при его получении, позволяют проследить ход изменения состава ДУКМ в зависимости от параметра  $\alpha$ . Анализ показывает, что существуют предельные значения степени превращения алмаза в ходе процесса, которые накладывают ограничения на условия реализации способа получения материала. Эти предельные значения, соответствующие  $\Phi_{Si} = 0$ , зависят от пористости заготовки. Очевидно, для осуществления химической реакции карбиообразования во всем объеме и получения беспористых материалов, не содержащих графитоподобный углерод, необходимо обеспечить избыток кремния в нем, т.е.  $\Phi_{Si} > 0$ . Оценки с использованием (1) показывают, что для заготовки алмаза с пористостью 50% теоретически допустимо участие в процессе образования карбида кремния 38 % алмаза, тогда как при пористости 30% возможно преобразование только 16% алмаза.

В Табл. 2 представлены некоторые свойства ДУКМ, полученных из порошков синтетических алмазов различной дисперсности. Можно видеть, что с увеличением размера алмазных частиц наблюдается снижение плотности материала. Объяснением этому могут служить представленные в таблице результаты по составу конечного продукта. Так в материалах, полученных из порошков алмазов с размерами частиц 3-10 мкм, основной фазой является карбид кремния. Малый размер частиц алмаза приводит к интенсивному протеканию процессов графитации и последующего формирования карбида кремния. Степень превращения алмаза в карбид кремния в ходе реализованного метода достигает 27-36%. При использовании порошков алмаза с частицами 10-40 мкм содержание карбида кремния в полученном материале ниже, чем в предыдущей группе. Одновременно, в этих же материалах содержится больше кремния. Именно его более низкая (чем у карбида кремния) плотность является причиной снижения плотности материалов с увеличением размеров исходных частиц алмаза. Наибольшее содержание кремния в образцах ДУКМ, изготовленных из крупных зерен (50-63 мкм). Степень превращения алмаза в карбид в этом случае наименьшая - не превышает 7%.

Таблица 2

**Плотность и состав композиционных материалов, полученных с использованием алмазных частиц различных размеров**

Марка исходного алмаза	Размер частиц, мкм	Объемное содержание алмаза в заготовке, %об	Плотность ДУКМ, г/см <sup>3</sup>	Состав, % об			Параметр $\alpha$
				Алмаз	Карбид кремния	Кремний	
ACM 5/3	3-5	51	3.36	32.6	67.0	0.4	0.36
ACM 10/7	7-10	54	3.26	39.4	53.2	7.4	0.27
ACM 14/10	10-14	54	3.22	41.6	45.3	13.2	0.23
ACM 28/20	20-28	55	3.18	45.0	36.3	18.7	0.18
ACM 40/28	28-40	54	3.13	46.0	29.0	25.0	0.15
AC6 63/50	50-63	58	3.10	53.8	15.4	30.8	0.07

*Примечание:* Состав материалов рассчитан с использованием уравнения (1).

На Рис. 3 представлены микрофотографии структуры материалов, которые подтверждают отмеченные выше особенности. В структуре ДУКМ отчетливо выделены три фазы - алмаз, карбид кремния и кремний. Никаких следов графитоподобного углерода или иных фаз не обнаружено. Кроме того, в образцах отсутствует пористость, что позволяет использовать для расчета состава материалов равенство (1).

Описанные выше условия получения ДУКМ алмаз карбид кремния обеспечили реализацию практически безусадочной технологии. Специально выполненные эксперименты (на изделиях больших размеров -  $\varnothing 70$  мм) показали, что изменение линейных размеров при преобразовании заготовки из порошков алмаза в

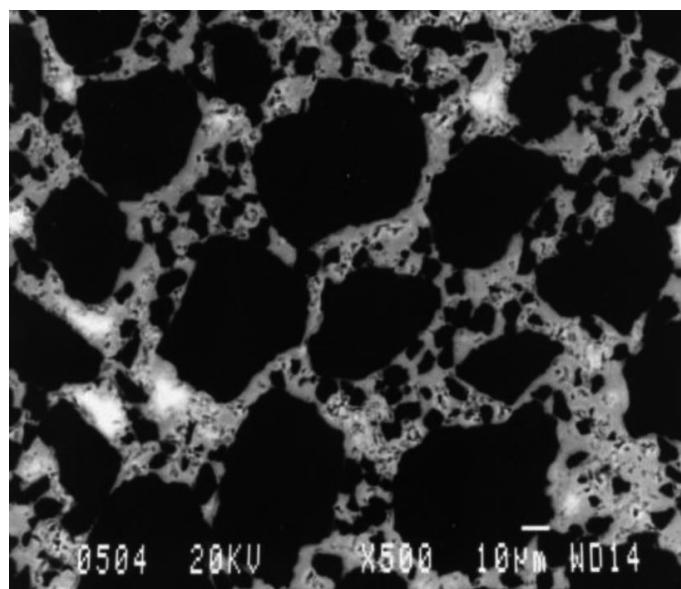


Рис. 3. Микроструктура ДУКМ алмаз – карбид кремния, полученного из алмазных частиц двух размеров: 14-10 мкм и 63-50 мкм. На фотографии видна хорошая взаимосвязь фаз материала: алмаза (черная), карбида кремния (серая) и кремния (белая)

Fig. 3. The microstructure of  $C_p/SiC$  composite obtained by using diamond particles of two sizes, 14-10 and 63-50 microns. A good inter connection of three phases can be seen - diamond (black phase, silicon carbide (gray) and silicon (white)

конечный продукт не превышают 0.2%. Это позволяет получать изделия сложных форм, примеры которых представлены на Рис.4.



Рис. 4. Образцы изделий сложной формы, изготовленные с использованием особенностей безусадочной технологии. Изделия сложных форм с заданным рельефом поверхности могут быть изготовлены из ДУКМ алмаз/SiC повышенной твердости и износостойкости

Fig. 4. Some samples of wares of complicated shapes obtained by using the shrinkless fabrication technology. Note a possibility of making wares of predetermined surface relict

**2.2. Развитие технологии создания составных конструкций из ДУКМ.** В ЦИАМ применительно к МГТД была разработана конструкция соплового аппарата (СА) из ДУКМ алмаз/SiC (Рис. 5), состоящая из 19 верхних, 19 нижних полок и 19 полых лопаток (Рис. 5, А). СА (Рис. 5, Б) собирается на специальной оснастке путём технологической сборки и склейки отдельных элементов [7].

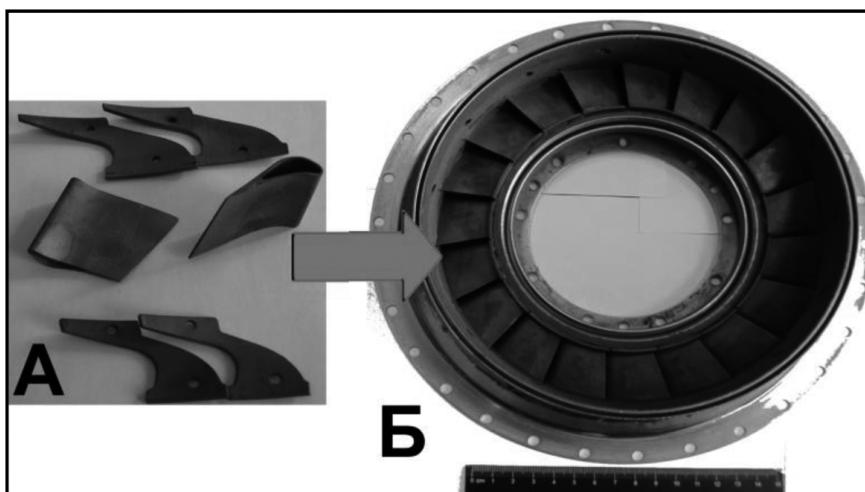


Рис. 5. Разработанный и изготовленный СА исходной конструкции из ДУКМ алмаз/SiC  
Fig. 5. A vane unit made of  $C_p/SiC$  composite

Для снижения трудностей, связанных со сборкой при появлении зазоров между лопatkами и полками с применением высокотемпературного клея, была разработана конструкция модифицированного СА, имеющего монолитные сегменты с полками и лопatkами (Рис. 6.а) и монолитные сегменты с полками и двумя и более лопatkами (Рис. 6.б). Уменьшение количества элементов конструкции и стыкуемых поверхностей способствует повышению качества изделия. Ключевой инновационной технологией изготовления СА модифицированной конструкции стала диффузионная сварка (спекание) полок и лопатки, позволяющая изготавливать сегмент СА. Полки выполняются с припуском. А отверстия между полкой и лопatkой при изготовлении сегмента СА на специальной технологической оснастке запрессовывается заготовка (см. рис 2) из алмазных порошков. После высокотемпературной обработки полки с лопatkой образуют неразъемное соединение с прочностными свойствами шва, сопоставимыми с прочностью основного материала. Применение данной технологии позволяет разрабатывать сегменты СА с двумя и большим числом лопаток в одном сегменте. На Рис. 6 б приведен опытный СА для перспективного вертолетного двигателя, выполненный из сегментов, состоящих из трех лопаток.



Рис. 6. Технология соединения деталей из ДУКМ алмаз/SiC (а) и опытный СА модифицированной конструкции (б)  
Fig. 6. Joining of structure elements made of  $C_p/SiC$  composite (a) and experimental vane unit of a modified design (б)

### 3. Механические и физические свойства ДУКМ алмаз - карбид кремния

Ниже приведены отдельные наиболее отличительные характеристики ДУКМ алмаз/SiC.

**3.1. Жесткость ДУКМ алмаз/SiC.** Исследования механических свойств показало, что полученные ДУКМ алмаз-карбид кремния обладают очень высокой жесткостью (табл.3). Их модуль упругости заметно выше модуля упругости металлических материалов и большинства керамик. По уровню удельной жесткости (модуль упругости, отнесенный к плотности) созданные ДУКМ алмаз/SiC позволяют достичь рекордных результатов (на 15-35% выше, чем у берилия и Si/SiC-керамики). По этой характеристике они уступают лишь монокристаллам алмаза.

Таблица 3  
**Модуль упругости и удельная жесткость материалов**

Материал	Модуль упругости E, ГПа	Плотность, ρ, г/см <sup>3</sup>	Удельная жесткость, E/(ρ·g), 10 <sup>6</sup> м
Алмаз-карбид кремния:			
- из алмазных частиц 10-14 мкм	580	3.22	18
-из алмазных частиц 20-28 мкм	570	3.18	18
-из алмазных частиц 50-63 и 10-14 мкм	720	3.30	22
Берилий	300	1.85	16
Самосвязанный карбид кремния (Si/SiC)	400	3.10	13
Алмаз	1100	3.51	31

**3.2. Термостойкость ДУКМ алмаз/SiC.** В Табл. 4 представлены результаты исследований термической стабильности ДУКМ алмаз/SiC. Результаты показывают, что материал, несмотря на возможное присутствие в нем термически нестабильной фазы алмаза, устойчив при высоких температурах, вплоть до 1500°C. Вероятным объяснением этому факту является то, что жесткая карбидокремниевая матрица, окружающая алмазные частицы, препятствует переходу алмаза в менее плотную графитовую модификацию.

Таблица 4

**Термическая стабильность ДУКМ алмаз/SiC.  
 (показано изменение модуля упругости (в ГПа) материала после его обработки при высоких температурах в вакууме в течение 45 мин. при каждой температуре)**

Температура обработки	Размер алмазных частиц, мкм					
	10-14		20-28		(50-63)+(10-14)	
	E <sub>T</sub>	Δ, %	E <sub>T</sub>	Δ, %	E <sub>T</sub>	Δ, %
20°; E <sub>0</sub>	585	0	568	0	718	0
1200°C	585	0	568	0	718	0
1400°C	585	0	557	2	713	1
1500°C	580	1	527	7	709	1
1600°C	-	-	512	10	709	1

Примечание: Δ = (1-E<sub>T</sub>/E<sub>0</sub>)·100%

В ЦИАМ проведены экспериментальные исследования сегмента СА из ДУКМ алмаз/SiC, полученного диффузионной сваркой трех лопаток и полок (см. раздел 2.2), на неравномерный локальный высокотемпературный нагрев газом до температуры 1250 °C (Рис.7). Цель испытания: подтверждение высокой теплостойкости ДУКМ алмаз/SiC, а также проверка прочности соединения полок и лопатки в местах «сварки» при высокотемпературных воздействиях.

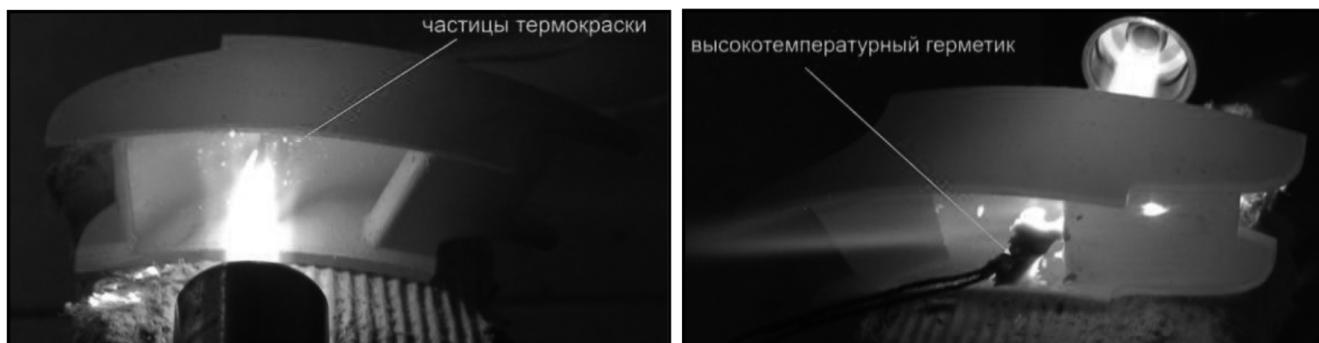


Рис. 7. Нагрев сегмента СА с тремя лопатками из ДУКМ алмаз/SiC.

Fig. 7. Heating of the vane unit containing three vane made of the C<sub>p</sub>/SiC composite

В результате испытаний высокотемпературным нагревом сегмента СА из трех лопаток с полками из ДУКМ алмаз/SiC при температуре газа до 1250 °С и выдержке 30 мин видимых изменений не обнаружено. В сегменте отсутствуют трещины, конструкция сохранила свой первозданный вид, что говорит о достаточной теплостойкости материала. На основе расшифровок термокраски материал сегмента прогрелся до температуры 888 °С. Результаты испытаний подробно описаны в [8].

**3.3. Прочность ДУКМ алмаз/SiC.** Прочность материалов измерялась методом трехточечного изгиба на образцах 5x5x50 мм на базе 40 мм (Табл. 5). Большинство измерений было сделано на образцах без дополнительной обработки поверхности, т.е. непосредственно после процесса химического преобразования их состава. Шероховатость поверхности образцов в этом случае составляла Ra = 2-3 мкм. При таких испытаниях полученные величины прочности, по-видимому, несколько ниже реальной прочности материала из-за влияния поверхностных дефектов. Поверхность небольших серий образцов была дополнительно отшлифована до шероховатости 0.1-0.15 мкм. При этом измеренная прочность образцов, которая, очевидно, более точно отражает прочность ДУКМ алмаз/SiC, достигает 400-450 МПа, что является хорошим уровнем прочности в сравнении с другими керамическими материалами. Следует заметить, что шлифование поверхности образцов для подготовки их к проведению испытаний - трудоёмкая операция. Например, на шлифование одного грамма алмаза в составе ДУКМ было израсходовано 50г алмаза в составе алмазных шлифовальных кругов.

Таблица 5

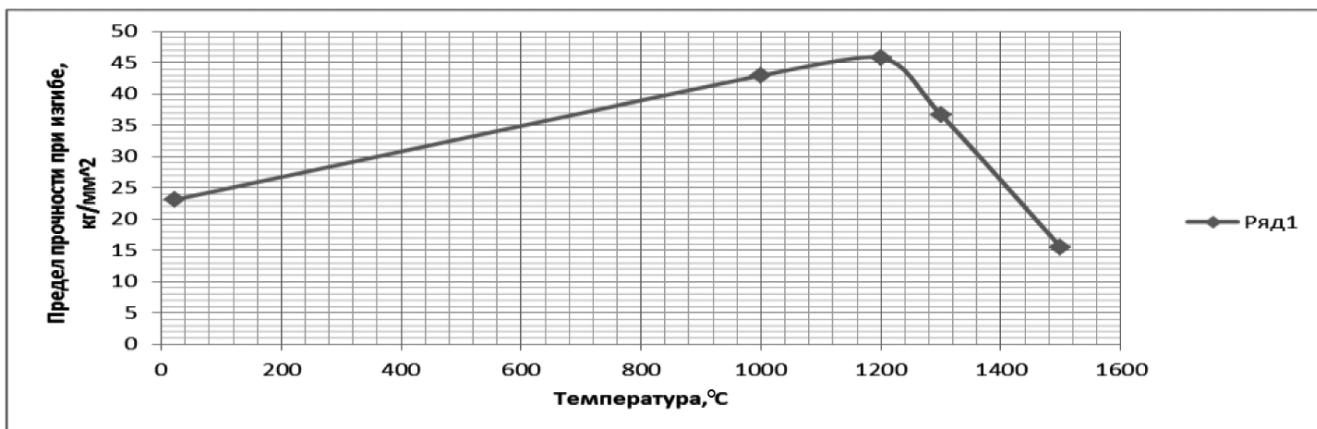
**Прочность при изгибе (МПа) ДУКМ алмаз/SiC**

Размер алмазных зерен в составе ДУКМ, мкм	Отшлифованные образ- цы	Образцы с нешлифованной поверхностью (только изготовленные)	
		20 °C	20 °C 1200 °C
(63-50)+(14-10)	450	300	300
28-20	400	270	270

На Рис. 8 приведен график изменения прочности от температуры, полученный испытаниями ДУКМ алмаз/SiC на трехточечный изгиб в ЦИАМ.

**3.4. Теплопроводность ДУКМ алмаз/SiC.** Входящие в ДУКМ алмаз/SiC фазы обладают высокой теплопроводностью: алмаз – 800-2000 Вт/мК; SiC – 80–180 Вт/мК; Si – 150 Вт/мК (указанные диапазоны связаны с уровнем структурного совершенства материалов). Очевидно, можно ожидать высокую теплопроводность и самого ДУКМ алмаз/SiC. Ожидания полностью подтверждаются экспериментально (Табл. 6). Достигнутые при этом уровни теплопроводности выше, чем у меди и серебра. Наиболее высокую теплопроводность имеют ДУКМ алмаз/SiC с повышенным содержанием алмазных частиц, что достигается формированием заготовки из смеси порошков разной зернистости. Важной особенностью является также низкий ТКЛР, обеспечивающий материалу сохранение формы и размеров при нагреве.

**3.5. Твердость ДУКМ алмаз/SiC.** Определение твердости по Кнуппу, выполненные на ДУКМ алмаз/SiC с алмазными частицами 10-14 мкм, показали, что твердость материала лежит в интервале 50-55 ГПа.



**Рис. 8. Прочность нешлифованных образцов из ДУКМ алмаз/SiC в зависимости от температуры**  
**Fig. 8. The temperature dependence of strength as received specimens of the  $C_p$ /SiC composite**

**Таблица 6**  
**Теплопроводность ( $\lambda$ ) и ТКЛР ( $\alpha$ ) композитов алмаз-карбид кремния**

Размер алмазных частиц, мкм	10-14	20-28	(63-50)+(14-10)
$\lambda$ , Вт/мК	290	370	500
$\alpha$ , $10^{-6}/\text{К}$ (30-100°C)	2.3	2.2	2.0

Высокая твердость обусловлена сочетанием в материале твердых фаз алмаза и карбида кремния. По уровню твердости ДУКМ алмаз/SiC следует отнести к сверхтвердым материалам. Для сравнения следует привести твердость алмаза – 85 ГПа и кубического нитрида бора – 45 ГПа [3].

Высокая твердость придает ДУКМ алмаз/SiC устойчивость к абразивному износу. В Табл. 7 приведены результаты тестов по шлифованию различных материалов алмазными супензиями. Исследования были выполнены в идентичных условиях и описаны в [9]. Видно, что износостойкость ДУКМ алмаз/SiC в таких условиях более чем в 300 раз превышает карбидные керамики и более чем в 800 раз твердые сплавы.

**Таблица 7**  
**Сравнение стойкости к абразивному износу ДУКМ алмаз/SiC с другими материалами**

Материал	Скорость износа мкм³/м	Относительная скорость износа
ДУКМ с зернами алмаза (63-50мкм)+(10-7мкм)	0.85	1
ДУКМ с зернами алмаза (14-10мкм)	2.5	3
Самосвязанный SiC	270	320
Спеченный SiC	280	330
Твердый сплав WC-Co	690	810

#### 4. Заключение

Представленные результаты показывают, что дисперсно-упрочненный композиционный материал алмаз – карбид кремния представляет собой новую группу сверхтвердых композиционных материалов, ос-

новной особенностью которых, отличающей их от известных сверхтвердых материалов (алмаз, кубический нитрид бора), является возможность получения из них изделий весьма сложных форм и больших размеров, реализуя «безусадочную» технологию. Эта особенность позволяет рассматривать ДУКМ алмаз/SiC, как особый вид инженерной керамики, сочетающий в себе уникальные свойства по износостойкости, жесткости, теплопроводности, ТКЛР. Возможность контролируемого управления составом и свойствами материала, получения градиентных материалов с неоднородным распределением алмазных частиц по объему материала позволяет легко адаптировать их для различных областей применения.

Важной особенностью является возможность изготовления деталей больших габаритов и разнообразных форм, что не достижимо сегодня другими методами получения подобных материалов. Эта особенность заметно расширяется применением разработанной технологии «сварки», позволяющей, в том числе, снизить эффекты масштаба при создании крупногабаритных изделий из неметаллических материалов. Тем самым открываются новые направления применения алмаза – создание и использование в машиностроении алмазных конструкционных материалов.

#### Библиографический список

1. Новиков Н.В., Федосеев Д.В., Шульженко А.А., Богатырева Г.П., *Синтез алмазов*, Киев, 1987. 160 с.
2. T.Kameda, Y.Itoh, Fabrication and mechanical properties of reaction sintered silicon carbide, *High temperature ceramic matrix composites III. CSJ Series*, Ed. K. Niihara et al, Trans. Tech. Publications Ltd, 1998, p. 95 - 98.
3. Физические свойства алмаза. Справочник. Киев, Наукова думка, 1987, 190 с.
4. Воронин Г.А., Осипов А.С., Механизм формирования структуры и физико-механических свойств композита алмаз-карбид кремния. *Поликристаллические материалы на основе синтетического алмаза и кубического нитрида бора*, Киев, 1990, С. 31 - 34.
5. S.K.Gordeev, Advanced diamond based composites for engineering applications, *Diamond Based Composites*, Kluwer, Dordrecht, 1997, p.1-11.
6. Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В., *Алмазы и сверхтвердые материалы*, М. 1990. 327 С.
7. Мезенцев. М.А., Каримбаев Т.Д., Гордеев С.К., Технология изготовления соплового аппарата из дисперсно-упрочненного композиционного материала, *Материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении»*, 5-8 октября 2010 г., ЦИАМ, Москва.
8. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю., Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного ГТД, *Труды издания Самарского Авиакосмического Университета*, в печати.
9. P.Larsson, N.Axen, T.Ekström, S.Gordeev and S.Hogmark, Wear of a new type of diamond composites, *International Journal of Refractory Materials and Hard Metals*, 1999, v. 7, p. 453 - 460.

#### References

1. Novikov N.V., Fedoseev D.V., Shul'zhenko A.A., Bogatyreva G.P., *Sintez almazov* [Synthesis of diamonds], Kiev, 1987. p. 160. (in Russian)
2. T.Kameda, Y.Itoh, Fabrication and mechanical properties of reaction sintered silicon carbide, *High temperature ceramic matrix composites III. CSJ Series*, Ed. K. Niihara et al, Trans. Tech. Publications Ltd, 1998, p. 95 - 98.
3. Fizicheskie svojstva almaza. Spravochnik [Physical properties of Diamond, Reference book]. Kiev, Naukova dumka, 1987, 190 p. (in Russian)
4. Voronin G.A., Osipov A.S., Mekhanizm formirovaniya struktury i fiziko-mekhanicheskikh svojstv kompozita almaz-karbid kremniya. Polikristallichеские materialy na osnove sinteticheskogo almaza i kubicheskogo nitrida bora [Polycrystalline materials based on synthetic diamond and cubic boron nitride] Kiev, 1990, p. 31 - 34. (in Russian)
5. S.K.Gordeev, Advanced diamond based composites for engineering applications, *Diamond Based Composites*, Kluwer, Dordrecht, 1997, p.1-11.
6. Polyakov V.P., Nozhkina A.V., Chirikov N.V., *Almazy i sverhtverdye materialy* [Diamonds and superhard

materials], Moscow. 1990. 327 p. (in Russian).

7. Mezencev. M.A., Karimbaev T.D., Gordeev S.K., [Fabrication technology of the vane unit of a particle-reinforced composite material]. *Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenykh i specialistov «Novye resheniya i tekhnologii v gazoturbostroenii»*. [The all-Russian scientific and technical conference of young scientists and specialists «New solutions and technologies in azotobacteria»], 5-8 oktober, 2010, CIAM, Moscow (in Russian).

8. Karimbaev T.D., Mezencev M.A., Ezhov A.Yu., Development and experimental investigation of non-metallic structural elements and units of prospective gas turbine gas-turbine engines. *Trudy izdaniya Samarskogo Avia-Kosmicheskogo Universiteta - Proceedings of the editions of the Samara aerospace University*, in press (in Russian).

9. P.Larsson, N.Axen, T.Ekström, S.Gordeev and S.Hogmark, Wear of a new type of diamond composites, *International Journal of Refractory Materials and Hard Metals*, 1999, v. 7, p. 453 - 460.

#### **Сведения об авторах**

**Т.Д.Каримбаев:** д-р техн. наук, нач. отдела ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, karimbayev@ciam.ru, тел +7 (495) 362 49 72.

**М.А.Мезенцев:** инженер, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, bahit@ciam.ru, тел +7 (495) 362 49 72.

**А.Ю.Ежов:** вед. инженер, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия, 20602@rtc.ciam.ru, тел +7 (495) 552 97 56.

**С.К.Гордеев:** д-р техн. наук, нач. лаборатории наноматериалов и карбидных композитов, ОАО «ЦНИИ-ИМ», Санкт-Петербург, Россия, gordeevsk@mail.ru, тел +7(812) 274 46 36.

**С.Б.Корчагина,** ст. науч. сотр. лаборатории наноматериалов и карбидных композитов, ОАО «ЦНИИ-ИМ», Санкт-Петербург, Россия, gordeevsk@mail.ru, тел +7(812) 274 46 36.