

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Берсенев Ю.А., Максимов В.Г., Щетанов Б.В. Радиопрозрачные высокотермостойкие керамические материалы: Тез. докл. на Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений». – М.: ЦАГИ, 2004, с. 64–96.
2. Композиционные материалы: Справочник. Гл. 1. – М.: Машиностроение, 1990, с. 7–10.
3. Августинник А.И. Керамика.– Л.: Стройиздат, 1975, с. 370–380.

УДК 678.84

*С.С. Солнцев, Д.В. Гращенков, Н.В. Исаева,  
С.Ст. Солнцев, Г.В. Ермакова, Г.М. Прокопченко*

### **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БЕСКИСЛОРОДНОЙ КЕРАМИКИ ТИПА SiC–SiC**

Анализ современного развития зарубежного двигателестроения показывает, что использование высокотемпературных керамических композиционных материалов на основе бескислородной керамики типа SiC–SiC является ключевым в решении проблем, связанных с выбросом вредных веществ, снижением массы, повышением характеристик рабочих процессов – надежности, долговечности перспективных двигательных установок, и в частности авиадвигателей.

Композиционные материалы с керамической матрицей на основе SiC обладают низкой удельной массой (в 2–3 раза легче сталей), низким коэффициентом теплового расширения (повышенной стабильностью размеров), повышенной эрозионной, химической и коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Наряду с хорошим сочетанием весовых и удельных механических характеристик, изделия из керамических композиционных материалов обладают высокой термостойкостью и поэтому могут использоваться без охлаждения в условиях высоких температур, вплоть до 1500°C, с прогнозом дальнейшего повышения.

В результате проведенных исследований разработаны составы и способы получения композиционного материала на основе керамической матрицы с плотностью менее 3 г/см<sup>3</sup>, с рабочей температурой до 1500–1600°C и прочностью до 200 МПа.

Формообразование изделий из композиционного материала проводится с помощью методов, используемых при получении изделий из полимерных композиционных материалов. Данный подход определяется достаточно хорошей изученностью технологических приемов, методик расчета технологических операций и их параметров, а также обеспечивает доступность технологической базы. Полученный таким образом полуфабрикат подвергается высокотемпературной обработке, в результате которой происходит зарождение и регулирование структуры материала, что приводит к образованию высокотемпературного полидисперсного квазиизотропного керамического КМ (рис. 1) [1].

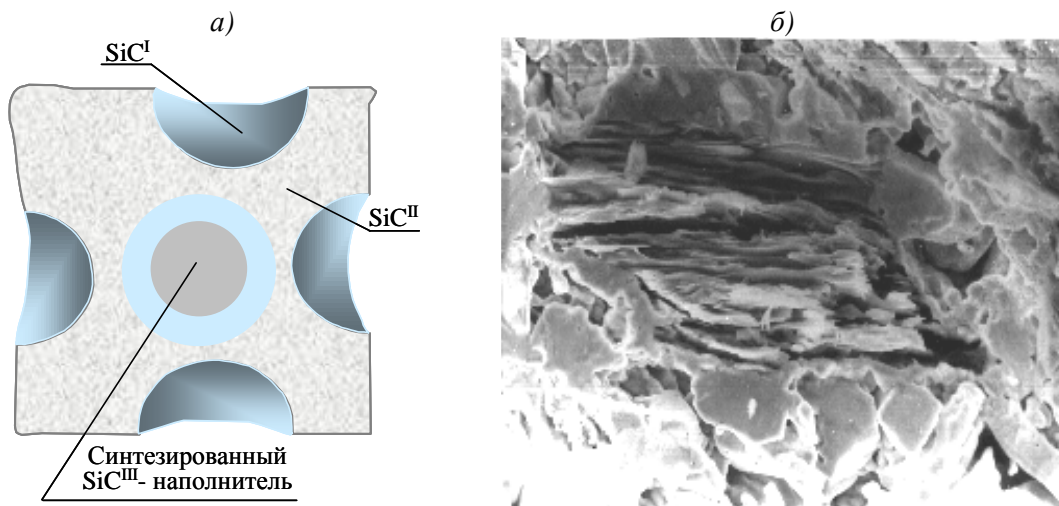


Рис. 1. Теоретическая схема (а) и экспериментальная микроструктура (б) (РЭМ –  $\times 720$ ) керамического КМ ( $\text{SiC}^I$ ,  $\text{SiC}^{II}$  и  $\text{SiC}^{III}$  – первичная, вторичная и третичная фазы)

В настоящее время проводятся работы по исследованию возможности изготовления деталей камеры сгорания перспективных двигательных установок из композиционных материалов на основе бескислородной керамики типа  $\text{SiC-SiC}$ . Выявлено, что, помимо перечисленных достоинств, отличительной особенностью керамического композиционного материала  $\text{SiC-SiC}$  является высокая (по сравнению с традиционной керамикой) стойкость в продуктах сгорания топлива при термоциклических нагрузках по режиму:  $1500 \rightleftharpoons (800-850)^\circ\text{C}$ , более 1000 циклов (1 цикл – 1 мин) – без разрушения [1].

При проведении микроструктурного анализа испытанных образцов экспериментального КМ выявлена заложенная гетерогенная поликристаллическая структура с незначительной замкнутой пористостью. При этом размеры зерен кристаллов составляют 5–30 мкм. Представленная полидисперсность и наличие пористости могут оказывать двойное влияние на физико-механические характеристики композита. Известно, что образование крупнодисперсной неупорядоченной структуры и наличие значительного

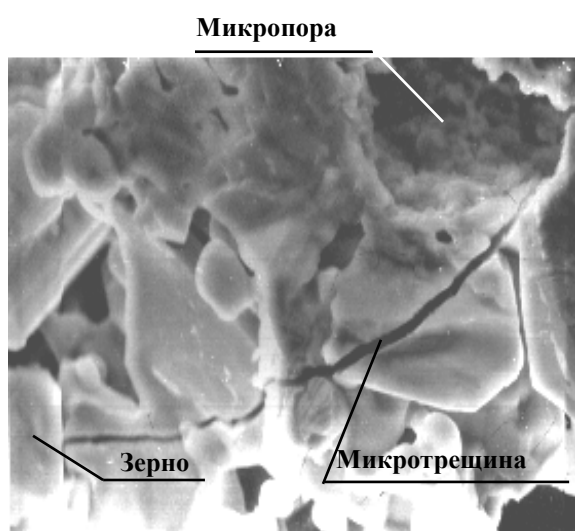


Рис. 2. Эффект торможения микротрещины структурными элементами керамического КМ ( $\times 2000$ )

наблюдается в течение длительного времени. Такое поведение материала, очевидно, мо-

объема пор могут вызывать снижение свойств материала. Однако (как показано на рис. 2) эти же структурные составляющие материала могут выступать в качестве барьера возникающим микротрещинам. Этот же эффект подтверждается и приведенными выше испытаниями экспериментального КМ, который, в отличие от монолитной керамики, выдержал без разрушений и объемных изменений термоциклические воздействия. Создание регулируемой и управляемой структуры служит одним из основных способов повышения трещиностойкости и прочностных характеристик данного керамического композиционного материала [1].

Было отмечено, что при температурах до  $1500^\circ\text{C}$  деградации материала не

жет быть связано с образованием в окислительной среде тонкой стекловидной пленки на поверхности зерен карбида кремния. При более высоких температурах процесс образования защитной пленки активизируется и проходит более интенсивно, что приводит к самозалечиванию различных дефектов композиционного материала (закупорка пор, трещин и т. п.). Процесс самозалечивания при эксплуатации материала приводит к улучшению физико-механических характеристик, повышению трещиностойкости композита и дополнительной защите его от окисления при повышенных температурах. В таблице приведены некоторые свойства КМ типа SiC–SiC [2].

#### Основные свойства композиционного материала типа SiC–SiC

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,4–2,8
Открытая пористость, %	5–9
Теплопроводность (20–1000°C), Вт/(м·К)	19,6–22,0
Прочность при изгибе при 20°C, МПа:	
без нагрева	100–120
после нагрева при 1500°C	120–140
Статический модуль упругости, ГПа, при температуре, °C:	
20	180–240
1500	130–170

Применение новых стеклокерамических и керамических композитов для изготовления узлов и деталей газотурбинных двигателей, работающих в условиях повышенных температур, а также повышенного эрозионного износа и агрессивного воздействия среды (клапаны, втулки поршневых дозаторов топлива в двигательных установках по его перекачиванию), позволит повысить срок службы деталей в 1,5–2 раза (по сравнению с изделиями из традиционных металлов, пластичность которых при ударах приводит к развальцовыванию деталей) и КПД узлов на 15–20% благодаря их малой инерционности, связанной с небольшой плотностью (не более 3 г/см<sup>3</sup>) новых композитов. За рубежом проводятся исследования подобных материалов в качестве деталей авиационной и космической техники. По прогнозам такие материалы могут находить применение в газотурбинных и автомобильных двигателях, теплообменниках, рекуператорах, для изготовления теплоконструкционных элементов газотурбинных двигателей морской авиации, деталей высокотемпературного крепежа и разъемных резьбовых соединений конструкций и элементов многоразовой теплозащиты и в других узлах и агрегатах, работающих при высоких температурах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев С.С., Гращенков Д.В., Исаева Н.В. Высокотемпературные композиционные материалы для перспективных изделий авиа- и машиностроения // Конверсия в машиностроении, 2004, №4 (65), с. 60–64 (Информконверсия).
2. Солнцев С.С., Гращенков Д.В. Высокотемпературные композиционные материалы на стеклокерамических матрицах для перспективных изделий аэрокосмической техники. – Сб. докладов на Третьем Международном Аэрокосмическом Конгрессе, IAS'2000. – СИП РИА, 2000, с. 113.