

На основе синтезированных золь-гель методом аморфных тонкодисперсных порошков путем их прессования и последующей термообработки в области температур 1300–1350°C получены высокотемпературные стеклокристаллические матрицы монофазного состава в виде моноклинного стронциевого анортита с температурой деформации выше 1400°C, обладающего комплексом высоких термических и физико-химических свойств (см. таблицу).

Свойства матрицы, синтезируемой в системе SrO–Al₂O₃–SiO₂

Свойство	Значение свойств
Плотность, кг/м ³	2300
Температурный коэффициент линейного расширения: $\alpha \cdot 10^7$, K ⁻¹	45
Термоциклирование по режиму 20 ↔ 1400°C: N, число циклов (1 цикл: 5 мин)	50
Микротвердость, МПа	8000
Предел прочности при изгибе, МПа	80
Истираемость, г/см ²	0,04

Таким образом, в результате проведенного исследования показана принципиальная возможность синтеза в алюмосиликатных системах высокотемпературных стеклокерамических материалов золь-гель методом для применения в качестве высокотемпературной матрицы композиционных материалов. Отработана технология их получения.

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

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ТИПА SiC–SiC ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЯХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Представлены физико-механические характеристики разработанного высокотемпературного композиционного материала с керамической матрицей на основе SiC, предназначенного для изготовления керамических сегментов стехеометрической камеры сгорания, работающего при температурах до 1500 °C.

Ключевые слова: *высокотемпературный керамический материал.*

На новом этапе разработки перспективных изделий в России и за рубежом стоят задачи создания и применения конструкций из высокотемпературных композиционных материалов, что позволяет решить проблемы снижения массы, стоимости, повышения характеристик рабочих процессов, а также проблемы, связанные с выбросом вредных веществ при создании новых авиационных двигателей, надежности, долговечности и т. д.

Анализ зарубежных источников, а также общие тенденции развития современного двигателестроения показывают, что в настоящее время интенсивно ведутся разработки и исследования элементов камеры сгорания авиационных двигателей из композиционных материалов на керамической матрице с целью обеспечения повышенных температур рабочих процессов и большего ресурса работы. Развитие ГТД основывается на увеличении их коэффициента полезного действия и снижении уровня вредных выбросов, в том числе NO_x, СО. Одним из возможных способов решения этих задач является увеличение температуры газов на входе в турбину. Повышение температуры газов вызывает необходимость либо применения эффективных способов охлаждения узлов и деталей, формирующих горячую часть, что приводит к усложнению и увеличению мас-

сы конструкции, либо разработки и использования новых термостойких композиционных материалов.

Керамические материалы вызывают интерес особенно благодаря исключительной способности сохранять свои свойства при высоких температурах (по сравнению с металлами), хорошей износостойкости, отличным коррозионным свойствам и, прежде всего, комплексу свойств, включающему низкую плотность и хорошую термическую и химическую устойчивость, который не был достигнут для других материалов.

В настоящее время причина непрерывного подъема в развитии керамических композиционных материалов заключается в том, что сегодня имеются существенные благоприятные технологические и научные предпосылки для успешных разработок, например улучшенное сырье, прогресс в области приготовления порошков, формования, уплотнительной техники и оценки материалов. Кроме того, очень важно наличие неограниченного количества недорогого сырья для получения высококачественных порошков.

Керамические композиты не имеют альтернативы для применения в условиях длительного (от сотен до нескольких тысяч часов) воздействия температуры выше 1200°C в окислительной среде.

Композиционный материал, разработанный в ВИАМ, с керамической матрицей на основе SiC предназначен для изготовления керамических сегментов стехиометрической камеры сгорания нового поколения и обладает низкой плотностью $2500\text{--}2800\text{ кг/м}^3$ (в 2–3 раза легче сталей), низким коэффициентом теплового расширения (в интервале $20\text{--}1500^{\circ}\text{C}$): $\alpha \cdot 10^6 = 4,9\text{ К}^{-1}$ (повышенной стабильностью размеров), повышенной эрозионной, химической и коррозионной стойкостью в агрессивных средах. При эксплуатационных температурах до 1550°C обладает эффектом самозалечивания микродефектов и восстановления до 100% исходных механических характеристик (200 МПа) благодаря активизации процесса образования защитной стекловидной пленки на поверхности частиц карбида кремния, что приводит к самозалечиванию возможных дефектов композиционного материала (закупорка пор, трещин и т. п.).

Технология, разработанная в ВИАМ, позволяет реализовать процессы высокотемпературного синтеза, когда упрочняющие частицы SiC включаются в структуру матрицы SiC, образующейся вследствие физических (испарение-конденсация, перекристаллизация через жидкую фазу, диффузионно-вязкое течение и др.) и химических процессов, в результате которых происходит направленное формирование непрерывного каркаса в объеме композита. Управляемый высокотемпературный синтез позволяет, регулируя структуру, направленно изменять такие свойства, как плотность, пористость, прочность и др.

Заложённая гетерогенная поликристаллическая структура (размеры зерен $0,1\text{--}30\text{ мкм}$) с незначительной замкнутой пористостью может оказывать двоякое влияние на физико-механические характеристики композита. Образование крупнодисперсной неупорядоченной структуры и наличие значительного объема пор может вызывать снижение прочностных свойств материала. Однако эти же структурные составляющие материала могут выступать в качестве барьера (тормоза) для развития возникающих микротрещин. Этот эффект подтверждается стендовыми испытаниями экспериментальных образцов КМ в продуктах сгорания топлива, которые, в отличие от образцов традиционной керамики, выдержали испытания на термостойкость без разрушений и

объемных изменений в течение более 7000 циклов по режиму: $1500 \rightleftharpoons (800-850)^\circ\text{C}$ (1 цикл: 1 мин).

Тенденции развития, необходимые для дальнейшей разработки композиционного материала SiC–SiC, включают уменьшение разброса свойств путем улучшения гомогенности и повышения чистоты исходных компонентов, а также оптимизации технологических параметров получения КМ и структуры пограничной фазы зерна. Улучшение регулируемой и управляемой структуры данного керамического композиционного материала позволит повысить его трещиностойкость, прочностные и другие характеристики (см. таблицу).

Свойства керамического композиционного материала типа SiC–SiC (ВИАМ)

Свойство	Значение свойства
Рабочая температура, $^\circ\text{C}$	1550
Плотность, кг/м^3	2500–2800
Пористость, %	7–11
Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, $^\circ\text{C}$:	
20	200
1550	200
Теплопроводность (в зависимости от плотности материала), Вт/м·К, при температуре, $^\circ\text{C}$:	
20	60–90
1000	20–30
ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ (при 20–1550 $^\circ\text{C}$)	4,9
Модуль упругости Юнга статистический G, ГПа, при температуре, $^\circ\text{C}$:	
20	180–240
1550	140–180

ВИАМ ведет постоянную работу по совершенствованию эксплуатационных характеристик разработанного керамического материала. Помимо этого, разрабатываются антиокислительные керамические покрытия, работоспособные вплоть до 2000 $^\circ\text{C}$, применение которых позволяет существенно повысить жизнеспособность керамических композитов.

Дифференцированный подход к свойствам керамического КМ: плотность, прочность, термостойкость, тепловое расширение и теплопроводность, хорошая коррозионная и износостойкость, возможность оптимизации их комбинаций – позволяет определить с достаточной точностью возможные области применения: теплонапряженные узлы и детали перспективных авиационных двигательных установок, а также узлы, применяемые в нефте- и газоперекачивающих установках, энергетике, судостроении (в том числе теплообменники, рекуператоры, клапанные и уплотнительные элементы), в конструкциях планеров самолетов, машиностроении и др.