



# Высокотемпературные композиционные материалы для перспективных изделий авиа- и машиностроения

С.С. Солнцев  
*доктор технических наук*

Д.В. Гращенко

Н.В. Исаева

Ноябрь 2003

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Конверсия в машиностроении», № 4, 2004 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Высокотемпературные композиционные материалы для перспективных изделий авиа- и машиностроения**

С.С. Солнцев, Д.В. Гращенков, Н.В. Исаева

*Всероссийский институт авиационных материалов*

*Рассматриваются разрабатываемые в ВИАМ перспективные высокотемпературные стеклокерамические и керамические композиционные материалы, обладающие плотностью в 2–4 раза ниже, чем металлические сплавы, и предназначенные для использования в качестве конструкционных и функциональных элементов, работающих при температуре 600–1500°C, в перспективных изделиях авиационной и космической техники, авиадвигателестроения, машиностроения. Композиты по своим свойствам не уступают зарубежным аналогам, а по ряду характеристик превосходят их.*

*Впервые в отечественной практике в ВИАМ совместно с другими институтами и предприятиями авиационной отрасли разрабатываются технологии изготовления теплонагруженных конструкционных элементов перспективной техники из стеклокерамических и керамических композиционных материалов.*

*There are considered prospective high-temperature glass-ceramic and ceramic composites developed at VIAM which have a density 2 to 4 times as low as that of metal alloys and are intended for application as structural and functional members operating at 600 to 1500°C in prospective articles of the aerospace engineering, aircraft engine manufacturing, machine building. The composites are comparable by their properties with foreign analogs and in some indices are superior thereto.*

*For the first time in the national practice VIAM in association with other institutes and enterprises of the aircraft industrial branch are developing technologies for producing thermal-loaded structural members from glass-ceramic and ceramic composites.*

Развитие науки и техники, в том числе в авиации и космонавтике, сопровождается созданием современных скоростных и мощных летательных аппаратов, как эксплуатирующихся уже в настоящее время, так и находящихся в стадии разработки. При этом современная техника обуславливает необходимость разработки новых высокотемпературных и высокопрочных конструкционных материалов, способных обеспечить повышенные параметры эксплуатации изделий авиационной и космической промышленности. Создание новых высококачественных конструкционных материалов с заданными свойствами для надежной работы в различных областях авиа- и машиностроения – одна из важнейших задач современного материаловедения.

Надо отметить, что реализация имеющихся возможностей по разработке высокотемпературных материалов позволит в значительной мере решить проблему эксплуатации при высоких температурах ряда конструкционных элементов качественно новой техники, решить задачи снижения массы, повышения характеристик рабочих процессов, КПД, проблемы, связанные с экологичностью применяемых материалов, их надежностью, долговечностью. Этот путь является ключевым в повышении тактико-технических характеристик летательных аппаратов и двигательных установок нового поколения [1, 2].

Типичные свойства традиционных высокотемпературных материалов сегодня сопровождаются повышенными требованиями к ряду эксплуатационных характеристик. В последние годы обращает на себя внимание смещение акцента в применении конструкционных материалов от металлов к неметаллическим, в том числе композиционным материалам (композиты, КМ) и увеличение числа работ, посвященных созданию и исследованию структуры и свойств высокотемпературных неметаллических материалов. Композиты, являясь гетерогенной анизотропной или квазиизотропной системой, сочетая положительные свойства компонентов и

обладая комплексом новых свойств, не присущих ни одному из них, позволяют существенно улучшить основные характеристики материалов.

Однако существующие в настоящее время композиционные материалы не всегда удовлетворяют разработчиков перспективной авиационной и другой техники. Так, например, ресурсная работоспособность изделий из полимерных композитов ограничивается в основном низкой (до 400°С) температурой эксплуатации, а изготовление деталей авиационных двигательных установок из металлических КМ сопровождается снижением весовой отдачи изделия.

В случае композиционных материалов со стекловидной, стеклокерамической и керамической матрицей речь идет о том, чтобы сделать традиционные, существенно хрупкие материалы более прочными и трещиностойкими. Композиты на основе керамических и стекломатриц, упрочненных жаропрочными армирующими наполнителями на основе углерода, карбида кремния, муллита, глинозема и других тугоплавких соединений в форме волокна, частиц или «усов», начали интенсивно развиваться начиная с 70-х годов прошлого столетия. Сегодня высокотемпературные КМ на основе стекло-, стеклокристаллических и керамических бескислородных матриц рассматривают как один из наиболее перспективных классов композитов. В настоящее время работы по созданию и исследованию новых композитов ведутся в Великобритании, США, Германии, Франции, Японии, Канаде, Южной Корее, Китае и России [1, 2].

Повышенный интерес к новым композитам обусловлен исключительно широким спектром возможных применений этих материалов на ключевых направлениях развития техники и высоким уровнем конкурентной способности изделий, изготовленных с их применением. Благодаря термостабильности и значительной инерции к деградации в окружающей среде эти композиционные материалы являются альтернативой композитам с полимерной или металлической матрицей.

Преимущества композиционных материалов со стеклокерамической и керамической матрицами перед традиционными материалами – низкая удельная масса (в 2–4 раза легче сталей и сплавов), относительно высокая температура эксплуатации (более чем на 200–400°С превышающая температуру использования полимерных КМ), относительно высокая вязкость разрушения, химическая инертность, коррозионная стойкость, высокое сопротивление к зарождению и росту трещин, высокие удельные механические характеристики [1–3].

Создание КМ на основе стекол, стеклокерамики и керамики является одним из наиболее перспективных и непрерывно развивающихся направлений высокотемпературного материаловедения. В ВИАМ проводится широкий спектр работ, связанных с созданием материалов этого класса, некоторые из которых ведутся в рамках международного сотрудничества и партнерства со странами как ближнего зарубежья, так и с европейскими фирмами.

В результате проведенных исследований во ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ разработаны составы и способы получения:

- композиционного материала на основе углеродных армирующих наполнителей и стекломатрицы на рабочую температуру 650–700°С с прочностью до 700 МПа и плотностью менее 2 г/см<sup>3</sup>;
- теплозащитного стеклокерамического композита с регулируемым уровнем плотности и рабочих температур;
- композиционного материала на основе керамической матрицы (углеродкерамический композиционный материал) с плотностью менее 3 г/см<sup>3</sup>, рабочей температурой до 1500–1600°С и прочностью до 200 МПа.

Для обеспечения специфических и функциональных характеристик были подготовлены композиционные материалы, состоящие из стекловидной (или стеклокерамической), керамической матрицы и непрерывной или дисперсной армирующей фазы, следуя концепции «сшивания» (соединения) материалов в зависимости от приложенных требований, т.е. перешли от использования

существующих материалов к проектированию материала в зависимости от специфики эксплуатации [1, 2].

Одно из наиболее значительных преимуществ композиционных материалов со стекло- или стеклокристаллической матрицей – низкая стоимость сырья, используемого для приготовления матрицы (оксиды кремния, кальция, натрия и т.п.), и относительная простота методов приготовления. Основные методы приготовления таких композитов основываются на свойстве размягчения стекла. Приготовление композиционного материала не требует достижения температуры расплава матрицы, а только адекватного вязко-пластичного состояния при уплотнении композита. Разработанная в ВИАМ уникальная технология, основанная на «золь-гель» методе в сочетании с тонко- и ультрадисперсными стеклообразующими частицами и активными технологическими добавками, позволяет формировать стекломатрицу и обеспечить защиту армирующей фазы, не прибегая к высоким температурам и давлению, как в случае классической керамики. Армирующая фаза, однако, может создать некоторые проблемы с нахождением и стоимостью, прежде всего, если речь идет о непрерывных волокнах японского или американского производства на основе углерода и карбида кремния, но такие же проблемы возникают для композиционных материалов с металлической, органической и керамической матрицей.

Отсутствие серийного производства непрерывных SiC-волокон в России несколько ограничивает возможности разработки и создания изделий для современной техники. Однако применение углеродных волокон для армирования стекла позволяет получить широкое разнообразие систем «волокон–стекло». Для такой системы весьма велико влияние типа и структуры углеродного наполнителя на свойства КМ (см. таблицу). Так, проведенные исследования и анализ зарубежных данных показали, что для композитов на основе углеродных волокон, армирующих стекломатрицу, замена волокон высокопрочного типа на высокомодульные приводит не только к повышению или сохранению механических характеристик



материала при аналогичных или более низких прочностных характеристиках самих волокон, но и к повышению на 50–150°С температуры эксплуатации композита [3, 4].

Свойства отечественных и зарубежных углеродных волокон  
и стеклокерамических композиционных материалов на их основе

Марка волокна	Свойства волокон			Матрица	Свойства СККМ		
	$\sigma$ , МПа	$E$ , ГПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>		$\sigma$ , МПа	$E$ , ГПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
КМ типа «Стектарм», ВИАМ, Россия							
УКН-П-5000	3500–4000	230	1,75	Высококремне- земное стекло	700–900	100	1,6–2,0
Кулон (лента)	2500	450–500	1,95		600–800	120–140	1,8–2,0
Зарубежные аналоги							
T300	3500	230	1,76	DURAN	680	140	2,0
T1000	7000	295	1,82	DURAN	1250	160	2,1
M60J	3900	588	1,94	DURAN	1650	280	2,2

В настоящее время сотрудниками ВИАМ совместно с ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» решается задача модификации состава и разработки технологии получения композиционного материала для изготовления конструктивных деталей, таких как, например, силовые кольца (рис. 1) рабочего колеса компрессора высокого давления перспективных двигательных агрегатов. Для реализации поставленной задачи разработаны матричные органоколлоидные композиции, синтезированные по «золь-гель» методу в комбинации с функциональными технологическими поверхностно-активными добавками, и технология импрегнирования армирующих элементов в виде углеродных однонаправленных лент, жгутов и тканевых наполнителей объемной структуры, позволяющих создать заданную степень наполнения и направленную анизотропию, что обеспечивает требуемые конструктивные и функциональные характеристики теплонагруженных элементов из КМ [4].

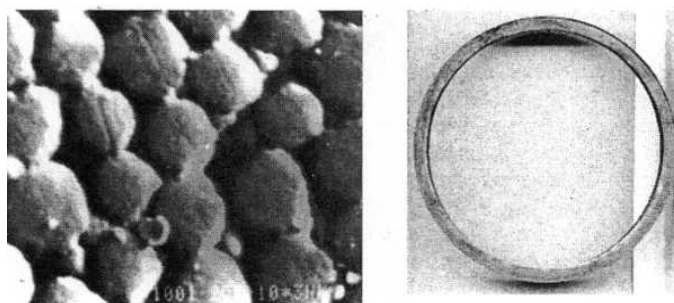


Рисунок 1. Микроструктура стеклокерамического композиционного материала типа «Стекларм» (ВИАМ) и модельная деталь силового кольца рабочего колеса перспективного компрессора высокого давления

Одной из наиболее сложных задач являлось создание технологии горячего формования кольцевых деталей из композита, отработка и оптимизация технологических параметров процессов намотки и формообразования при повышенных температурах, позволяющих регулировать адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз, обеспечивающее наиболее полную реализацию свойств компонентов и всего композита в целом.

В процессе проведения исследований стеклокерамических композитов было установлено, что их структура и свойства определяются не только соответствующими показателями компонентов, но и технологией изготовления изделий из них, в том числе технологическими параметрами высокотемпературного формообразования. Так, параметры данного процесса и их варьирование могут существенно повлиять на уровень механических характеристик изделий из стеклокерамических композитов. Разброс значений разрушающего напряжения при изгибе на образцах, изготовленных по разным технологическим режимам, составил от 200 до 1000 МПа. Изменяя технологические параметры, можно управлять и направленно изменять структуру и свойства материала. Характеристики разрабатываемого в ВИАМ стеклокерамического КМ [3, 5] представлены ниже, а также на рис. 2.

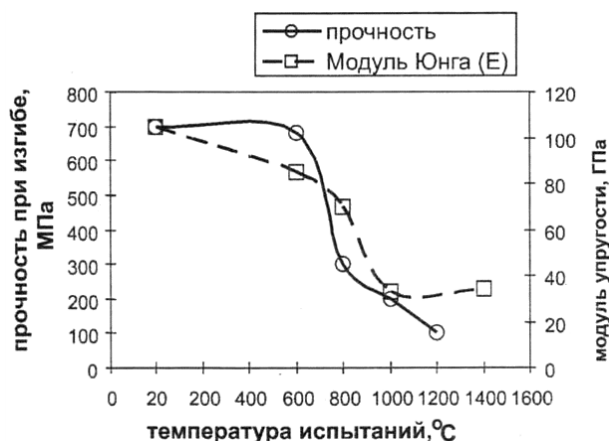


Рисунок 2. Прочность и модуль упругости углестеклокерамического КМ «Стекларм» при различной температуре (данные получены совместно с сотрудниками ЦИАМ)

Основные свойства композиционного материала типа «Стекларм»  
(содержание армирующих волокон 40% об.)

Плотность, г/см <sup>3</sup> .....	1,88–2,0
Предел прочности на изгиб, МПа:	
0°.....	600–800 (до 1000)
0°/90°.....	200–350
Модуль Юнга, ГПа:	
0°.....	90–120
0°/90°.....	30–50
Ударная вязкость, КДж/м <sup>2</sup> :	
0°.....	40–50
0°/90°.....	20–30
ЛКТР, 1/°C·10 <sup>-6</sup>	0,8

0° – однонаправленно армированный КМ; 0°/90° – ортогонально армированный КМ.

Развитие ГТД основывается на увеличении их коэффициента полезного действия и снижения уровня выделения вредных выбросов, в том числе NO<sub>x</sub>, СО. Одним из возможных способов решения этих задач является увеличение температуры газов на входе в турбину. Повышение температуры газов вынуждает применять эффективные способы охлаждения узлов и деталей, формирующих горячую часть, или разрабатывать и использовать новые термостойкие композиционные материалы.

Надо отметить, что максимальная температура, при которой возможно использование композиционных материалов со стекловидной матрицей, зависит от температуры размягчения самой матрицы. Композиционные

материалы со стеклокерамической и керамической матрицами могут быть использованы при более высоких температурах, чем температура формирования материала, т.к. уже произошла структурная трансформация кристаллической фазы, не испытывающей размягчения и термостабильной при более высоких температурах.

Разработанные в ВИАМ 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 могут использоваться без охлаждения в условиях высоких температур, вплоть до 1500°C с прогнозом дальнейшего повышения.

Формообразование изделий из созданного в ВИАМ композиционного материала с керамической матрицей на основе SiC проводится с помощью методов, используемых при получении изделий из полимерных композиционных материалов. Данный подход определяет достаточно хорошую изученность 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. 3) [2].

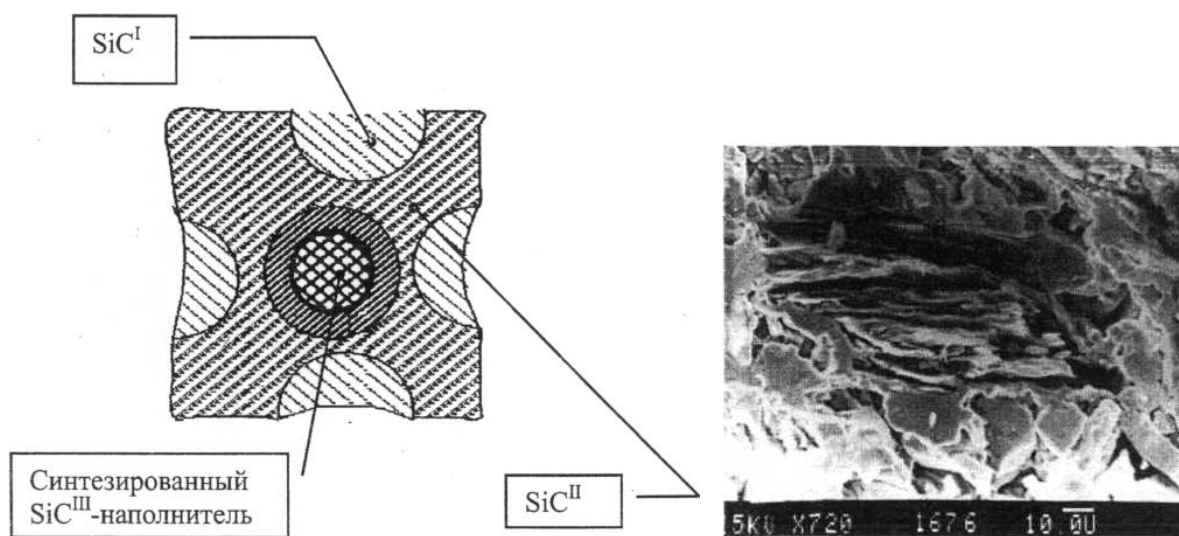


Рисунок 3. Теоретическая схема и экспериментальная микроструктура (РЭМ) керамического КМ

В настоящее время ведутся совместные работы с ЦИАМ и ЗМКБ «Прогресс» (Украина) по исследованию возможности применения и изготовления деталей камеры сгорания перспективных двигательных установок из КМ разработки ВИАМ. Эти работы позволили выявить, что, помимо перечисленных достоинств, отличительной особенностью керамического композиционного материала SiC–SiC, созданного в ВИАМ, является высокая стойкость (для традиционной керамики) в продуктах сгорания топлива при термоциклических нагрузках по режиму:  $1500^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 800\text{--}850^{\circ}\text{C}$  более 1000 циклов (1 цикл – 1 мин) без разрушения.

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 объема пор может вызывать снижение свойств материала. Однако, как показано на рис. 4, эти же структурные составляющие материала могут выступать в качестве барьера для возникающих микротрещин. Этот же эффект подтверждается и приведенными выше данными экспериментального

испытания КМ, который, в отличие от монолитной керамики, выдержал без разрушений и объемных изменений термоциклические воздействия. Создание регулируемой и управляемой структуры данного керамического композиционного материала служит одним из основных способов увеличения его трещиностойкости и прочностных характеристик.

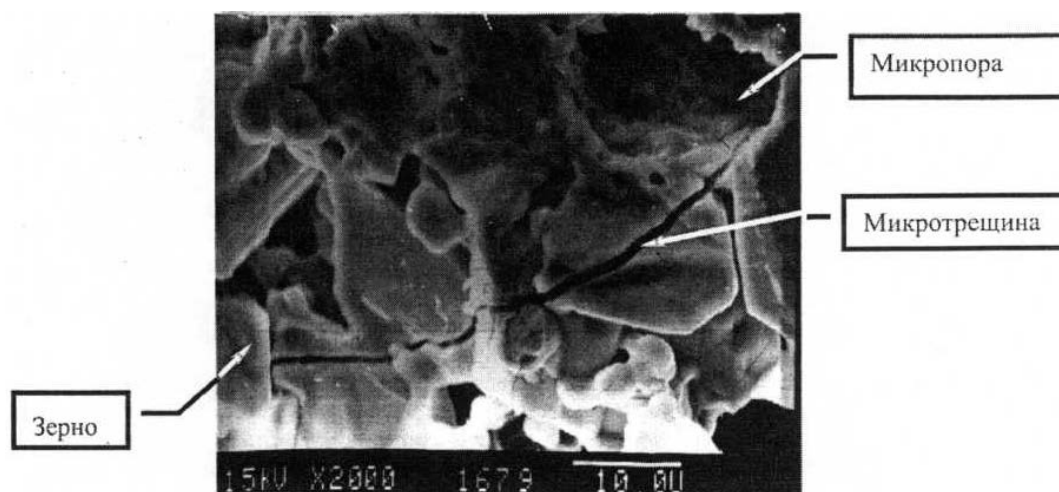


Рисунок 4. Эффект торможения микротрещины структурными элементами керамического КМ

Было отмечено, что при температурах до 1500°C деградация материала не наблюдается в течение длительного времени. Такое поведение материала, очевидно, может 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. Основные свойства КМ типа SiC–SiC [2] приведены ниже.

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

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

Применение новых стеклокерамических и керамических композитов для изготовления узлов и деталей газотурбинных двигателей, работающих в условиях повышенных температур, а также в условиях повышенного эрозионного износа и агрессивного воздействия среды (клапаны, втулки поршневых дозаторов топлива в двигательных установках), позволит повысить срок службы деталей в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными металлами, пластичность которых при ударах приводит к развальцовыванию деталей, и повысить КПД узлов на 15–20% за счет их малой инерционности, связанной с небольшим удельным весом (не более 3 г/см<sup>3</sup>) новых композитов. За рубежом проводятся исследования подобных материалов, применяемых для изготовления 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 других узлах и агрегатах, работающих при высоких температурах.

## **Список литературы:**

1. Солнцев С.С., Гращенков Д.В. Высокотемпературные композиционные материалы на стеклокерамических матрицах для перспективных изделий аэрокосмической техники // Сборник докладов на Третьем международном аэрокосмическом конгрессе, IAC2000.
2. Солнцев С.С., Гращенков Д.В., Горшков Л.А., Исаева Н.В. Экспериментальные исследования модельных образцов нового углеродкерамического композиционного материала применительно к перспективным двигательным установкам // Сборник статей ЦИАМ им. Баранова. 2001.
3. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Гращенков Д.В. Properties of carbonglassceramic composites // Сборник докладов на конференции СИМТЕС-2002 (Италия).
4. Солнцев С.С., Гращенков Д.В. Стеклокерамические композиционные материалы и перспективы их применения в авиационной и космической технике // Сборник тезисов докладов 6-го Международного научно-технического симпозиума «Авиационные технологии XXI века: новые рубежи авиационной науки». 2001.
5. Солнцев С.С., Гращенков Д.В., Наумова А.С., Солнцев С.С. Влияние состава и технологии формирования покрытия на свойства стеклокерамических композиционных материалов // Сборник трудов XIX Всероссийского совещания по температуроустойчивым покрытиям. 15–17 апреля 2003 г.