

## НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕПЛОЗАЩИТА

---

УДК 629.7:66.017

*Д.В. Гращенко<sup>1</sup>*

### **СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕПЛОЗАЩИТЫ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271

*Проведен анализ развития науки и технологий за рубежом. Показано, что для создания сложных технических систем различного назначения, в том числе нового поколения изделий авиационной и космической техники, двигательных и энергетических установок, в области материаловедения активно проводятся разработки металлических, керамических и металлокерамических композиционных материалов, а также функциональных теплозащитных, теплоизоляционных материалов и волокнистых компонентов на основе тугоплавких соединений и технологий их переработки. Приведены результаты разработок ФГУП «ВИАМ» в этой области материаловедения.*

**Ключевые слова:** *металлические, керамические и металлокерамические композиционные материалы; функциональные теплозащитные, теплоизоляционные материалы; тугоплавкие соединения.*

*D.V. Grashchenkov*

### **Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding**

*The article is presented analysis of development of science and technologies at abroad. There is shown that for creation of complex technical systems of different function, including new generation of products of aviation and space engineering, propulsion and energy units, in the field of materials science are actively developed metal, ceramic and ceramic-metal composite materials, and also functional heat-protective, heatinsulating materials and fibrous components on the basis of high-melting connections and technologies of their processing.*

---

<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

*Keywords: metal, ceramic and ceramic-metal composite materials; functional heat-protective, heatinsulating materials; high-melting connections.*

В настоящее время создание перспективных образцов техники только за счет конструктивной доработки изделий с использованием традиционных материалов не дает значительных результатов. Очевидно, что одним из условий достижения нового конструктивно-технологического уровня развития авиационной и космической техники с принципиально новыми эксплуатационными характеристиками является использование уже в ближайшем будущем материалов и технологий нового поколения [1, 2]. Так, применение высокотемпературных композиционных материалов с неорганической матрицей при создании авиационных двигателей позволит решать приоритетные задачи снижения эмиссии вредных выбросов в окружающую среду, увеличения топливной эффективности и повышения отношения тяги к весу двигателя до значений 20:1 [3].

В ведущих странах Евросоюза и США государственную поддержку с выделением бюджетного финансирования получают только те проекты, которые при создании новой перспективной техники предусматривают использование не менее 30% материалов нового поколения. Лидирующие мировые позиции в области создания и успешного применения высокотемпературных неметаллических материалов занимают следующие организации и научно-исследовательские лаборатории: General Electric Aircraft Engines (США), NASA (США), Snecma Moteurs (Франция), German Aerospace Center (DLR, Германия), Mitsubishi Heavy Industries Ltd (Япония), Rolls-Royce (Великобритания).

Разработки в области сверхвысокотемпературных композитов также активно проводятся в Японии, Китае и Индии. Научно-исследовательскими организациями в тесном сотрудничестве с промышленными предприятиями создаются прототипы и опытные образцы перспективных, в том числе высокоскоростных, летательных аппаратов и двигателей для них.

Одним из основных требований конструкторов, как правило, является применение в составе конструкции изделий высокоскоростных летательных аппаратов материалов, сочетающих малую плотность и высокие прочностные и теплофизические свойства при высоких рабочих температурах.

Несмотря на ряд уже решенных материаловедческих и технологических задач, основными техническими проблемами являются разработка и создание новых гетерогенных систем со значительно улучшенными служебными характеристиками, превышающими свойства традиционных материалов. Помимо повышения прочностных и теплофизических свойств, новые высокотемпературные материалы должны обеспечивать работоспособность систем при воздействии высоких температур и при этом они должны быть

легче традиционных материалов. Таким образом, требуется разработка широкой номенклатуры материалов — керамических, металлокерамических композиционных и теплозащитных, а также покрытий для них [4].

Зарубежный и отечественный опыт научно-исследовательских работ в области высокотемпературных материалов показывает, что керамические и металлокерамические композиционные материалы находят применение в теплонагруженных узлах летательных аппаратов, обеспечивая экстремальные условия эксплуатации в эрозионных и окислительных потоках продуктов сгорания топлив и окружающей воздушной среды при ультравысоких температурах.

Так, применение высокотемпературных керамических материалов, работоспособных до 2000 К, позволит увеличить топливную эффективность двигателя путем повышения температуры газа на выходе из камеры сгорания (на входе в турбину), а также в 2–3 раза снизить массу деталей.

Следует отметить, что технология изготовления сегментных жаровых труб в России находится еще в стадии разработки, однако, как показывает анализ зарубежных данных, например, в немецком аэрокосмическом центре (DLR) модели камеры сгорания с облицовочными керамическими сегментами успешно прошли тестовые испытания и могут быть рекомендованы к применению в перспективных самолетах. В 2013 г. компанией General Electric продемонстрирован демонстратор адаптивного двигателя ADVENT (ADaptive Versatile ENgine Technology), предназначенный в том числе для реактивных самолетов шестого поколения, которые потребляют на 25% меньше топлива, имеют на 10% бóльшую тягу в сравнении с существующими двигателями, что в совокупности может увеличить дальность полета изделия на 30%.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» проводится комплекс научно-исследовательских работ в соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030», которые разработаны с учетом приоритетных направлений и критических технологий развития науки и технологий в России, а также инновационных программ интегрированных структур, таких как ПАО «ОАК», АО «ОДК», АО «Вертолеты России» и др. [5]. Все исследования систематизированы по 18 направлениям, семь из которых непосредственно связаны с разработкой высокотемпературных материалов и покрытий:

- Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль;
- Компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции;
- Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций;

- Металломатричные и полиматричные композиционные материалы;
- Высокотемпературные керамические, теплозащитные и керамоподобные материалы;
- Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия;
- Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия.

Следует отметить, что основные принципы создания материалов нового поколения базируются на неразрывности материалов, технологий и конструкций, включая реализацию полного жизненного цикла (с использованием IT-технологий), – от создания материала до его эксплуатации в конструкции, продления ресурса и утилизации. Безусловно, все инновационные разработки в области материалов нового поколения основаны на результатах фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований, полученных совместно с институтами РАН и ведущими вузами.

Одним из примеров такой успешной интеграции является научно-техническое сотрудничество между представителями отраслевой, академической и вузовской науки. В области фундаментально-ориентированных, поисковых и прикладных исследований высокотемпературных материалов ФГУП «ВИАМ» активно сотрудничает с такими организациями, как ФГУП «ЦИАМ», ФГУП «ЦАГИ», ИОНХ РАН, ИПМех РАН, ВЦ РАН, РХТУ им. Д.И. Менделеева, МГТУ им. Н.Э. Баумана и др. Следует отметить, что благодаря такому сотрудничеству создан комплекс термостойких керамических и металлокерамических композиционных материалов, которые работоспособны при температурах вплоть до 2500°C.

Композиционные материалы с карбидокремниевой матрицей систем C–SiC и SiC–SiC обладают высокой трещиностойкостью, однако их использование при температуре >1650°C в кислородсодержащей среде ограничено вследствие недостаточной жаростойкости. Создание материалов, которые должны обеспечивать стабильную работоспособность при температурах >1500°C возможно с применением более высокотемпературной матрицы – например, на основе нитридов, боридов, карбидов гафния и/или циркония, а также высокотемпературного антиокислительного покрытия. При этом для получения керамических изделий авиационного назначения с высокой трещиностойкостью необходимо введение в состав керамических материалов высокотемпературных волокон – например, SiC, HfC и др. [6].

В настоящее время при разработке керамических материалов и покрытий нового поколения используют новые, в том числе нетрадиционные, технологические подходы. Одним из новейших технологических процессов, освоенных во ФГУП «ВИАМ при синтезе высокотемпературной керамики и

для получения изделий из таких композитов, является метод искрового плазменного спекания (Spark Plasma Sintering — SPS). SPS-спекание — перспективная технология получения керамических и стеклокерамических композиционных материалов, основанная на прохождении импульса постоянного тока непосредственно через заготовку из порошка. При этом генерируются очень высокие скорости нагрева и охлаждения — до  $600^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Данный метод позволяет достичь 100% уплотнения заготовки при более низких температурах и меньшей продолжительности процесса, чем при обычном обжиге или горячем прессовании, что позволяет исключить нежелательный рост зерен матрицы и деградацию наполнителя во время формообразования. Кроме того, с точки зрения энергоэффективности — SPS-спекание экономически более выгодная технология по сравнению с традиционными методиками.

Внедрение и освоение нового высокоэффективного метода искрового плазменного спекания (SPS) способствовали разработке новых керамических и стеклокерамических материалов с требуемым уровнем свойств [7]. Так, создан новый высокотемпературный керамический композиционный материал с прочностью  $>400$  МПа, микротвердостью  $>20$  ГПа и рабочей температурой  $>2000^{\circ}\text{C}$ .

Введенная в институте в эксплуатацию установка с комбинированным нагревом (FAST/SPS+индукционный нагрев) позволяет получать беспористые материалы (плотность материала близка к теоретической) при более низких температурах и меньшей продолжительности процесса, чем при обычном обжиге или горячем прессовании. При этом применение гибридного метода FAST/SPS позволяет в полной мере реализовать потенциал керамических композитов не только на основе токопроводящих материалов, но и на основе тугоплавких оксидов и боридов, являющихся диэлектриками.

Для обеспечения многофункциональной тепловой защиты летательных аппаратов требуется разработка технологий получения волокон тугоплавких соединений с рабочими температурами до  $2300^{\circ}\text{C}$ . Важным достоинством волокнистых теплозащитных и теплоизоляционных материалов является то, что они обладают низкими плотностью и теплопроводностью, высокой стойкостью к окислению и могут быть использованы для облицовки поверхностей сложной формы.

Для изготовления волокнистых высокотемпературных материалов во ФГУП «ВИАМ» разработаны муллитокорундовые поликристаллические волокна химического состава  $80\%\text{Al}_2\text{O}_3 - 20\%\text{SiO}_2$  диаметром  $0,8 - 1,5$  мкм и длиной от  $0,5$  до нескольких миллиметров. На основе данных волокон разработан ряд гибких волокнистых теплозащитных материалов с рабочей температурой до  $1700^{\circ}\text{C}$  с плотностью  $80 - 200$  кг/м<sup>3</sup> и критическим

радиусом изгиба от 140 до 250 мм в зависимости от плотности. Разработан также жесткий теплозащитный материал с плотностью 300 кг/м<sup>3</sup> и рабочей температурой 1700°С, имеющий предел прочности при сжатии 0,3–0,6 МПа. С использованием сочетания муллитокорундовых и кварцевых волокон получены волокнистые материалы повышенной прочности с плотностью 500 и 1000 кг/м<sup>3</sup>, с рабочей температурой 1550°С и пределом прочности при сжатии 10–20 МПа.

В настоящее время ведется разработка дискретных волокон тугоплавких соединений – оксидов циркония и гафния. На основе этих соединений разрабатываются материалы с температурой эксплуатации вплоть до 2200°С и выше. Совершенствуется технология получения непрерывных волокон на основе оксида алюминия, ведутся работы по созданию непрерывных волокон оксида циркония.

Среди перспективных высокопрочных и высокомодульных материалов особое место занимают волокнистые металлокерамические композиционные материалы, обладающие низкой плотностью, высокой температурой эксплуатации, коррозионной и эрозионной стойкостью, высоким сопротивлением зарождению и росту трещин [8].

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» проводится комплекс научно-исследовательских работ по разработке и освоению металлокерамических композиционных материалов на основе титанового сплава или интерметаллида титана и технологии изготовления деталей из них. Данный материал предназначен для изготовления силовых тяг, болтовых соединений, деталей типа шпилька и корпус замка, элементов конструкций систем управления и силового набора, крыла, спецпрофиля и др. Разрабатываемый материал работоспособен при температурах до 900°С при плотности на 20–30% меньше и прочностными свойствами на 40–70% выше матричного аналога. Так, при комнатной температуре прочность композита превышает 1700 МПа, модуль упругости >200 ГПа. При температуре 900°С – прочность превышает 800 МПа, модуль упругости >125 ГПа.

Для листовых заготовок, элементов продольной и поперечной части силового каркаса проводятся работы, связанные с разработкой композиционных материалов на основе высокопрочных алюминиевых сплавов. Разрабатываемый материал работоспособен при температурах до 300°С и обладает механическими характеристиками на 30–50% выше матричного аналога при сопоставимой плотности. Так, прочность при комнатной температуре превышает 700 МПа, модуль упругости >115 ГПа. При температуре 300°С прочность превышает 135 МПа, модуль упругости >80 ГПа.

Одними из перспективных высокотемпературных металлокерамических композиционных материалов являются материалы на основе систем Nb–Si и Mo–Si, армированные частицами и волокнами тугоплавких

соединений. Рабочая температура таких материалов достигает  $1400^{\circ}\text{C}$  без дополнительного охлаждения. Композиционные материалы на основе ниобиевой матрицы при плотности не более  $7400\text{ кг/м}^3$  обладают прочностью при комнатной температуре  $450\text{--}500\text{ МПа}$ , ударной вязкостью  $7\text{--}11\text{ кДж/м}^2$ . Гетерогенная металлокерамика на основе молибденовой матрицы при плотности не более  $9000\text{ кг/м}^3$  обладает прочностью при комнатной температуре  $300\text{--}400\text{ МПа}$ , ударной вязкостью  $5\text{--}8\text{ кДж/м}^2$ .

Для сопловых элементов летательного аппарата разрабатываются жаропрочные композиты на основе интерметаллидов никеля ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{NiAl}$ ) с плотностью не более  $7500\text{ кг/м}^3$  на рабочие температуры до  $1400^{\circ}\text{C}$ , упрочненных тугоплавкими оксидами. В настоящее время разработаны материалы на основе интерметаллидного сплава ВКНА-4У, армированные частицами оксида алюминия, с плотностью  $8400\text{ кг/м}^3$  и прочностью при комнатной температуре  $900\text{--}1000\text{ МПа}$ . Завершается разработка высокожаростойкого дисперсноупрочненного материала на основе системы  $\text{Fe}\text{--}\text{Cr}\text{--}\text{Al}$ , армированного наноразмерными частицами оксида иттрия, с плотностью  $7400\text{ кг/м}^3$  и прочностью при комнатной температуре  $600\text{--}700\text{ МПа}$ .

Разработки ФГУП «ВИАМ» за последние пять лет в области высокотемпературных керамических, металлокерамических композитов и теплозащитных материалов полностью обеспечили выполнение задач, сформулированных к 2016 г. в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Перспективные высокотемпературные керамические

композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.

7. Гращенко Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Особенности спекания тугоплавкой керамики на основе  $\text{HfB}_2$  методом искрового плазменного спекания // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. Вып. 3. С. 162–169.
8. 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: 25.06.2016).