



УДК 677.071.25

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АРМИРУЮЩИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛОКНА ДЛЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Е.Н. Каблов

доктор технических наук, академик РАН

Б.В. Щетанов

доктор технических наук

Ю.А. Ивахненко

Ю.А. Балинова

Февраль 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – 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 тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех 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 «Авиационные материалы и технологии», №2, 2005 г.

Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, Ю.А. Ивахненко, Ю.А. Балинова

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АРМИРУЮЩИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛОКНА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены современное состояние проблемы производства и перспективы применения армирующих волокон для металлических и керамических композиционных материалов (КМ). Описаны свойства волокнупроченных композитов с различными матрицами и волокна, которые целесообразно применять для каждого типа КМ. Приведены области применения керамических и металлических композитов.

Ключевые слова: *композиционный, материал, авиация, волокна, металлический, керамический, температура, прочность.*

E.N. Kablov, B.V. Schetanov, Yu.A. Ivakhnenko, Yu.A. Balinova

PERSPECTIVE REINFORCING HIGH-TEMPERATURE FIBRES FOR METAL AND CERAMIC COMPOSITE MATERIALS

Current state of production and prospect of application reinforcing fibers for metal and ceramic composite materials (CM) are considered. Properties of various matrix composites and fibers for each type of CM are described. Fields of application of ceramic and metal composites are given.

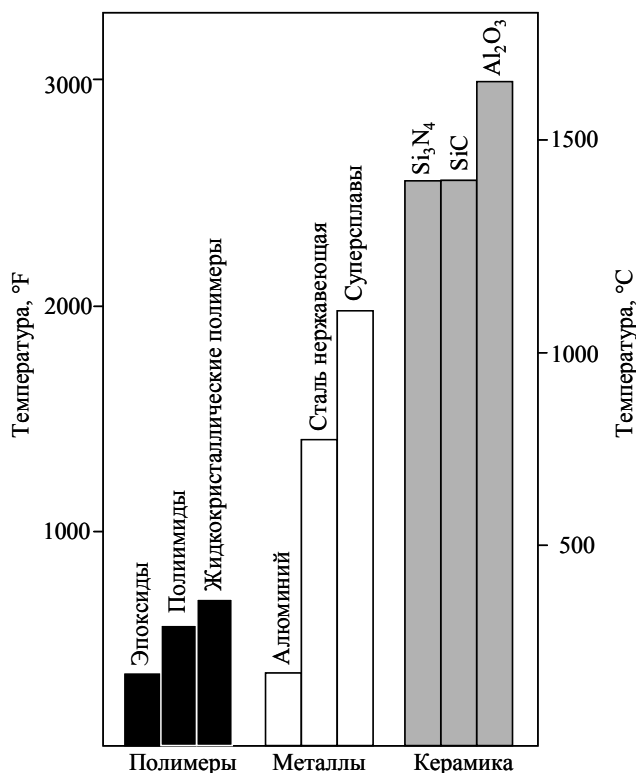
Keywords: *composite, material, aviation, fibers, metal, ceramic, temperature, strength.*

Наличие композиционных материалов – полимерных, керамических и металлических – является ключевым моментом при разработке перспективных систем для турбовинтовой и гиперзвуковой авиации. Развитие так называемых высокоэффективных искусственных волокон, имеющих высокую прочность, жесткость, термостойкость, позволит создать новую генерацию КМ.

В том случае, когда термостойкость и прочность материала не являются критическими факторами, используются относительно дешевые полимерные (акрилаты, эпоксиды, поликарбонаты) и металлические материалы (алюминий, сталь, медь, вольфрам). Однако когда высокая эффективность является контролирующим фактором применения материала (аэрокосмическая отрасль, подводные суды), необходимы перспективные материалы с их высокой прочностью, жесткостью, низкой плотностью и высокой стойкостью в агрессивной атмосфере. Традиционные металлические, полимерные и керамические материалы не удовлетворяют многим из этих требований. На рисунке приведены ориентировочные температурные пределы использования различных структурных материалов [1].

Использование волокон приводит к возрастанию прочности и жесткости КМ в направлении оси волокна в десятки раз по сравнению со свойствами материала монолитной формы при одном и том же химическом составе. При этом упрочнение матрицы длинными волокнами будет заведомо больше, чем ее упрочнение частицами и короткими волокнами типа нитевидных кристаллов («усов»). Этим и обусловлен интерес к непрерывным высокоэффективным волокнам.

Высокоэффективные искусственные волокна, к которым относят в первую очередь волокна на основе карбида кремния, углеродные, борные, на основе оксида алюминия и ряд других, представляют в настоящее время основную область разработок волоконной индустрии. Данные волокна имеют свои особенности, которые и обуславливают их применение. Так, бескислородные углеродные волокна сохраняют свою прочность в области сверхвысоких температур при условии отсутствия контакта с кислородом. Полимерные волокна имеют низкую температуру



Максимальная температура применения различных конструкционных материалов

применения, но при этом они легче углеродных и керамических волокон и радиопрозрачны. Керамические волокна устойчивы в окислительной атмосфере, но теряют свою прочность при высоких температурах.

Введение волокон в высокотемперостойкие сплавы повышает стойкость последних к высокотемпературной ползучести, введение в керамические материалы – повышает трещиностойкость. Кроме этого, важными причинами выбора КМ, при равных с традиционным материалом механических характеристиках, является более низкая плотность КМ и возможность относительно простого введения в него сенсоров и оптических волокон для контроля нагрузок и повреждений материала при его эксплуатации.

Суммируя вышесказанное, можно отметить, что волоконноупрочненные КМ отличаются высокими значениями модуля упругости и прочности, низкой плотностью, возможностью контроля жесткости, термического расширения и электропроводности, высокой стойкостью к коррозии и высокотемпературной ползучести, возможностью создания интеллектуальных материалов.

Новая область применения таких материалов – гиперзвуковая авиация – может потребовать дальнейшего прогресса в улучшении характеристик волокон. При температурах эксплуатации существующие волокна отличаются значительным ростом зерна и окислением, что приводит к снижению модуля и прочности, возрастанию ползучести, термического расширения и к взаимодействию с матрицей.

Следует отметить, что для развития работ по волоконноупрочненным КМ необходимо наличие отечественной базы перспективных волокон, играющих ключевую роль в производстве КМ, – существование такой базы зависит от долгосрочной поддержки исследований со стороны Правительства.

Различные типы волокон могут обсуждаться на основании классификации по температурам применения матрицы. Различают полимерные матрицы с температурой применения до 425°C, металлические – с температурой применения 815–1370°C и керамические – с температурой применения 1100–1650°C.

Использование металла в качестве матрицы позволяет передать конечному композиту такие важные свойства, как прочность и жесткость при растяжении (в продольном и поперечном направлении) и при сдвиге. Например, алюминий, упрочненный волокнами бора, демонстрирует прочность, равную прочности неармированной матрицы, и поперечную жесткость, в два раза превышающую жесткость матрицы. Кроме этого, важны также электрические и термические характеристики композита, сходные с характеристиками матрицы. Положительным моментом является возможность использования традиционного

оборудования для получения металлических композиционных материалов (МКМ). С другой стороны, значительные сложности при производстве МКМ вызывают высокая температура их получения и взаимодействие волокна и матрицы, приводящие к деградации их свойств. Кроме того, различное термическое расширение волокна и матрицы приводит к разрушению композита при термоциклировании. Наконец, композит может иметь меньшую коррозионную стойкость, чем матрица, вследствие изменения микроструктуры композита и разницы электрохимического потенциала волокно–матрица.

Потребности рынка в МКМ непредсказуемы. Сравнить «статус» МКМ в разных странах сложно, вследствие того что основная деятельность ученых сосредоточена на стадии разработки и информация об этих разработках широко не публикуется.

Для аэрокосмического применения США разработали подкосы фюзеляжа для Space Shuttle. Советский Союз приложил значительные усилия в двух областях – разработке боралюминия и SiC-упрочненного титана. Европейский аэрокосмический консорциум разрабатывает МКМ с титановой матрицей, армированной волокнами SiC производства British Petroleum.

В Японии объединение усилий правительства и промышленности привели к широкому применению МКМ для поршней двигателей внутреннего сгорания (фирма «Тойота»). Кроме того, это объединение имеет своей целью развитие высокотемпературных волокон и композитов для гиперзвуковой авиации.

Будущее МКМ связано с их значительным превосходством над монокристаллическими металлическими и полимер-матричными системами. Для высоконагруженных конструкций стальные части могут быть заменены МКМ на титановой матрице. Применение МКМ для частей турбины, эксплуатирующихся при температуре выше 500°C, вместо используемых в настоящее время суперсплавов позволит кардинально снизить массу изделия и повысить эффективность.

Основные проблемы в развитии высокоэффективных МКМ связаны с упрочняющими волокнами. Главной из них является взаимодействие волокна и матрицы при высоких температурах получения и эксплуатации МКМ, что требует дополнительных усилий по разработке защитных покрытий на волокна и значительно повышает трудоемкость получения волокна и его стоимость.

Введение волокон в керамическую матрицу приводит к получению конструкционного керамического материала, который, сохраняя важные свойства керамики – такие как высокотемпературная стабильность и стойкость к воздействию окружающей среды, – при этом снижает хрупкость материала. Превосходная термостабильность керамических ком-

позиционных материалов (ККМ) по сравнению с ПКМ и МКМ делает их уникальными для высокотемпературного применения, – например для таких деталей, как форсунки сгорания турбин. Сочетание химической стойкости, относительно низких плотности и стоимости делают ККМ очень привлекательными для многих потенциальных применений.

Кроме конструкционного применения, существует много областей, где требуются специальные свойства КМ, такие как электрические и электромагнитные, теплопроводность, коррозионная стойкость в агрессивной среде и др. [1].

В настоящее время существует ряд фирм, производящих волокна для перспективных КМ (см. таблицу 1).

Таблица 1

Высокоэффективные волокна для МКМ и ККМ [2, 3, 4]

Производитель	Марка волокна	Состав (содержание элементов, %)	Плотность, г/см ³	Диаметр, мкм	<i>E</i>	σ_b	<i>T</i> _{max} , °С
					ГПа		
Nippon-Carbon	Nicalon NL200	57 Si; 31 C; 12 O	2,55	14	220	3,0	≤1300
	Hi Nicalon	62 Si; 32 C; 0,5 O	2,74	14	270	2,8	≤1400
	Hi Nicalon-S	68,9 Si; 30,9 C; 0,2 O	3,10	12	420	2,6	≤1400
Textron	SCS-6	SiC на C	3,0	140	390	4,0	≤1400
3M	Nextel 650	89 Al ₂ O ₃ ; 10 ZrO ₂ ; 1 Y ₂ O ₃	4,1	10–12	358	2,5	1080
	Nextel 720	85 Al ₂ O ₃ ; 15 SiO ₂	3,4	10–12	260	2,1	1150
	Nextel 610	99 Al ₂ O ₃	3,88	14	373	2,93	1000
CeraFib GmbH	CeraFib 99	99 Al ₂ O ₃	-	9-11	>300	> 2,0	1200-1350
	CeraFib 75	75 Al ₂ O ₃ , 25 SiO ₂					
Saphikon	Saphikon	100 Al ₂ O ₃	3,96	125	470	3,5	1250

Следует особо отметить, что достижение высоких механических характеристик вышеприведенных волокон стало возможным вследствие выполнения специальных долгосрочных государственных программ, объединяющих усилия правительства, промышленности и науки. Так, в США, благодаря государственной поддержке, за десять лет удалось повысить прочность волокон Nextel 610 почти в два раза [3].

В последние годы в России также предпринимаются определенные усилия по введению долгосрочных государственных программ, направленных на восстановление производств армирующих волокон, таких как SiC, Al₂O₃, разработку КМ на их основе. В настоящее время в ВИАМ производит поликристаллические дискретные и непрерывные волокна Al₂O₃ – муллит [5] для высокотемпературных керамических матриц, ведутся работы по созданию армирующих волокон состава 99% Al₂O₃ для композитов с металлической матрицей [6]

ЛИТЕРАТУРА

1. High-performance synthetic fibers for composite. Report of the Committee on High-performance Synthetic Fibers for Composite.– Washington: Publication NMAВ-458 National Academy Press, 1992, 144 p.
2. Ceramic fibers and coatings. Advanced materials for the twenty first century. Report of the Committee on Advanced Fibers for Hi-Temperature Ceramic Composites.– Washington: Publication NMAВ-494 National Academy Press, 1998, 110 p.
3. Wilson D. M., Visser L. R. High-performance oxide fibers for metal and ceramic Composites //Processing of Fibers & Composites Conference.– Barga (Italy), 2000 (May 22), 31 p.
4. CeraFibGmbH: [сайт]. – D., – Режим доступа <http://www.cerafib.de/>
5. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В., Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе волокон тугоплавких соединений: Сб. ст. к 80-летию ВИАМ. – М.: ВИАМ, 2012 – С. 380-385.
6. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон α -Al₂O₃. // Авиационные материалы и технологии. – 2012 – №1.– С. 13-17.