

# КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

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

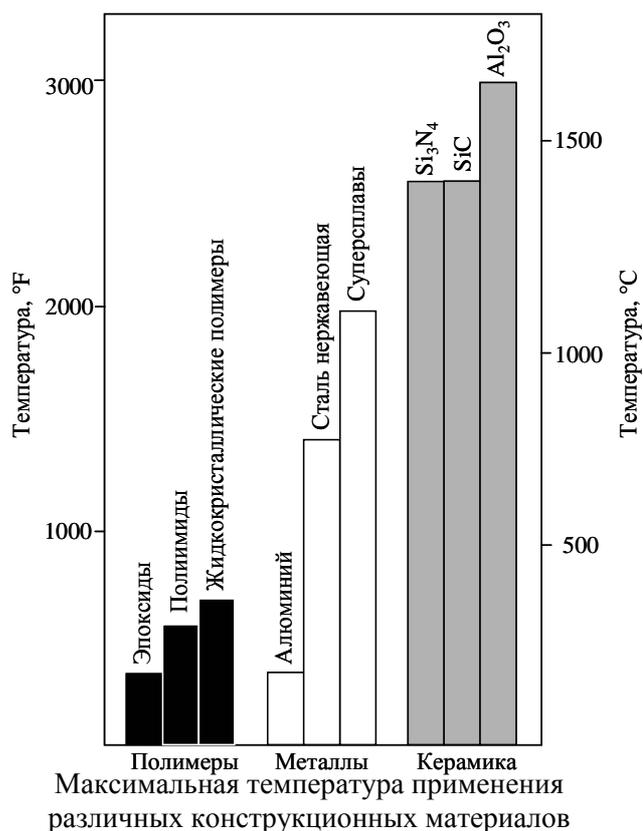
## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АРМИРУЮЩИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛОКНА ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наличие композиционных материалов (КМ) – 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 сосуды), 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 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 высокотермостойкие 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 высокотемпературные стабильность и стойкость к воздействию окружающей среды, – при этом снижает хрупкость материала. Превосходная термостабильность керамических композиционных 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).

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

Производитель	Марка волокна	Состав (содержание элементов, %)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Диаметр, мкм	<i>E</i>	$\sigma_b$	<i>T</i> <sub>max</sub> , °C
					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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 10 ZrO <sub>2</sub> ; 1 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1	10–12	358	2,5	1080
	Nextel 720	85 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 15 SiO <sub>2</sub>	3,4	10–12	260	2,1	1150
	Nextel 610	>99 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,88	14	373	2,93	1000
Saphikon	Saphikon	100 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, разработку КМ на их основе.

#### 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.