

Лекция 4

Композиционные материалы

Традиционно применяемые металлические и неметаллические материалы в значительной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Вместе с тем развитие современной техники требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высоких давлений. Зачастую требования, предъявляемые к материалам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов.

Общая характеристика и классификация

Композиционным материалом (КМ), или *композитом* называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых (в пределе – химически не взаимодействующих) компонентов, строение которой позволяет использовать преимущества (свойства) каждого из них. В отличие от многих гетерогенных сплавов, подавляющее число КМ находятся в термодинамически неравновесном состоянии.

Принцип построения КМ человек заимствовал у природы. Типичными композиционными материалами являются стволы деревьев, стебли растений, кости человека и животных.

КМ позволяют иметь заданное сочетание разнородных (часто взаимоисключающих друг друга в равновесном состоянии) свойств, которые нельзя достичь в металлических сплавах: высокой удельной прочности и жесткости, жаропрочности, износостойкости, теплозащитных свойств и др. В результате применение КМ дает возможность создавать ранее недоступные, принципиально новые конструкции.

Благодаря КМ стал возможен новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей при уменьшении их массы, снижении габаритов и массы различных силовых конструкций, повышении весовой эффективности транспортных средств и авиационно-космических аппаратов, повышении энергоэффективности ограждающих конструкций и др.

Важными характеристиками КМ, работающих в указанных применениях, являются удельная прочность σ_B/ρ и удельная жесткость E/ρ , где σ_B - временное сопротивление

разрыву, E - модуль нормальной упругости, ρ – плотность материала. Как видно из рис. 4.1, по этим параметрам композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы.

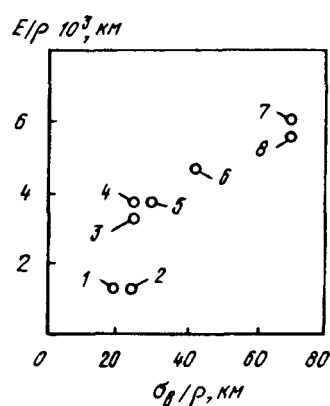


Рис. 4.1. Взаимосвязь удельной прочности и удельного модуля упругости некоторых металлических материалов и КМ, армированных волокнами (до 50 об.%): 1 - алюминий; 2 - титан и сталь; 3 - титан, армированный бериллиевой проволокой; 4 - титан, армированный волокнами SiC; 5 - титан, армированный волокнами борсика (SiC/B/W); 6 - алюминий, армированный борными волокнами; 7 - эпоксидная смола, армированная волокнами графита; 8 - эпоксидная смола, армированная борными волокнами

КМ, используемые в силовых конструкциях, обычно состоят из двух компонентов - сравнительно пластичного материала (матрицы) и более твердых и прочных дисперсных компонентов (наполнителей). Свойства КМ зависят от свойств матрицы, наполнителей и прочности связи между ними.

Матрица связывает композицию в монолитный материал, придавая ей форму, и служит для передачи внешних нагрузок к прочным наполнителям. В зависимости от материала матрицы различают следующие виды КМ: с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной - полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической - керамические композиционные материалы (ККМ).

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, которые часто называют *упрочнителями*. Последние имеют высокие значения прочности, твердости и модуля упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на *дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые* (рис. 4.2).

В дисперсноупрочненные КМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др. твердых

веществ, которые не взаимодействуют с матрицей и не растворяются в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние

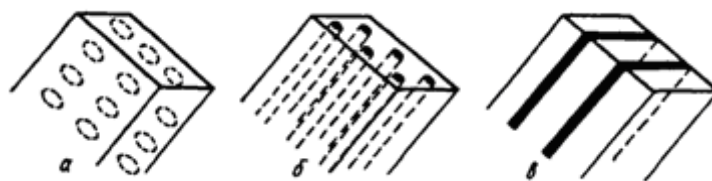


Рис. 43. Схематическое изображение дисперсноупрочненных (а), волокнистых (б) и слоистых (в) КМ

между ними, тем прочнее КМ. В отличие от волокнистых, в дисперсноупрочненных КМ основным несущим элементом является матрица. Ансамбль дисперсных частиц наполнителя упрочняет материал (затрудняет пластическую деформацию) за счет сопротивления движению дислокации при действии нагрузки. Эффективное сопротивление движению дислокации создается вплоть до температуры плавления матрицы, благодаря чему дисперсноупрочненные КМ характеризуются высокими значениями жаропрочности и сопротивления ползучести.

Упрочняющим наполнителем (арматурой) в волокнистых КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме рис. 43а. Прочность и жесткость таких материалов определяются свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование волокнами дает более прочные КМ, но дисперсное упрочнение технологически легче и дешевле.

Слоистые композиционные материалы (рис. 43б) получают из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа сэндвич-структуры). Слои наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно также использование чередующихся слоев наполнителей из разных материалов, обладающих разными механическими свойствами. Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы.

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен КМ.

Дисперсно-упрочненные КМ. При дисперсном упрочнении частицы твердого наполнителя блокируют процессы движения дислокаций в матрице. Эффективность

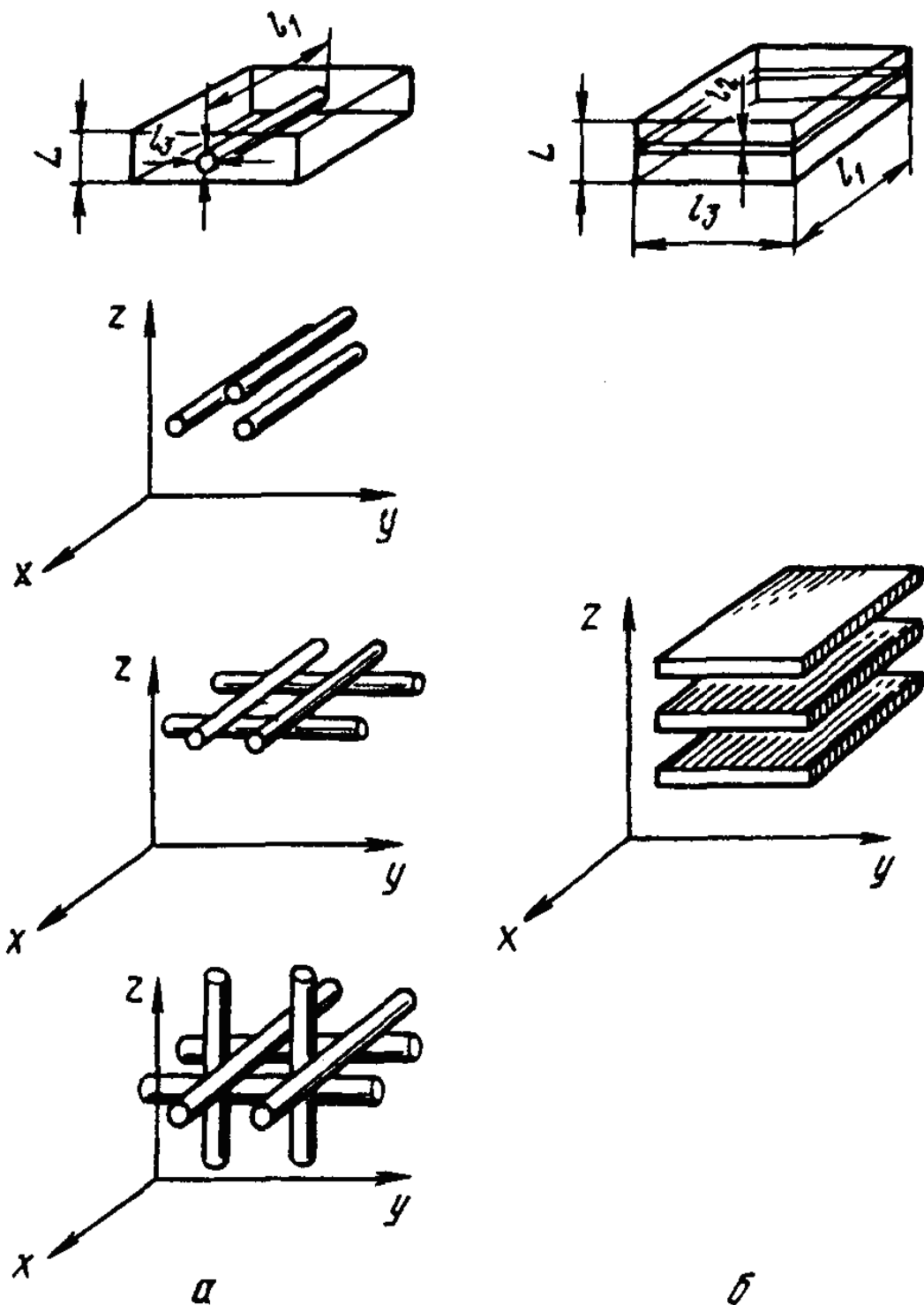


Рис. 4.3. Схематическое изображение армирования волокнистых (а) и слоистых (б) КМ

упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их формы и объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC и др., имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. Дисперсно-упрочняемые КМ обычно получают методами порошковой металлургии, важным преимуществом

которых является изотропность свойств в различных направлениях.

В промышленности распространены дисперсноупрочненные КМ на алюминиевой и никелевой основах. Характерными представителями этого вида композиционных материалов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера не более 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает в себя холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки через фильеры (формы) для получения готовых изделий, которые затем можно подвергать дополнительной термической обработке.

КМ из САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии при практически любом содержании упрочнителя. КМ с содержанием Al_2O_3 не выше 6 - 9 об.% могут деформироваться при комнатных температурах. Из таких КМ можно получить холодным волочением фольгу толщиной до 30 мкм. Эти материалы также хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Марки САП обычно содержат 6 - 23 % Al_2O_3 : САП-1 содержит 6-9 об. % Al_2O_3 , САП-2 - с 9 до 13, САП-3 с 13 до 18. При увеличении объемного содержания оксида алюминия прочность КМ возрастает. При комнатной температуре характеристики прочности КМ типа САП следующие: для САП-1 $\sigma_B = 280$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220$ МПа; для САП-3 $\sigma_B = 420$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340$ МПа.

КМ типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят по этому параметру все деформируемые алюминиевые сплавы. Даже при температуре 500 °С они имеют σ_B не ниже 60 - 110 МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц оксида алюминия на процесс рекристаллизации.

Характеристики прочности КМ типа САП весьма стабильны. Испытания САП-3 в течение двух лет показали практическую неизменность свойств как при комнатной температуре, так и при нагреве до 500 °С. При 400 °С прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов.

Влияние температуры испытаний на механические свойства КМ типа САП показана в Таблице 4.1. КМ типа САП применяют в энергетике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, которые работают при температурах до 300 - 500 °С. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки

тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

Таблица 4.1. Прочностные характеристики КМ типа САП при разных температурах испытания

$T_{исп}, ^\circ C$	20	100	200	300	400	500
$\sigma_{0,2}, МПа$	265	235	190	155	120	105
$\sigma_B, МПа$	380	315	235	175	130	105
$\delta, \%$	7,0	6,5	5,0	3,5	2,0	2,5

Волокнистые КМ. Наиболее важным критерием выбора матричного материала для волокнистых КМ служит рабочая температура его эксплуатации. Для КМ, применяемых при температурах ниже 200 °С, используют полимерные матрицы. К таким композитам относятся стеклопластики, армированные короткими стеклянными волокнами в матрице из полиэфирной смолы. Стеклопластики применяют для изготовления корпусов автомобилей, а также некоторых типов приборов. В качестве матриц также используют термореактивные полимеры, в которых поперечные связи между основными цепями формируют жесткую структуру с трехмерной сеткой. Такими полимерами являются эпоксидные смолы, которые благодаря поперечным связям имеют более высокую термостойкость. При изготовлении такого рода КМ волокна подвергают поверхностной обработке, улучшающей адгезию, и протягивают через ванну с полимерной смолой. Смола скрепляет волокна в ленты, которые собирают затем в слоистый (подобный фанере) листовой материал или же наматывают в более сложные формы. Собранный в листы или намотанный материал отверждается путем термообработки. Слои можно укладывать с чередованием направления волокон (формируя в клетчатую структуру КМ), что придает материалу жесткость.

Недостатком таких простых слоистых КМ является возможность их расслоения вследствие отсутствия поперечного армирования в каждом отдельном слое и между слоями, поскольку трещины, формирующиеся в объеме такого КМ, легко распространяются между слоями. Для устранения этих недостатков и изготавливают КМ с тканым армированием.

Для работы при более высоких температурах применяют металлические матрицы с малой плотностью - алюминий, магний, титан. Металлические КМ обладают рядом преимуществ перед полимерными. Помимо более высокой рабочей температуры они характеризуются лучшей изотропией и большей стабильностью свойств в процессе эксплуатации, более высокой эрозионной стойкостью.

Пластичность металлических матриц сообщает конструкции необходимую ударную вязкость, способствующую быстрому выравниванию локальных механических нагрузок. Высокая теплопроводность металлических КМ предохраняет их от локальных перегревов, что особенно важно для таких изделий, как наконечники ракет, ведущие кромки крыльев и двигатели. Высокая электропроводность металлических КМ позволяет использовать их для защиты от электромагнитного излучения, молнии, снижает опасность статического электричества.

Важным преимуществом металлических КМ является высокая технологичность процесса изготовления, формовки, термообработки, формирования соединений и

Для наиболее высоких рабочих температур в качестве матричного материала используют некоторые виды керамик. При этом отсутствие у них пластичности частично компенсируется армирующими волокнами, тормозящими распространение трещин в керамике.

Использование в качестве матричного материала аморфного углерода, а в качестве армирующего материала - волокон из кристаллического углерода (графита) позволило создать композит, выдерживающий нагрев до 2500 °С. Недостаток углеродной матрицы состоит в возможном окислении и уносе массы с поверхности изделия потоком газов (абляции). Для предотвращения окисления и абляции такие КМ покрываются тонким слоем карбида кремния.

Помимо высоких прочности и жесткости основным требованием, предъявляемым к волокнам для КМ, является хорошее смачивание материала волокна расплавленной матрицей в процессе изготовления композита. Важными условиями являются слабое взаимодействие волокна с материалом матрицы и его высокая окислительная стойкость.

Для армирования металлических КМ обычно используют непрерывные волокна: углеродные (УВ), борные (В), оксида алюминия (Al_2O_3), карбида кремния (SiC), карбида бора (B_4C), нитрида бора (BN), диборида титана (TiB_2), оксида кремния (SiO_2). В качестве волокон для изготовления КМ часто применяют металлическую тонкую проволоку из стали, вольфрама, титана, молибдена и бериллия. Реже используют нитевидные, специально выращенные кристаллы разных материалов.

Наибольшее распространение для армирования металлических КМ получили непрерывные или дискретные углеродные и борные волокна. Свойства некоторых армирующих волокон приведены в табл. 4.2.

Таблица 42. Свойства армирующих волокон для КМ

Тип волокна	Основа	ρ , г/см ³	σ_B , ГПа	E, ГПа	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹
C	ПАН	1,7-2,0	1,7-3,2	170-517	-1,0 - -1,5
	Вискоза	1,6-1,8	0,6-3,2	400-525	
	Пек	2,0	1,1-2,1	380-700	-1,3
SiC	на W	3,15	3,1-3,4	420-450	3,8-5,0
	на УВ	3,05	3,45	400-420	
B	на W	2,49	3,52	400	4,8-5,0
	на УВ	2,25	3,32	380	
B-SiC	на W	2,50	2,9	400	4,9
Al ₂ O ₃		3,90	3,9-4,3	380-500	8,5

Композиты получают разными методами. Например, волокна на основе бора обычно получают его осаждением на нагретые тугоплавкие металлические нити (проволоки). Осаждение идет из газовой фазы при диссоциации галоидных соединений, например треххлористого бора BCl_3 , на основу из вольфрамовой нити толщиной 12 мкм, нагретой до 1100 - 1200 °С. В процессе осаждения (в течение 1-2 мин) бор диффундирует в вольфрамовую основу, образуя бориды вольфрама на волокне. Общий диаметр борного волокна достигает 100 - 150 мкм. Строение композиционного материала в виде ленты толщиной 0,5 мм, содержащей волокна бора в алюминиевой матрице, показано на рис. 4.5.

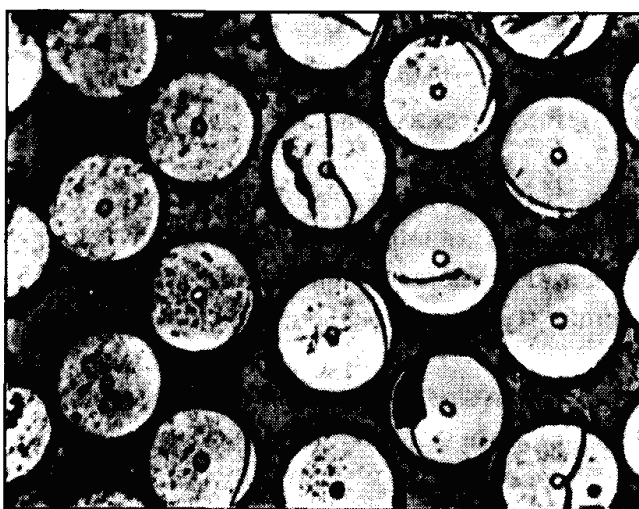


Рис. 4.5. Микрофотография КМ типа алюминий-бор

Сырьем для получения высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон служат такие полимеры с высоким содержанием углерода, как полиакрилонитрил (ПАН) и

реже - пек и вискоза. Волокно типа ПАН выдавливают через фильеры малого диаметра и затем подвергают пиролизу в инертной атмосфере при температуре около 2000 °С. Углеродные волокна выпускают в виде нитей, содержащих до 10000 элементарных волокон диаметром порядка 7 мкм. Модуль упругости и прочность таких волокон сохраняются неизменными при нагреве до 600 °С.

Еще одним способом получения волокнистых КМ является пропитка пучка волокон жидкими расплавами металлов с низкими температурами плавления (например, алюминия и магния), плазменное напыление, горячее прессование иногда с последующей гидроэкструзией или прокаткой заготовок. При армировании непрерывными волокнами сэндвич-композиций типа, состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, применяют прокатку, горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку.

Отливку прутков и труб, армированных высокопрочными волокнами, получают из жидкометаллической фазы. В случае изготовления полимерного КМ пучок волокон непрерывно протягивается через ванну с жидким веществом (алюминий, магний или смола), где он пропитывается под давлением. При выходе из пропиточной ванны волокна соединяются и пропускаются через фильеру, формирующую прутки или трубу. Этот метод обеспечивает высокое наполнение композита волокнами (до 85 %), их однородное распределение в поперечном сечении и непрерывность процесса.

Для многих видов волокон разработаны технологические процессы нанесения покрытий для обеспечения их лучшей смачиваемости, оптимального взаимодействия волокна с матрицей, а также стойкости к окислению (для предотвращения образования окалины). Например, борные волокна (типа *борсик*) защищаются от химического взаимодействия с расплавами титана и алюминия путем создания на поверхности диффузионного барьера из карбидов кремния или бора. Из-за высокой окислительной способности углеродных волокон на их поверхность также наносят специальные покрытия, а процессы переработки осуществляют в защитной атмосфере.

Углеродные волокна имеют отрицательное значение температурного коэффициента линейного расширения, благодаря чему появляется возможность при соответствующей укладке волокон получать близкие к нулю значения коэффициента расширения у такого КМ.

Волокна карбида кремния получают методом химического осаждения из паровой фазы на подложку из борного или углеродного волокна. Эти волокна имеют хорошую теплостойкость, стойкость к окислению и мало реагируют с металлом.

Слоистые КМ. Материалом матриц для композитов со слоистым строением служат

пластмассы, металлы или керамики. В качестве наполнителей применяют полимерные волокна, ленты из натуральных и стеклотканей и другие материалы. Например, в строительстве, машиностроении и т.д. широко применяются ламинаты, изготовленные из смол, которые армированы полимерными волокнами или стеклотканью.

К слоистым КМ относятся абляционные материалы, изготовленные на базе фенолформальдегидных смол с углеродным или стекловолокном. В этих материалах часто используется стеклоткань, которая при многослойном нанесении обеспечивает тепловую защиту и высокие механические свойства изделий, например тонкостенных труб, втулок и др.

Встречаются композиты, в которых слоистым связующим являются алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольги, а слоями, определяющими специальные свойства и применение, - керамика, интерметаллидные соединения или другие металлические материалы.

Слоистые КМ на основе керамических матриц используют в системах, работающих в экстремальных условиях (например, теплоизоляционные покрытия в космических аппаратах). Компонентами этого типа КМ чаще всего являются керамики, углерод и металлы, например корунд, пиролитический графит, карбиды, оксиды, нитриды в композиции с алюминием, медью, титаном, никелем, кобальтом, танталом, железом.

Свойства и применение КМ

Физико-механические свойства основных компонентов КМ приведены в табл. 4.2 и 4.3.

Хорошая совместимость матрицы с армирующим элементом, высокие прочностные свойства борного волокна и удовлетворительная пластичность материала матрицы определяют высокие удельные значения прочности и жесткости МКМ (отношение временного сопротивления разрыву и модуля упругости к плотности) в сочетании с хорошей технологичностью и конструкционной надежностью изделий из этого материала.

Таблица 4.3. Свойства компонентов КМ

Тип волокна	ρ , г/см ³	σ_B , МПа	E, ГПа	σ_B/ρ , км	E/ ρ , 10 ³ км	$\alpha, 10^{-6}$, К	T _{max} , °С
Матрица из Al – сплава	2,63-2,8	250-573	69-73	20	2,5	11-13	150
C	2,1-2,3	850/70	360/35	90	20	1,0-3,6	500
B	2,6	1800/330	250/140	70	10	6,0	540
SiC	2,85-2,9	1600/350	230/140	56	7	6,1	300
B-SiC	2,7-2,8	1400/320	220/180	50			
Al ₂ O ₃	3,4	1200	260/140	34	7		

Для создания металлических КМ с еще меньшей плотностью применяется магний. Композиционные материалы на основе магния на 30 % легче, чем упрочняемые сплавы алюминия. Металлические КМ на основе магния имеют хорошие удельные свойства, стабильный температурный коэффициент линейного расширения в широком диапазоне температур, что достигается за счет комбинаций свойств матрицы и волокна и может регулироваться в зависимости от конкретных условий использования. Такие материалы можно получать в форме отливок, включая плоские плиты, трубы, прутки и изделия специальной формы

Системы углеродные волокна - алюминий и углеродные волокна - магний перспективны для использования в авиакосмических аппаратах благодаря высоким значениям удельной прочности и жесткости, малому температурному коэффициенту линейного расширения и сравнительно высокой теплопроводности (для отвода тепла).

Металлы с высокой пластичностью и прочностью хорошо совмещаются с высокопрочными и жесткими волокнами с низкой плотностью и пластичностью, образуя КМ с повышенной жесткостью и малой массой. Примером такой комбинации может служить титан, армированный волокнами бора или карбида кремния. Однако такие системы имеют пониженную усталостную прочность из-за остаточных напряжений, высокой реакционной способности титановой матрицы, приводящей к химическому взаимодействию между волокнами и матрицей при высоких температурах в процессе изготовления. Свойства металлических КМ на основе титановой матрицы представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Свойства металлических КМ на основе титановых сплавов

Свойства	Титановые сплавы	Армирующие волокна		
		В	SiC	В-SiC
ρ , г/см ³	4,5	3,3-3,5	3,8-4,0	3,7-3,9
σ_B , МПа	500-1200	1500/550	1720/650	1400/550
E, ГПа	27	0	250/200	290/200
$\Sigma_{уд}$, км	2,6	43	46	37
Е _{уд} , Ю ³ км	9	6,5	7,5	7,5
$\sigma_{0,10}$, °С	-	-	-	-
T _{max} , °С	490	650	700	4,5-5,7

Влияние температуры испытания на удельную прочность и жесткость композиционных материалов показано на рис. 4.6. На рис. 4.7 приведены типичные свойства композиционного материала на основе алюминиевого сплава, армированного борным волокном (с покрытием из карбида кремния).

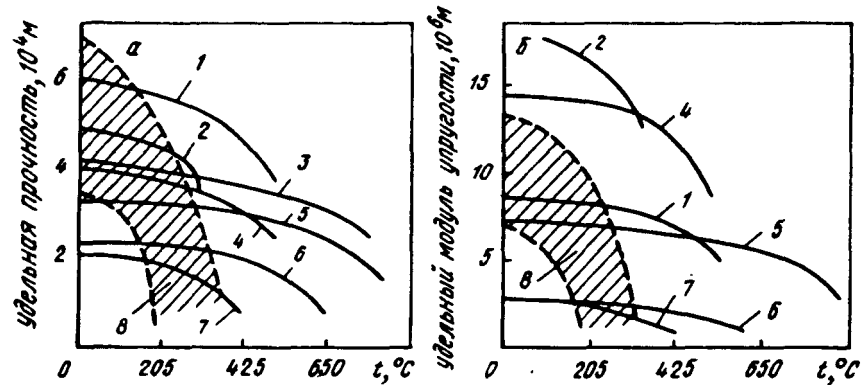


Рис. 4.6. Зависимость удельной прочности (а) и удельной жесткости (б) материалов от температуры: 1 - В/Al; 2 - YB/Mg; 3 - В/Ti; 4 - YB/Al; 5 - SiC/Ti; 6 - Ti; 7 - Al; 8 - заштрихованная область соответствует данным разных авторов для КМ типа углеродное волокно/полимерная смола

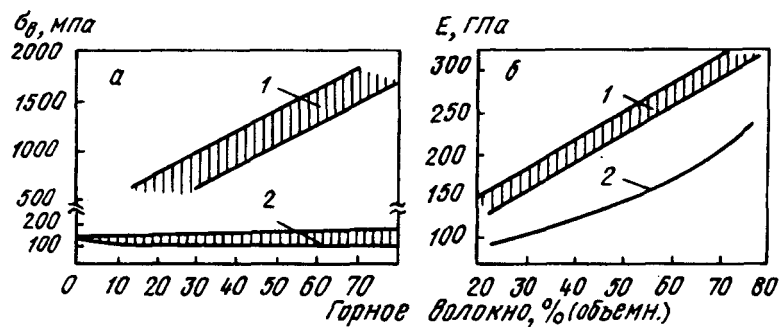


Рис. 4.7. Зависимость временного сопротивления разрыву (а) и модуля упругости (б)

боралюминиевого композиционного материала вдоль (1) и поперек (2) оси армирования от объемного содержания борного волокна

Прочность и модуль упругости, а также сопротивление материалов удару для однонаправленных композиционных материалов на основе алюминия, магния и титана повышаются по мере увеличения в композиции объемного содержания волокон.

Для очень высоких температур, например в камерах сгорания реактивных двигателей, используются системы, содержащие молибденовую и вольфрамовую проволоку в матрицах из титана и суперсплавов. Наибольшей прочностью при температуре 1093 °С обладает проволока из сплава W-Re-Hf-C, что в 6 раз выше прочности никелевых или кобальтовых суперсплавов при такой же температуре.

Большие перспективы открываются с развитием процессов объемного армирования металлических КМ. В частности, для металлических КМ объемное армирование дает существенный выигрыш в ударной вязкости. Волокнистые КМ типа Al_2O_3/Al с трехмерным армированием поглощает почти такую же энергию при ударных нагрузках, как и чистый алюминий. Кроме того, армирование по толщине, обеспечиваемое трехмерной волокнистой структурой, предотвращает расслоение и тормозит распространение трещин.

К недостаткам металлических КМ относится их сравнительно высокая стоимость (она в несколько раз превосходит стоимость полимерных композитов) и сложность технологии изготовления. Поэтому необходимо снижение себестоимости металлических КМ за счет совершенствования технологии, что позволит использовать их уникальные свойства в ряде конструкций, например, в авиакосмической технике Детали из боропластика и бороалюминия применяются многими компаниями при изготовлении горизонтальных и вертикальных стабилизаторов, рулей, элементов хвостового оперения, лопастей винтов и др.

Области использования металлических КМ непрерывно расширяются. Помимо улучшения технических характеристик многих ответственных изделий использование металлических КМ способно приводить к экономии массы до 20 - 30 % (рис. 4.8). Например, современные Al - Li сплавы имеют этот показатель на уровне 10 - 15 %.

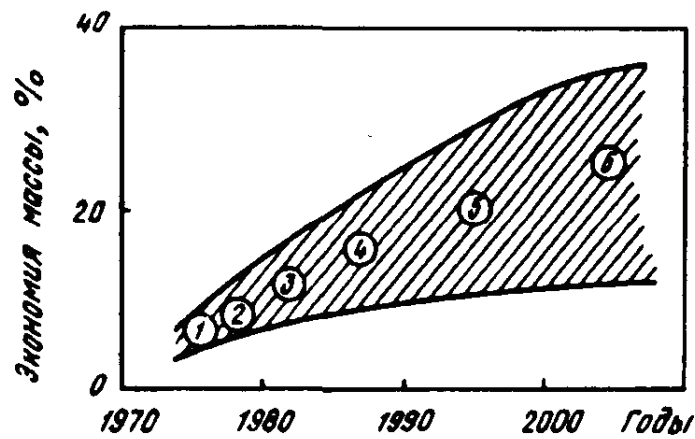


Рис. 4.8. Потенциальная экономия массы авиакосмических конструкций при использовании различных конструкционных материалов: 1,2 - алюминиевые сплавы; 3 - Ti – 10 об.%Al-2 об.%V-Fe; 4 - Al-Li; 5 - порошковые материалы; 6- металлические КМ

Как видно из рис. 4.8, детали конструкций из бороалюминиевых КМ дают снижение массы на 30 - 40 %, обеспечивая более высокую длительную и усталостную прочность при нагреве до 500 °С по сравнению с титановыми сплавами. Применение бороалюминия в ракетно-космической технике позволяет уменьшить массу летательных аппаратов на 20 - 50 %, что существенно увеличивает полезную нагрузку.

Использование металлических КМ из алюминия, армированного смесью коротких волокон Al_2O_3/SiO_2 диаметром порядка 3 мкм и длиной до 10 мкм в различных соотношениях, позволило повысить прочность и модуль упругости при увеличении массовой доли волокон Al_2O_3 и повысить износостойкость при росте доли волокон SiO_2 . Этот тип КМ можно применять вместо дорогих никелевых сплавов при изготовлении накладок поршней, что позволяет повысить температуру в камере сгорания двигателя и его мощность. За счет увеличения износостойкости поршней безремонтный пробег автомобиля увеличивается до 300 тыс. км.

Правильный выбор материалов с целью экономии массы летательных аппаратов космической техники играет определяющую роль, поскольку экономия массы приводит к уменьшению стоимости вывода космического аппарата на орбиту на сумму превышающую затраты на стоимость элементов конструкции из этих материалов.