

Глава 7. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

История возникновения искусственных композиционных материалов (КМ) восходит к истокам цивилизации, когда человек начал сознательно конструировать новые материалы. Уже на ранних стадиях развития цивилизации он использовал для строительства кирпич из глины, в которую замешивалась солома, придававшая повышенную прочность. Использование природных битумов позволило повысить водостойкость природных материалов и изготавливать суда из камыша, пропитанного битумом. Прослеживается аналогия между изготовлением боевых луков у кочевников с использованием нескольких слоев из дерева, рога, шелка, скрепляемых с помощью клея, и современными металлодеревотканевыми слоистыми конструкциями, соединяемыми отверждающимися смолами. Одним из наиболее ярких примеров такого рода является материал *фиберглас из стеклянных волокон, скрепленных полимерным связующим*, структура которого повторяет структуру бамбука, где непрерывные волокна из целлюлозы находятся в более пластичной матрице с низким модулем (рис. 7.1).

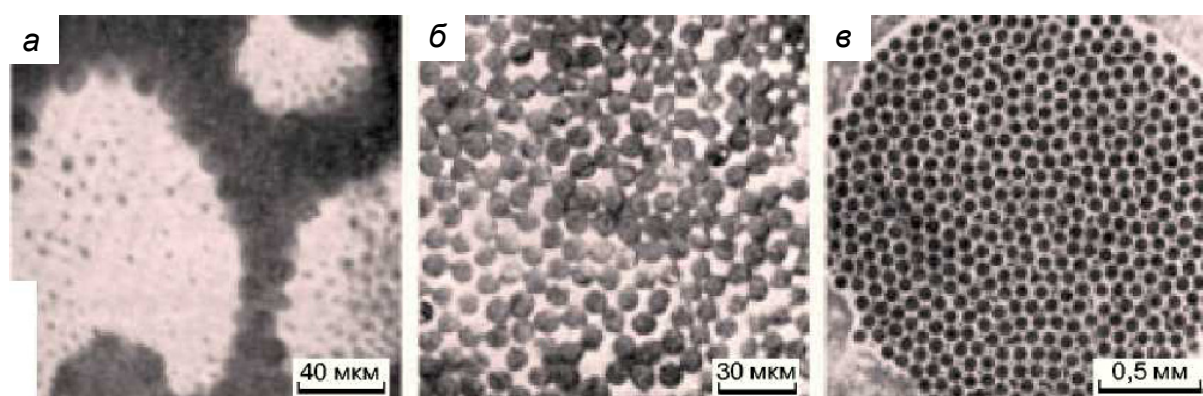


Рис. 7.1. Микроструктура различных КМ (сечение поперек армирующих элементов): а – бамбук; б – стеклопластик; в – КМ из меди, армированной вольфрамовой проволокой

Приведенные примеры позволяют выделить то общее, что объединяет КМ, а именно – эти материалы являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых пластичен (связующее, матрица), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (наполнитель, арматура), и при этом композиции имеют свойства, которых не имеют отдельные составляющие.

В качестве как первого, так и второго компонента могут выступать самые разнообразные по природе и происхождению материалы.

Известны КМ на базе металлов, керамики, стекол, углерода, пластмасс и других материалов. Практически любой современный материал представляет собой композицию, поскольку все материалы редко применяются в чистом виде. Это создает сложности с точки зрения использования термина – он часто применяется для всех сложных систем, содержащих несколько компонентов.

7.1. Общая характеристика и классификация

Традиционно применяемые металлические 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, высокого давления. Зачастую требования, предъявляемые к материалам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования в полной мере можно путем использования композиционных материалов.

Композиционные материалы (КМ), композиты – многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жёсткостью и т. д. Состав и форма вхождения компонентов в композит предусматриваются заранее, при этом компоненты присутствуют в таких количествах, чтобы обеспечить получение заданных свойств материала. Между компонентами всегда существует граница раздела. Они должны быть взаимно нейтральны и коэффициенты теплового расширения у них должны быть близкими, чтобы не возникали внутренние напряжения при повышении температуры.

В качестве упрочняющей фазы выбирают материалы, которые имеют температуру плавления намного выше температуры плавления матрицы, при нагреве они не должны растворяться в матрице. Это обеспечивает высокие прочностные свойства и жаропрочность композита до 0,9...0,95 от температуры плавления матрицы.

Сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр материалов с требуемым набором свойств.

Высокая надёжность конструкций из композитов связана с особенностями распространения в них трещин. В традиционных мате-

риалах трещина развивается быстро и скорость её роста в процессе работы возрастает. В композитах трещина обычно возникает и развивается в матрице. Граница между матрицей и армирующим компонентом является препятствием на пути распространения трещины, сдерживающим её рост.

Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче. Использование композитов обычно позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении её механических характеристик. Их применение дает возможность создать принципиально новые конструкции.

Свойства композитов зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними. Матрица связывает композицию в монолит, придавая ей форму, и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают композиты на металлической, полимерной и керамической основах.

По виду и структуре наполнителя композиты делят на: дисперсно-упрочненные; волокнистые; слоистые (рис. 7.2).

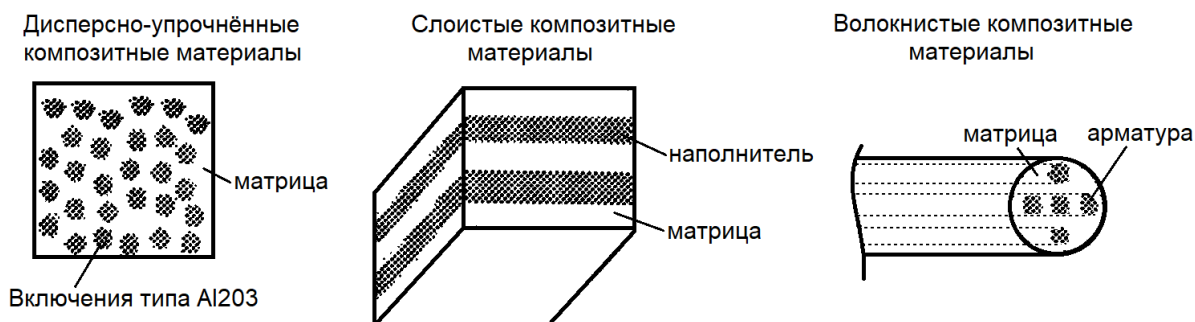


Рис. 7.2. Виды композиционных материалов

7.2. Композиционные материалы с металлической матрицей

Композиты с металлической матрицей сохраняют в себе все преимущества и металла и наполнителя. У них высокие значения предела прочности, модуля упругости и ударной вязкости, причём эти свойства они сохраняют до высоких температур. Кроме того, такие композиты можно упрочнять термической обработкой и наклёпом, при этом упрочнение идёт в основном за счёт матрицы.

7.2.1. Дисперсно-упрочненные композиты

В дисперсно-упрочненных композитах матрица упрочняется мелкодисперсными частицами второго компонента, который равномерно распределяется по всему объёму матрицы. Эти дисперсные частицы являются мощным тормозом при движении дислокаций. Такими упрочняющими частичками могут быть карбиды, нитриды, оксиды, которые обладают высокой твёрдостью, модулем упругости и химической стойкостью.

Для эффективного торможения дислокаций суммарная поверхность упрочняющих частиц должна быть большой, а размер частичек как можно меньше. Уровень прочности зависит от объемного содержания упрочняющей фазы, равномерности ее распределения, степени дисперсности и расстояния между частицами. Согласно формуле Орована, сопротивление сдвигу увеличивается с уменьшением расстояния между частицами: $\sigma = Gb/l$, где G – модуль сдвига; b – межатомное расстояние; l – расстояние между частицами.

Большое упрочнение достигается при размере частиц 0,01 – 0,1 мкм и расстоянии между ними 0,05 – 0,5 мкм. Объемное содержание частиц зависит от схемы армирования. Преимущество дисперсно-упрочненных композитов по сравнению с волокнистыми – изотропность свойств. Получают такие композиты методом порошковой металлургии.

К дисперсно-упрочненным композитам на алюминиевой основе, нашедшим промышленное применение, относится материал из спеченной алюминиевой пудры (САП); на никелевой основе известны композиции, упрочненные частицами оксидов тория, иттрия и др.

Спекание порошков происходит при температурах ниже температуры плавления, поэтому общим для сплавов, полученных таким путём, будет однородность состава и строения, которых трудно добиться при кристаллизации из жидкого состояния. Такие сплавы имеют более высокий, чем у обычных сплавов, модуль упругости, что является их достоинством.

Кроме композиционных материалов на основе алюминия для деталей, работающих при высоких температурах, используют дисперсно-упрочненные композиционные материалы с матрицей из коррозионностойкой стали, молибдена, бериллия, магния, никеля и его сплавов. Из таких материалов изготавливают лопатки газовых турбин, камеры сгорания, теплозащитные панели.

Дисперсно-упрочненные КМ на алюминиевой основе

Материал САП характеризуется высокой прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств.

САП состоит из алюминия и его оксида. Получают САП путём последовательного брикетирования, спекания и прессования окисленной с поверхности алюминиевой пудры.

Исходным материалом при получении пудры служит порошок – пульверизат, который изготавливают распылением расплавленного алюминия А6 (ГОСТ 11069-74). Порошок размельчают в шаровых мельницах в атмосфере азота с добавлением 2–3% O_2 и 0,25–1,2% стеариновой кислоты. Кислород используют для окисления вновь образованных поверхностей пудры, стеарин – для облегчения скольжения и препятствия свариванию частиц пудры. Частицы пудры имеют форму чешуек толщиной менее 1 мкм. Длина и ширина частиц одного порядка, толщина оксидной пленки составляет 0,01–0,1 мкм. Размер частиц зависит от длительности размола: чем продолжительнее время размола, тем мельче частицы пудры, больше их общая поверхность и, следовательно, выше содержание оксида алюминия. Например, пудра марки АПС-1 с размером частиц 30–50 мкм содержит 6–8% Al_2O_3 , а пудра АПС-2, имеющая размер частиц 10–15 мкм, уже 9–12% Al_2O_3 . В настоящее время освоена технология получения алюминиевой пудры четырёх марок и соответствующих им марок САП (табл. 7.1). В сплавах от САП-1 до САП-4 увеличивается количество Al_2O_3 от 8 до 20% и соответственно прочность растет от 300 до 460 МПа, но относительное удлинение понижается от 8 до 2%. Эти сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, электропроводностью и высокой жаропрочностью. Кроме прочности, САП обладает повышенной жаропрочностью. Так, при 400°C прочность САП в пять раз выше, чем у алюминиевых сплавов.

Таблица 7.1

Механические свойства САП [1]

Материал	Содержание Al_2O_3 , %	σ_B , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	E , ГПа	$E/(\rho g)10^{-3}$, км
САП-1	6–8	300	11	220	7	67	2,1
САП-2	9–12	350	13	280	5	71	2,6
САП-3	13–17	400	15	320	3	76	2,8
САП-4	18–22	450	17	370	1,5	80	2,9

Структура САП представляет собой алюминиевую основу с равномерно распределёнными дисперсными включениями Al_2O_3 . С увеличением содержания Al_2O_3 повышаются прочность, твёрдость, жаропрочность САП, уменьшается пластичность (рис. 7.3). Высокая прочность САП объясняется большой дисперсностью оксидной фазы, малым расстоянием между ее частицами. Нерастворимость в алюминии и отсутствие склонности к коагуляции тонкодисперсных частиц Al_2O_3 обеспечивает стабильность структуры и высокую прочность при температурах до $500^\circ C$.

САП хорошо деформируется в горячем состоянии, хуже – в холодном, легко обрабатывается резанием и удовлетворительно сваривается контактной, аргонодуговой сваркой. В настоящее время в основном применяют САП-1, САП-2 и САП-3, из них производят все виды полуфабрикатов: листы, профили, штамповые заготовки, трубы, фольгу. САП используют для деталей, работающих при $300\text{--}500^\circ C$, от которых требуются высокая удельная прочность и коррозионная стойкость (*поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и турбин в химической и нефтяной промышленности, конденсаторы, обмотки трансформаторов в электротехнике*).

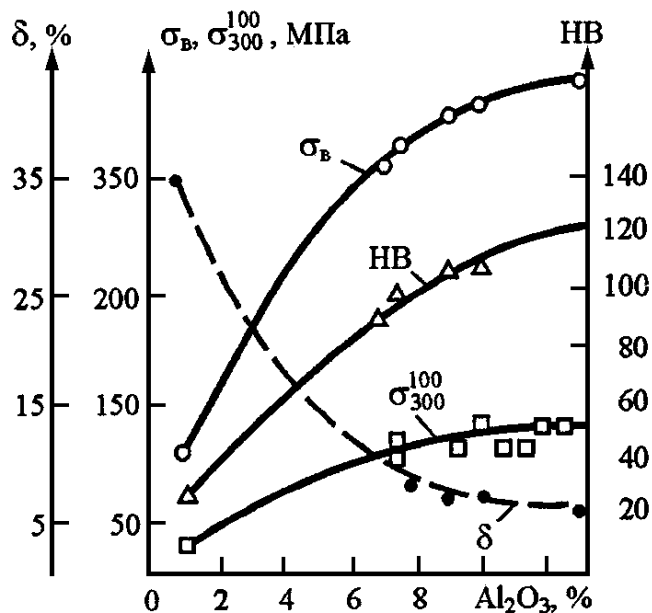


Рис. 7.3. Зависимость механических свойств САП от содержания Al_2O_3

Спечённые алюминиевые сплавы (САС) изготавливают в основном по той же технологии, что и САП – из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов. Чаще всего вводят в состав кремний (до 30%), никель или железо (до 7%). Такие сплавы отличаются

высоким модулем упругости и пониженным коэффициентом линейного расширения.

Практическое значение имеют сплавы с низким температурным коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициенту линейного расширения стали, и высоким модулем упругости. Эти сплавы заменяют более тяжёлые стали при изготовлении отдельных деталей приборов. Механические свойства САС характеризуются достаточно высокой прочностью, твёрдостью ($\sigma_B = 260$ МПа, 120 НВ) и низкой пластичностью (8 – 1,5...1%). Преимущества спекаемых алюминиевых сплавов по сравнению с обычными, аналогичного состава, – отсутствие литейных дефектов (ликвации, шлаковых включений и т.д.) и мелкозернистая структура с равномерным распределением фаз.

Дисперсно-упрочненные КМ на никелевой основе

В качестве матрицы в этих материалах используют никель и его сплавы с хромом (20%) со структурой твердых растворов. Сплавы с хромо-никелевой матрицей обладают более высокой жаростойкостью. Упрочнителями служат частицы оксидов тория, гафния и др. Временное сопротивление в зависимости от объемного содержания упрочняющей фазы изменяется по кривой с максимумом. Наибольшее упрочнение достигается при 3,5–4% HfO_2 ($\sigma_B = 750\text{...}850$ МПа; $\sigma_B/(pg) = 9\text{...}10$ км; $\delta = 8\text{...}12\%$). Легирование никелевой матрицы W, Ti, Al, обладающими переменной растворимостью в никеле, дополнительно упрочняет материалы в результате дисперсионного твердения матрицы, происходящего в процессе охлаждения с температур спекания. Методы получения этих материалов довольно сложны. Они сводятся к смешиванию порошков металлического хрома и легирующих элементов с заранее приготовленным (методом химического осаждения) порошком никеля, содержащим дисперсный оксид гафния или другого элемента. После холодного прессования смеси порошков проводят горячую экструзию брикетов.

7.2.2. Волокнистые композиционные материалы

Свойства таких композитов определяются свойствами матрицы и волокон, а также способом их армирования.

Волокнистые композиционные материалы содержат упрочняющие элементы в виде волокон, нитей, проволоки, сеток, лент, войлока и т.п. Прочность таких композиционных материалов определяется прочностью армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку.

Роль матрицы в таких композиционных материалах заключается в придании изделию требуемой формы и создании монолитной конструкции, защите волокон от окисления и механических повреждений, обеспечении прочности и жёсткости конструкции. Наибольший эффект упрочнения достигается тогда, когда между матрицей и наполнителем возникают прочные связи вследствие химического взаимодействия между ними, при этом резко возрастает адгезионная прочность.

Армирующие волокна композиционных материалов

По механизму армирующего действия волокна делят на *дискретные*, если соотношение их длины к диаметру находится в пределах 10...1000, и *непрерывные*, если соотношение их длины к диаметру намного больше. Дискретные волокна, как правило, располагаются хаотично, а непрерывные имеют одноосную, двухосную и трёхосную укладку (рис. 7.4).

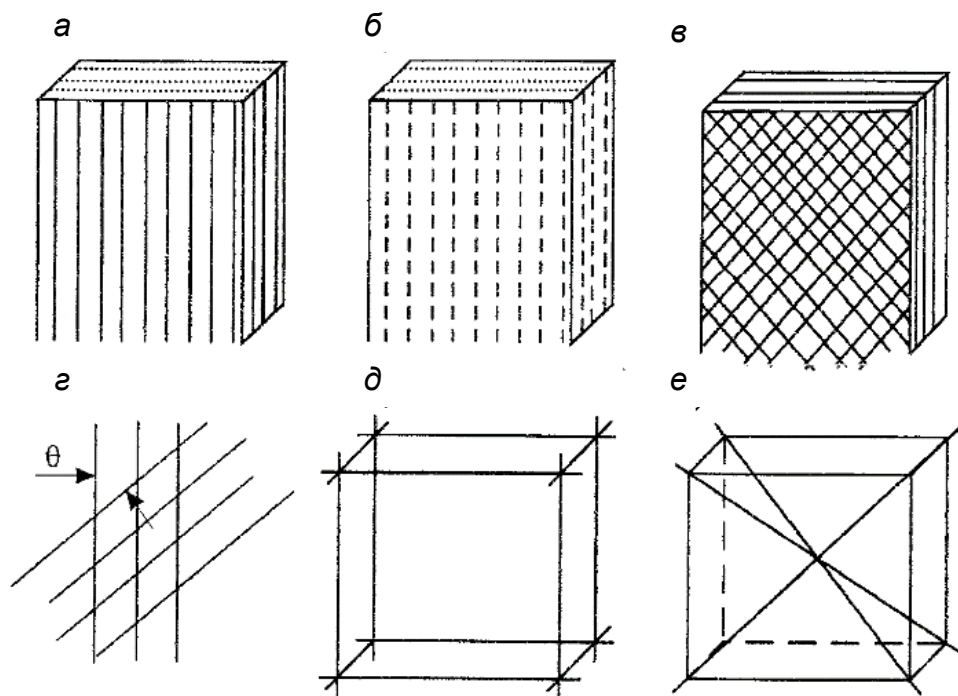


Рис. 7.4. Схемы различных способов укладки волокон: а, б – одноосная (а – непрерывные волокна; б – короткие волокна); в, г – двухосная (в – ткани; г – непрерывные волокна); д, е – трёхосная

Одноосная укладка волокон обеспечивает наиболее полную реализацию свойств вдоль волокна в композите. При двухосной укладке один слой волокон располагается над другим под углом 90° . Такой способ укладки будет обеспечивать большую изотропность свойств, но при этом сопротивление сдвигу между этими слоями резко снижается. Этот недостаток устраняется при трёхосном армировании матрицы.

Требования, предъявляемые к волокнам:

- высокая температура плавления; малая плотность;
- влаго- и химическая стойкость во всём интервале эксплуатационных температур;
- высокая прочность и жёсткость;
- минимальная растворимость в матрице;
- отсутствие токсичности;
- хорошая технологичность.

При создании композитов этого типа в качестве армирующего компонента используют высокопрочные волокна из стекла, бора, углерода, металлической проволоки и нитевидных кристаллов (усов) оксидов, нитридов и других химических соединений.

Стекланные волокна. При малой плотности они имеют высокую прочность, теплостойкость, влаго- и химостойкость. Их получают методом вытягивания расплавленной стекломассы через фильеры диаметром 0,8...3 мм и дальнейшим вытягиванием их до диаметра 3...20 мкм.

Углеродные волокна обладают высокой удельной прочностью и термической стабильностью механических свойств. Прочность достигает 1500...2000 МПа, что соответствует прочности молибденовой проволоки. Их получают путём высокотемпературной термообработки в инертной среде из синтетических органических волокон. Эти волокна используют при создании композитов в виде кручёных и некручёных жгутов с диаметром волокон ~7 мкм и числом волокон в жгуте от 1000 до 160000. Углеродные волокна имеют высокую теплопроводность, электропроводность, коррозионную стойкость, у них низкий коэффициент трения и термического расширения, но они склонны к окислению на воздухе и легко вступают в химическое взаимодействие с металлической матрицей. Для устранения этих недостатков на углеродные волокна наносят защитные покрытия из металлов и керамики.

Борные волокна. По сравнению с другими волокнами они обладают очень большим модулем упругости, высокой прочностью (2700...3000 МПа). Бор – это полупроводник, поэтому у него понижена тепло- и электропроводность. Получают борное волокно путём химического осаждения из газовой фазы хлорида бора на вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм при температуре 1100...1200°C. Диаметр волокна после осаждения бора составляет 70...200 мкм. В сердцевине такой проволоки образуются бориды вольфрама, а на поверхности – слой чистого бора. Борные волокна заметно окисляются при нагреве до 400°C, а при более высоких температурах легко взаимодействуют с

алюминиевой матрицей. Поэтому борные волокна защищают покрытиями из карбида кремния.

Карбид кремния. Волокна этого карбида получают так же, как и волокна бора. У них при комнатной температуре более низкие механические свойства по сравнению с волокнами бора и углерода, и они более чувствительны к поверхностным дефектам из-за повышенной хрупкости. Но при высоких температурах карбид кремния приобретает достаточную пластичность и при этом не происходит заметного разупрочнения. Используют эти волокна для металлокомпозитов, работающих при высоких температурах.

Металлические волокна и проволоки. Для упрочнения композитов, работающих при низких температурах, используют стальные и бериллиевые волокна и проволоки, а при высоких температурах – вольфрамовые и молибденовые. Стальные волокна изготавливают в основном из высокопрочных коррозионностойких сталей (10X18H10T, 10X17H2, 30X13 и др.). Прочность проволоки зависит от ее диаметра и возрастает с его уменьшением. Бериллиевая проволока обладает более низкой плотностью и, соответственно, более высокой удельной прочностью и упругостью. Применяется она для композитов с алюминиевой, магниевой и титановой матрицами.

Применение волокнистых металлических композиционных материалов

Волокнистые металлические композиционные материалы нашли широкое применение при использовании в качестве матрицы алюминия, так как он при малой плотности в первую очередь определяет достоинства композиционного материала по удельной прочности.

Композиционные материалы на алюминиевой основе, армированные углеродными волокнами (ВКУ) малопластичны, в то же время они обладают повышенной прочностью, имеют более высокую жаропрочность и могут использоваться в газотурбинных установках. Кроме того, волокна в композиционных материалах уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, в результате практически полностью исчезают внезапные хрупкие разрушения. Отличительной особенностью волокнистых одноосных композиционных материалов являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения.

Производство *поршней двигателей из алюминиевых литейных сплавов с армированием днища поршня керамическими волокнами и волокнами карбида кремния существенно повышает ресурс и основ-*

ные характеристики двигателей. В качестве антифрикционных вкладышей шатунов используют ленту из алюминиевых сплавов, армированную графитовыми волокнами.

Широкое применение в промышленности нашли композиты с матрицей из алюминия, магния, титана и их сплавов. Технический алюминий и его сплавы (АМц, Амг6, АД1, Д16 и др.) армируют волокнами бора, карбида кремния, углерода, а также стальной и бериллиевой проволокой.

Свойства волокнистых композиционных материалов

Неоднородная структура волокнистых композитов определяет их поведение при эксплуатации. Напряжения, воспринимаемые матрицей и волокнами, неодинаковы. *Если приложенные нагрузки совпадают с направлением волокна, то основную нагрузку несут волокна, при этом чем больше объёмная доля этих волокон в композите, тем работоспособность выше.* С увеличением объёмной доли волокон до 80% предел прочности композитов увеличивается, а при большей объёмной доле уменьшается из-за того, что матрицы слишком мало, и она не в состоянии смочить и пропитать каждое волокно. Тем самым сцепление волокон с матрицей ухудшается и появляется проскальзывание волокон в матрице.

Если приложенная нагрузка перпендикулярна волокну в однонаправленном композите, то предел прочности его будет равен пределу прочности матрицы. Это указывает на то, что свойства волокнистых композитов анизотропны. При разрушении композитов распространение трещины вдоль волокна идет легче и определяется лишь свойствами матрицы. В поперечном же направлении распространение трещины затруднено, так как ей приходится преодолевать прочность матрицы, волокна и адгезионную прочность между матрицей и волокном.

7.3. Композиционные материалы с полимерной матрицей

В качестве полимерной матрицы используют эпоксидные, фенолоформальдегидные и кремнийорганические смолы, а также полиамидные пластмассы и целый ряд других термопластичных пластмасс. Свойства полимерной матрицы достигаются в результате полимеризации и отверждения (для реактопластов), при этом матрица должна иметь низкую усадку. К недостаткам таких матриц относится низкая прочность и теплостойкость, при этом надо учитывать, что теплостойкость у термореактивных пластмасс выше, чем у термопластичных. Наиболее теплостойкими (до 350°C) являются кремнийорга-

нические и полиамидные пластмассы. Широко применяются матрицы из эпоксидных смол. У них более высокий уровень механических свойств и небольшая усадка. Предел прочности у полиамидных матриц равен от 40 до 80 МПа.

Композиционные материалы с дисперсным наполнителем

Доля наполнителей в термопластичных полимерах достигает 50%, а в термореактивных – до 90% от общего веса. Широкое применение находит *фторопласт*. В качестве наполнителя в них используют кокс, который повышает износостойкость фторопласта в 600 раз. Применение в качестве наполнителя бронзы, никеля и меди повышает износостойкость в 450, 250, 22 раза соответственно, а алюминиевый порошок уменьшает износостойкость фторопласта. Наряду с повышением износостойкости, введение наполнителей повышает твердость и сопротивление сжатию в 5...10 раз.

Применяются также термореактивные полимеры на основе различных смол с органическими (древесная мука, хлопок, целлюлоза и др.) и неорганическими (асбест, тальк, каолин, молотый кварц, стекло) порошковыми наполнителями. Такие материалы обладают изотропными свойствами, невысокой прочностью и ударной вязкостью и применяются для изготовления несилевых конструкционных и электроизоляционных деталей.

Композиционные материалы с волокнистым наполнителем

Композиты на основе полимерной матрицы с волокнистым наполнителем называют по природе наполнителя. Это органо-, карбо-, стекло- и бороволокниты. Матрицей в волокнитах служат термореактивные и реже термопластичные полимеры.

Слоистые композиты

Слоистыми называются композиционные материалы с полимерной матрицей и листовым наполнителем, который состоит из хаотично ориентированных дисперсных и направленных волокон или тканей. В качестве матрицы используют термореактивные полимеры, а в качестве наполнителя – хлопчатобумажные, стеклоасботкани, органоткани, органостеклоткани, бороорганостеклоткани. Ткани различаются по соотношению волокон в основе и по типу переплетения, что сказывается на механических свойствах. Выпускаются слоистые композиты в виде листов, труб, заготовок.

К слоистым композитам относятся гетинакс, текстолит, стекло-текстолит, асботекстолит, древесно-слоистые пластики (ДСП).

7.4. Композиционные материалы с керамической матрицей

Композиты с керамической матрицей получают методом порошковой металлургии, а также литьём. В качестве матрицы используют стекла силикатные (SiO_2), алюмосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$) и др., а также тугоплавкие оксиды (TiO_2 , BeO , ZrO_2) и др., карбиды (SiC , TiC) и бориды (TiB_2 , ZrB_2). В качестве наполнителя используют проволоку из жаропрочных сталей, вольфрама, молибдена, ниобия, а также неметаллические волокна (углеродные, керамические). Металлическая проволока создаёт пластичный каркас в хрупкой керамической матрице и тем самым предохраняет композит от преждевременного хрупкого разрушения. Наиболее перспективным наполнителем являются углеродные волокна. Свойства таких композитов и их жаропрочность во многом зависят от материала матрицы. Так, композиты со стеклянной матрицей могут работать при температурах до $600\ldots 800^\circ\text{C}$, с матрицей из тугоплавких оксидов – до 1000°C , из боридов и нитридов – до 2000°C , а из карбидов – свыше 2000°C .

Широко используются в промышленности керамические композиты, армированные волокнами SiC , так как у них проявляется химическое сродство матрицы и наполнителя, близкие значения модулей упругости и температурных коэффициентов расширения. Все это обеспечивает высокую прочность таких композитов и стойкость к окислению при высоких температурах. Используются они для ответственных тяжело нагруженных изделий (лопатки газовых турбин, носовые обтекатели ракет и др.).

Находит применение ситалловая матрица для изготовления дисперсно-упрочненного композита.

Керамические композиционные материалы получают распространение во многих областях техники, например, в металлообработке в качестве элементов режущего инструмента. Использование керамики при обработке резанием ограничено ее хрупкостью и опасностью разрушения от возникающих напряжений вследствие высокого градиента температуры. Разработанные композиционные керамические режущие материалы (*керметы*) существенно снижают недостатки керамики. Керметы, кроме керамической матрицы (Al_2O_3), содержат порошковые металлы.

Керамические композиционные материалы могут успешно применяться в качестве *износостойких насадок гидромониторных долот, горловин насосов пескоструйных аппаратов, газодинамических подшипников и др.*

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое композиционный материал?
2. Как подразделяются композиты в зависимости от материала матрицы и по типу упрочняющих компонентов?
3. Из каких материалов изготавливаются матрицы для дисперсно-упрочненных и волокнистых композитов?
4. Какие материалы используются для упрочнения дисперсно-упрочненных композитов?
5. Из каких материалов изготавливают армирующие волокна?
6. Какие основные способы укладки армирующих волокон в матрице и как это влияет на свойства композитов?
7. От чего зависит прочность композитов?
8. В чем отличия дисперсно-упрочненных и волокнистых композитов и где они применяются в промышленности?
9. В чем преимущества композиционных материалов перед металлическими сплавами?
10. Из каких материалов изготавливаются матрицы для дисперсно-упрочненных и волокнистых композитов?
11. Дайте характеристику керамическим и полимерным композиционным материалам, укажите виды наполнителей и их влияние на свойства композитов, назовите области применения.