

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Н.Н. Двудичанская, Л.Е. Слынько, В.Б. Пясецкий

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по машиностроительным
и приборостроительным специальностям*

М о с к в а

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2008

УДК 620.22 (075.8)

ББК 30.36

Д85

Рецензенты: *А.А. Шевченко, Б.Г. Попов*

Двуличанская Н.Н., Слынько Л.Е., Пясецкий В.Б.

Д85

Композиционные материалы. Физико-химические свойства: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 48 с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3149-6

Приведены сведения о строении, составе, способах изготовления и областях применения композиционных материалов. Рассмотрены классификационные принципы, химический состав различных композиционных материалов. Даны справочные данные о физико-химических свойствах металлических и полимерных композиционных материалов с различными наполнителями — дисперсными, волокнистыми и нитевидными кристаллическими. Приведены сравнительные характеристики широко применяемых в машино- и приборостроении материалов: алюминиевых сплавов и композитов на основе алюминия. Данная работа позволяет студентам, получившим общее представление о различных конструкционных материалах при изучении базового курса химии, применять композиционные материалы для изготовления технических устройств различного назначения при курсовом и дипломном проектировании.

Для студентов старших курсов приборостроительных и машиностроительных специальностей высших и средних профессиональных образовательных учреждений.

УДК 620.22(075.8)

ББК 30.36

Учебное издание

Двуличанская Наталья Николаевна

Слынько Лариса Евгеньевна

Пясецкий Вячеслав Борисович

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Редактор *С.А. Серебрякова*

Корректор *М.А. Василевская*

Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Подписано в печать 01.09.2008. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,45.

Изд. № 50. Тираж 300 экз. Заказ .

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5

ISBN 978-5-7038-3149-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время прогресс машино- и приборостроения связывают главным образом с разработкой и широким применением композиционных материалов (композитов). Такие материалы обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от свойств традиционных конструкционных материалов (металлических сплавов и полимеров). Совокупность этих свойств и особенностей предоставляет широкие возможности как для совершенствования уже существующих конструкций самого разнообразного назначения, так и для разработки новых конструкций и технологических процессов. К композиционным относят самые разнообразные искусственные материалы, разрабатываемые и применяемые в различных отраслях промышленности. В ряде случаев композиты оказываются в несколько раз более эффективными, чем металлы, с успехом заменяя такие материалы, как листовой прокат алюминия, стали, титана.

Особенность конструкций из композиционных материалов состоит в том, что разработчики должны проектировать и сами материалы, обеспечивая расчетные механические, тепловые и другие параметры и характеристики, необходимые для эффективной реализации инженерных разработок. Это связано с обоснованным выбором исходных материалов (армирующих волокон, связующих наполнителей), структуры композиционных материалов, технологии их изготовления и переработки в готовые изделия.

Успешная реализация больших потенциальных возможностей композиционных материалов в значительной степени зависит от уровня информированности конструктора об этих возможностях, особенностях свойств, принципах конструирования и методах расчета. Обширная литература по композитам ориентирована в основном на научных работников. Данное пособие позволяет студентам, получив общее представление о различных конструкционных материалах при изучении базового курса химии, использовать композиты в качестве материала для изготовления технических устройств различного назначения при курсовом и дипломном проектировании на старших курсах.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Композиционные материалы (*композиты*) представляют собой гетерогенные структуры, образованные физическим соединением двух или более совместимых материалов, различающихся по составу, свойствам и форме. Свойства получаемого соединения отличаются от индивидуальных свойств составляющих его материалов (рис. 1).

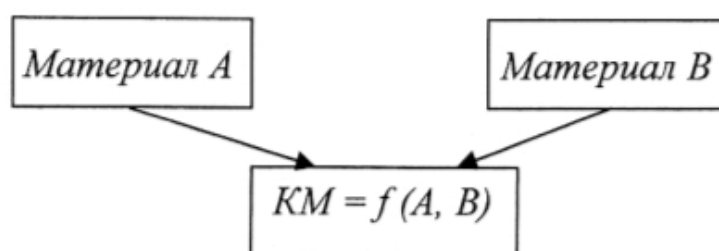


Рис. 1. Формирование новых свойств при создании композита

Отдельные компоненты в составе композита не должны растворяться или иным способом поглощать друг друга. Компоненты таких материалов сохраняют присущие им свойства, что отличает композиты от классических конструкционных материалов, например сплавов. Иначе говоря, понятие «композиционный материал» соответствует неоднородному в макромасштабе материалу, состоящему из различных по своим свойствам частей (например, *A* и *B*), разграниченных поверхностями раздела (рис. 2).

В истории развития композиционных материалов можно выделить несколько важных этапов:

- разработка и применение *волокнистых стеклопластиков*, обладающих высокой удельной прочностью (1940 – 1950-е годы);
- открытие свойства высокой прочности (близкой к теоретическому пределу) *нитевидных кристаллов* и доказательство возмож-

ности использования таких кристаллов для упрочнения металлических и неметаллических материалов (1950 – 1960-е годы);

– разработка *новых армирующих материалов* — высокопрочных непрерывных волокон бора, углерода, карбида кремния SiC , карбида бора B_4C , оксида алюминия Al_2O_3 и волокон других неорганических тугоплавких соединений, а также упрочнителей на основе металлов (1960 – 1970-е годы).

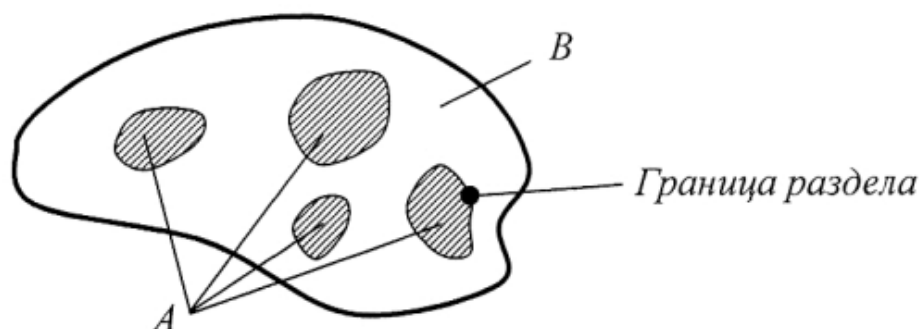


Рис. 2. К определению понятия композиционного материала

Для композиционных конструкционных материалов характерны следующие признаки:

- состав и форма компонентов материала определены заранее;
- компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;
- материал является неоднородным в макромасштабе (компоненты различаются по свойствам, между ними существует явная граница раздела).

Один из компонентов, обладающий непрерывностью по всему объему материала, называют *матрицей* или *связующим веществом* (материал *B* на рис. 2). Другой компонент или компоненты, разделенные по объему композиции, называют *усиливающими* или *армирующими наполнителями* (материал *A* на рис. 2).

Матричными материалами могут быть металлы и их сплавы, органические и неорганические полимеры, керамика и другие вещества.

Усиливающими или армирующими компонентами чаще всего являются тонкодисперсные порошкообразные частицы, микросферы, кристаллы или волокнистые материалы различной природы: органические, неорганические вещества, металлические материалы, керамика. Положительный эффект применения наполнителей выражается в увеличении прочности и жесткости материалов, улучшении теплопроводности и теплостойкости, по-

вышении износостойкости и ударной вязкости, уменьшении коэффициента температурного расширения и пористости, улучшении качества поверхности, а в отдельных случаях — и в удешевлении материалов.

В зависимости от вида армирующего компонента и по характеру структуры множество композиционных материалов подразделяют на три основные группы:

- *волоконистые*, упрочненные непрерывными волокнами или нитевидными кристаллами;
- *дисперсно-упрочненные*, полученные введением в металлическую матрицу дисперсных частиц упрочнителей;
- *слоистые*, созданные прессованием или прокаткой разнородных материалов.

К композиционным материалам относят также сплавы с направленной кристаллизацией эвтектических структур.

Свойства композитов позволяют изготавливать из них самые разнообразные изделия — от миниатюрных зубчатых колес массой в несколько граммов до корпусов кораблей, самолетов, кабин большегрузных автомобилей и оружейных стволов. Области применения композитов многочисленны: авиационная, ракетная, космическая техника и приборостроение (корпуса и детали), энергетическое турбостроение (лопатки турбин), автомобильная промышленность (детали двигателей и кузовов), машиностроение (корпуса и детали машин), горная промышленность (буровые машины и инструмент), металлургическая промышленность (огнеупорные материалы), строительство (строительные материалы для несущих конструктивных элементов и облицовки), химическая промышленность (автоклавы, цистерны для хранения и перевозки различных жидкостей, аппараты для производства кислот), текстильная промышленность (детали прядильных машин), сельскохозяйственное машиностроение, бытовая техника и др.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Общая система классификации композитов базируется на различных принципах, не ограничиваясь только вышеприведенными.

Материаловедческий принцип. В зависимости от материала матрицы композиты делят на три группы: *металлические, полимерные, керамические*.

Названия *полимерных композитов* обычно соответствуют материалу армирующих волокон. Так, полимерные композиты, армированные стеклянными волокнами, называют стеклопластиками, металлическими — металлопластиками, органическими — органопластиками, боровыми — боропластиками, углеродными — углепластиками и т. п.

Для *металлических и керамических композитов* чаще всего в названиях указывается сначала материал матрицы, затем — материал наполнителя. Например, «медь — вольфрам» — композит с медной матрицей и вольфрамовыми волокнами.

В зависимости от исходного структурного и фазового состояния материала матрицы различают металлические композиционные материалы с порошковой, литой и листовой матрицей. Композиты, получаемые из чередующихся слоев волокон и тонких листов матричного материала, называют иногда композитами типа «сэндвич». Для получения керамического композита чаще всего используют матрицу в виде порошка. В качестве примера структуры на рис. 3 показано строение волокнистых композитов.

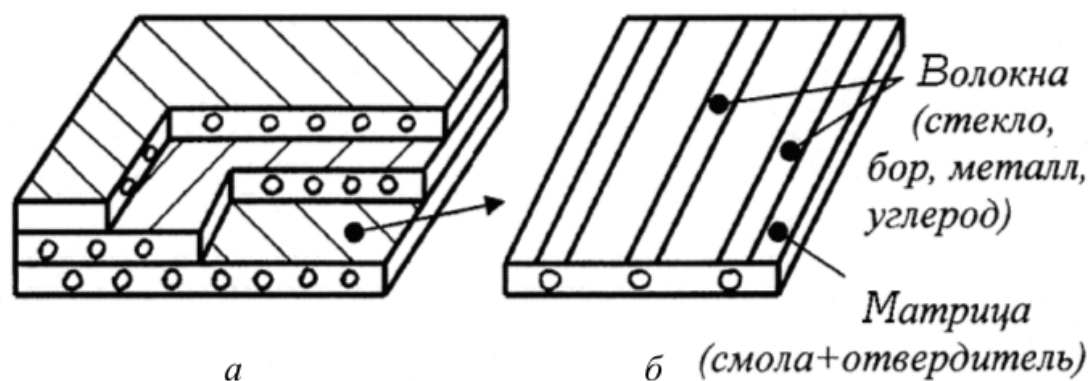


Рис. 3. Структура волокнистых композитов:
a — многослойный; *б* — слой однонаправленного композита

Конструкционный принцип. По ориентации и типу наполнителя композиты можно разделить на две группы: *изотропные и анизотропные*.

Изотропными называют материалы, имеющие одинаковые свойства во всех направлениях. К числу *изотропных* относятся,

например, дисперсно-упрочненные и хаотично армированные материалы. В первом случае упрочняющие элементы имеют примерно равноосную форму, во втором упрочнение осуществляется короткими (дискретными) частицами игольчатой формы, хаотично ориентированными в материале матрицы. В качестве таких частиц используют короткие волокна или нитевидные кристаллы — усы. При этом композиционные материалы получают квазиизотропными, т. е. анизотропными в микрообъемах, но изотропными в объеме элемента конструкции.

Анизотропными называют материалы, свойства которых зависят от направления. Армирующие волокна в таких композитах ориентированы в определенных направлениях. В этой группе можно выделить композиты с однонаправленными непрерывными волокнами, материалы с дискретными волокнами и материалы с непрерывными волокнами с произвольной ориентацией. Обычно используют анизотропные композиты с определенной симметрией свойств.

Множество широко применяемых композиционных материалов можно рассматривать как ортотропные или трансверсально изотропные среды. Ортотропными (ортогонально-анизотропными) называют материалы, характеризующиеся наличием в каждом элементарном объеме трех взаимно перпендикулярных плоскостей симметрии свойств. К таким материалам можно отнести композиты, армированные волокнами с продольно-поперечной укладкой, а также слоистые композиты, армированные в двух направлениях с заданным углом. Слоистые материалы со звездной укладкой в смежных слоях обладают изотропией свойств в плоскости листа, если угол между направлениями волокон в смежных листах меньше 72° . Материалы, имеющие плоскость изотропии и перпендикулярную к ней ось симметрии, называются трансверсально-изотропными. К таким материалам обычно относятся и однонаправленные композиционные материалы. В этом случае плоскость изотропии перпендикулярна к направлению укладки волокон.

Технологический принцип. По способу получения *полимерные* композиционные материалы можно разделить на *литейные*, *прессованные* и *намоточные*. Полимерные с хаотичной структурой композиционные материалы обычно получают литьем и прессованием. Полимерные композиты с ориентированной структурой

получают намоткой и прессованием. **Металлические** композиты по способу получения делят на *литейные* и *деформируемые*. Литейные металлические композиты получают, пропитывая арматуру расплавленным матричным сплавом либо применяя направленную кристаллизацию сплавов эвтектического состава. Для получения деформируемых металлических композитов применяют спекание, горячее прессование, диффузионную сварку, горячую штамповку и ковку, взрывное прессование, электролитическое, химическое и парогазовое осаждение, плазменное и газопламенное напыление. Для получения керамических композитов обычно используют твердофазные методы.

Эксплуатационный принцип. Композиционные материалы по назначению можно разделить на ряд классов:

- *материалы общего конструкционного назначения*, используемые в различного рода несущих элементах конструкций самолетов, ракет, двигателей, сосудов высокого давления и т. п.;
- *жаропрочные материалы*, применяемые для лопаток турбин, камер сгорания и других изделий, работающих при повышенных температурах;
- *термостойкие материалы*, предназначенные для изделий, эксплуатируемых в условиях резких перепадов температуры;
- *теплозащитные композиты*;
- *фрикционные и антифрикционные материалы*, применяемые для изготовления деталей кинематических систем различного рода, в том числе зубчатых колес и подшипников скольжения;
- *ударопрочные материалы*, предназначенные для различного вида броневой защиты;
- *композиты со специальными свойствами* (электрическими, магнитными, ядерными, оптическими и др.).

3. СТРОЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

Дисперсно-упрочненный композит представляет собой материал, в матрице которого равномерно распределены мелкодисперсные частицы второго вещества. В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью множества практически не растворяющихся в ней частиц второй фазы создается структура, эффективно сопротивляющаяся пластической деформации.

В волокнистых композитах матрица (чаще всего пластичная) армирована высокопрочными тонкими волокнами, проволокой, нитевидными кристаллами. На прочность волокна наиболее сильно влияют дефекты, ориентированные в поперечном направлении. Продольные трещины менее опасны для волокна, чем поперечные. Малый диаметр волокна ограничивает возможную длину поперечных трещин, поэтому концентрация напряжений для более тонких волокон меньше, чем для толстых. Следовательно, для тонких волокон поперечные трещины менее опасны, чем для толстых. Кроме того, тонкие волокна легче изогнуть, чем поцарапать. Тонкие волокна «уходят» от нагрузки, способной их повредить, они изгибаются под воздействием поперечных сил. По этим причинам, например, прочность волокон из стекла на один-два порядка превосходит прочность того же стекла в виде блоков.

Известно, что вязкий, лишенный хрупкости материал перед разрушением претерпевает значительную деформацию, причем пластические деформации в реальных кристаллических материалах начинаются при напряжениях, которые во много раз меньше теоретически рассчитанных для идеальных материалов. Такая низкая прочность по сравнению с теоретической объясняется тем, что в пластической деформации активно участвуют дислокации — локальные искажения кристаллической решетки. Теоретическую прочность кристаллического материала (предельное выдерживаемое механическое напряжение $\sigma_{т.п}$) можно оценить как

$$\sigma_{т.п} = 0,16E, \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала.

В соответствии с теорией дислокаций пластическая деформация в идеальном кристалле происходит гораздо легче путем зарождения небольшого участка сдвига в районе дислокации. На это требуется механическое напряжение порядка $0,06E$. Среднее зна-

чение прочности материала увеличивается с уменьшением размера или объема испытываемого образца. Нитевидные кристаллы, диаметр которых составляет несколько микрометров, характеризуются отсутствием микротрещин, дислокаций, пор и поверхностных несовершенств, которые в большом количестве встречаются в обыкновенных кристаллических веществах. Предел прочности нитевидных кристаллов достигает $0,1E$, что очень близко к значению теоретической прочности, рассчитанному по формуле (1). Металлы и сплавы в обычных условиях имеют прочность порядка $0,001E$. Поликристаллические металлические и углеродные волокна, применяемые в композиционных материалах, обладают прочностью $(0,01...0,02)E$.

Особое место в современном материаловедении занимает новое технологическое направление — разработка и получение *наноструктурных материалов* с оптимальным комплексом физико-химических и механических свойств. *Наноматериалы* представляют собой особую группу дисперсных систем с очень развитой внутренней поверхностью раздела между составляющими фазами. Характерные размеры структурных элементов составляют $10^{-7}...10^{-9}$ м. При этом обеспечивается принципиально новый уровень свойств и конструкционных, и функциональных материалов.

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что принцип композиционного упрочнения материалов заключается в создании в них внутренней структуры, во-первых, затрудняющей движение дислокаций, и, во-вторых, обеспечивающей при деформации нагружение армирующих элементов композита, — гораздо более прочных, чем чистый исходный материал (матрица). Первому случаю соответствуют дисперсно-упрочненные композиционные материалы, второму — волокнистые. Наиболее сильное торможение передвижению дислокаций создают дисперсные частицы, например, химические соединения типа карбидов, нитридов, оксидов, боридов, характеризующиеся высокой прочностью и температурой плавления. Проблема повышения конструкционной прочности заключается не только в повышении прочностных свойств материалов, но и в том, чтобы при высокой прочности обеспечить высокое сопротивление вязкому разрушению, т. е. повысить надежность материала. В дисперсно-упрочненных материалах заданные прочность и надежность достигаются путем формирования определенного структурно-

го состояния, при котором эффективное торможение дислокаций сочетается с их равномерным распределением в объеме материала либо (что особенно благоприятно) с определенной подвижностью скапливающихся у барьеров дислокаций для предотвращения хрупкого разрушения. В дисперсно-упрочненных материалах оптимальным содержанием дисперсной фазы считается 2...4 %. Дисперсные частицы в указанных материалах в отличие от волокон создают только «косвенное» упрочнение, то есть благодаря их присутствию стабилизируется структура, формирующаяся при термической обработке. Содержание волокнистых наполнителей (объемная доля) в соответствующих композитах достигает 75 %. Другая отличительная особенность волокнистой композиционной структуры — анизотропия свойств, обусловленная преимущественным расположением волокон в том или ином направлении. Дисперсно-упрочненные материалы являются изотропными, так как упрочняющие дисперсные частицы имеют равноосную форму.

4. ВОЛОКНИСТЫЕ АРМИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Армирующие волокна композитов должны удовлетворять комплексу эксплуатационных и технологических требований. Они должны иметь высокую температуру плавления, малую плотность, высокую прочность в интервале рабочих температур, технологичность, минимальную растворимость в связующем материале, высокую химическую стойкость, в них должны отсутствовать фазовые превращения в интервале рабочих температур, токсичность в процессе изготовления и при эксплуатации.

Классификация армирующих элементов по типу структуры представлена в табл. 1.

Если при изготовлении волокнистого композита требуется изгибать армирующие волокна по окружности с радиусом r , то максимально допустимый диаметр волокна d рассчитывают по формуле

$$d = 2\sigma_b r / E, \quad (2)$$

где σ_b и E — предельная прочность и модуль упругости волокна.

Если диаметр волокна будет превышать значение, определяемое формулой (2), то волокно при изгибе разрушится.

Классификация армирующих элементов

Структура	Материал
Аморфная	Стекло, кремний, бор
Монокристаллическая	Керамика, металл
Поликристаллическая	Керамика, металл, углерод
Многофазная	Карбиды, аморфный бор с углеродом
Макромолекулярная	Органические соединения

Для армирования матриц из органических смол наиболее часто используют стеклянные, углеродные, органические и борные волокна. Применяют также базальтовые, сапфировые, волокна на основе карбида кремния. Армирующие волокна могут иметь неоднородную структуру и обладать анизотропией механических характеристик. К волокнам с выраженной анизотропией относятся органические арамидные волокна, углеродные, борные. Стеклянные и металлические волокна рассматриваются как однородные и изотропные. Диаметр непрерывных волокон углерода, бора, их карбидов для волокнистых композитов обычно составляет 100...150 мкм.

Ориентировочные свойства некоторых непрерывных волокон приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства непрерывных армирующих волокон

Материал волокна	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, 10 ⁹ Н/м ²	Удельная прочность, 10 ⁶ Н·м/кг	Модуль упругости, 10 ⁹ Н/м ²
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	2050	3960	2,1	0,53	450
Бор (В)	2170	2630	3,5	1,33	420
Углерод (С)	3650	1700	2,5	1,47	250 – 400
Карбид бора (В ₄ С)	2450	2360	2,3	0,98	490
Карбид кремния (SiC)	2650	3900	2,5	0,64	480
Вольфрам (W)	3400	19400	4,2	0,22	410
Молибден (Mo)	2620	10200	2,2	0,21	360
Бериллий (Be)	1285	1850	1,5	0,81	240

Стеклянные волокна. Эти волокна применяют в качестве армирующих в широко используемых композитах — стеклопластиках. При сравнительно малой плотности $(2,4...2,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ они имеют высокую прочность (3,5 ГПа при растяжении), низкую теплопроводность. Стеклянные волокна отличаются хорошей теплоустойчивостью и устойчивостью к химическому и биологическому воздействию. Форма сечения волокон может быть различной: круг, треугольник, квадрат, прямоугольник и шестиугольник. Возможно применение волокон в виде полых трубок — капилляров. Диаметр волокон из стекла составляет 3...19 мкм.

Стеклянные волокна изготавливают вытягиванием стеклянной массы через фильеры (диаметром 0,8...3,0 мм) и дальнейшим быстрым вытягиванием до нужного диаметра.

Кварцевые волокна получают из стержней вытягиванием, поскольку формование из расплава затруднено высокой вязкостью расплавленного кварца даже при температуре 2400 К.

Кремнеземное волокно, содержащее 94...99 % SiO_2 , получают выщелачиванием из силикатных стекол оксидов алюминия, бора, кальция, магния. Наиболее широко применяется бесщелочное алюмосиликатное Е-стекло. В его состав входят оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O и некоторые другие компоненты.

Определяющее влияние на прочность стекловолокон оказывает состояние их поверхности, зависящее от способа формования. Поверхность готовых стеклянных волокон покрывают *замасливателем*, который предотвращает истирание волокон при транспортировке и различных видах переработки. Перед изготовлением композита замасливатели удаляют с помощью термической обработки или смывают, после чего на поверхность волокон в ряде случаев наносят *аппреты* — вещества, способствующие созданию прочной связи на границе «волокно — матрица». В качестве аппретов применяют кремнийорганические и металлоорганические соединения.

При повышении температуры от 300 до 1200 К модуль упругости кварцевого волокна возрастает с 74 до 83 ГПа. Бесщелочные алюмосиликатные стекла начинают снижать свою прочность при 600 К, натрийкальцийсиликатные, боратные, свинцовые и фосфатные — при 400...500 К. Модуль упругости снижается незначительно вплоть до температуры размягчения.

Органические волокна. Для получения высокопрочных и высокомодульных композитов с полимерной матрицей (органопластиков) применяют волокна на основе ароматических полиамидов (арамидов). *Арамид* (полипарафенилентерефталамид) — синтетическое волокно с высокой механической и термической прочностью. Арамид состоит из бензольных колец, соединенных друг с другом через группу $-\text{NH}-\text{CO}-$. Между водородными и кислородными отростками соседних молекул образуются прочные межмолекулярные связи, обеспечивающие высокую механическую прочность всего волокна. Благодаря низкой плотности арамидные волокна по удельной прочности превосходят все известные в настоящее время армирующие волокна и металлические сплавы, уступая только углеродным и борным волокнам. Эти волокна можно использовать для изготовления тканых армирующих материалов. Механические свойства арамидных волокон приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства арамидных волокон

Марка волокна	Плот- ность, кг/м ³	Диа- метр, мкм	Модуль упруго- сти, ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм, ГПа	Предель- ная де- форма- ция, %
ВНИИВЛОН (РФ)	1430	15	110–130	2,1–2,6	3–5
СВМ (РФ)	1430	15	125–135	3,8–4,2	3–4
Терлон (РФ)	1450	—	130–160	3,3–3,6	2,7–3,5
Кевлар (США)	1450	—	60	2,7	4,5
Кевлар-29 (США)	1450	—	60–70	2,8–3,3	4,5
Кевлар-49 (США)	1450	—	130–140	3,6–3,8	2,7–3,5
Аренка (Голландия)	1450	—	130–150	3,3–3,6	2,7–3,5

Углеродные волокна. Углеродные волокна обладают высокой теплостойкостью, низким коэффициентом трения и термического расширения, высокой химической стойкостью. Электрические свойства углеродных волокон могут варьироваться и позволяют создавать волокна, обладающие как проводниковыми, так и полупроводниковыми свойствами. Они могут иметь сильно развитую поверхность, высокие значения удельных механических параметров.

Углеродные волокна делят на *карбонизованные* (температура обработки 1173...2273 К, содержание углерода 80...90 %) и *графитизированные* (температура термообработки до 3273 К, содержание углерода выше 99 %).

Существует два основных типа исходных материалов для углеродных волокон: химические волокна — вискозные или полиакрилонитрильные (ПАН) и углеродные пеки.

Процесс получения углеродных волокон из ПАН-волокон включает текстильную подготовку материала, окисление, высокотемпературную обработку (карбонизацию и графитизацию). Окисление облегчает дегидрирование полимера, приводит к получению оптимальной структуры углерода. Для улучшения качества волокон и предотвращения их усадки при окислении проводят вытяжку волокон. В процессе высокотемпературной обработки осуществляется переход от органического волокна к углеродному. При этом происходят процессы ароматизации углерода и формирования структуры углеродного волокна. Обработка проводится в вакууме или в инертной среде — азоте, гелии или аргоне. Конечная температура термообработки существенно влияет на свойства углеродных волокон. Изменяя ее, можно управлять свойствами волокон.

Более дешевые и доступные исходные материалы — нефтяные и каменноугольные пеки, представляющие собой смесь олигомерных продуктов. Волокна из них формируют, пропуская расплав при температуре 370...620 К через фильеры диаметром 0,3 мм. Затем волокно вытягивается, удлиняясь в 1000–5000 раз. При этом достигается высокая степень ориентации макромолекул волокна. Карбонизация и графитизация проводится так же, как для ПАН-волокон.

Углеродные волокна имеют фибриллярное строение. Характерный элемент структуры — закрытые поры, которые могут занимать до трети объема волокна. Поры имеют иглоподобную форму, ориентированы вдоль оси волокна, их средняя длина равна 0,02...0,03 мкм, диаметр 0,001...0,002 мкм. Увеличение числа пор снижает прочность волокна при растяжении.

Углеродные волокна условно делят на две группы: *высокомодульные* (модуль упругости $E = 300...700$ ГПа, прочность $\sigma_b = 2,0...2,5$ ГПа) и *высокопрочные* ($E = 200...260$ ГПа, $\sigma_b = 2,5...3,3$ ГПа).

Получены также волокна, сочетающие высокую прочность и высокое значение модуля упругости.

Механические свойства некоторых углеродных волокон приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механические свойства углеродных волокон

Марка волокна	Плот- ность, кг/м ³	Диа- метр, мкм	Модуль упруго- сти, ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм, ГПа	Предель- ная де- форма- ция, %
ВМН-3	1710	7,0	250	1,43	0,6
ВМН-4	1710	6,0	270	2,21	0,8
Торнел-300 (США)	1770	7,0	238	3,15	1,3
Карболон-L (Япония)	1950	6,0	380	2,42	0,6
АЕ-1 (Великобритания)	1990	7,8	407	1,74	0,4
Регилор AG (Франция)	2000	11,0	420	1,9	0,45

Борные волокна. Композиты на основе борных волокон имеют высокие прочностные (при растяжении и сжатии) и усталостные характеристики, а также высокий модуль упругости.

Борные волокна представляют собой непрерывные моноволокна диаметром 5...200 мкм, анизотропные и неоднородные по структуре. Традиционным методом получения волокон бора является его химическое осаждение при высокой температуре (1400 К) из смеси газов $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$ на вольфрамовую подложку в виде нитей диаметром примерно 12 мкм. В результате осаждения образуется сердцевина из боридов вольфрама (WB , W_2B_5) диаметром 15...17 мкм, вокруг которой располагается слой поликристаллического бора. Предел прочности сердцевины ниже предела прочности волокна в целом. Сердцевина нагружена большими сжимающими напряжениями, а борная оболочка — растягивающими. Это приводит к появлению радиальных трещин, которые растут с увеличением диаметра волокна. Поверхностное травление волокон позволяет уменьшить их дефектность и увеличить прочность.

Для повышения жаростойкости и защиты от действия некоторых металлических матриц волокна покрывают карбидом кремния при осаждении из парогазовой фазы в среде аргона и водорода. Такие волокна называют *борсиком*.

Борные волокна выпускают как в виде моноволокон, так и в виде лент полотняного переплетения шириной 5...50 см, в которых наряду с борными волокнами присутствуют полиамидные или другие волокна.

Борные волокна применяют совместно с полимерными и алюминиевой матрицами. Алюминиевые композиты с борными волокнами могут работать при температурах до 640 К. Борные волокна относятся к полупроводникам, поэтому их присутствие придает металлическим композитам снижение тепло- и электропроводности.

Механические свойства некоторых типов борных волокон приведены в табл. 5.

Таблица 5

Механические свойства борных волокон

Марка волокна	Плот- ность, кг/м ³	Диа- метр, мкм	Модуль упруго- сти, ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм, ГПа	Предель- ное удли- нение, %
Avco (США)	2500	143	390-400	3,47	0,9
Toshiba (Япония)	2500	99	374-393	3,23	0,84
SMPE (Франция)	2500	100	408	3,57	0,88
Wacker-Chemie (Германия)	2500	100	420	3,10	0,74

Волокна карбида кремния. Волокна этого типа, как правило, применяют в металлокомпозитах, предназначенных для эксплуатации при высокой температуре. Получают волокна карбида кремния на вольфрамовой или углеродной подложке в виде волокон. Углеродные менее прочные и дешевле, чем волокна на вольфрамовой подложке. Механические свойства волокон из карбида кремния приведены в табл. 6.

Металлические волокна. Металлические волокна, или проволоки, являются наиболее экономичными и в ряде случаев весьма эффективными армирующими материалами. Для конструкцион-

ных композитов, эксплуатируемых при низких и умеренных температурах, используют стальные и бериллиевые проволоочные волокна. Для композитов, эксплуатируемых при умеренных и высоких температурах, — вольфрамовые и молибденовые.

Таблица 6

Механические свойства карбида кремния

Параметр	Значение
Плотность, кг/м ³	3300
Модуль упругости, ГПа	400 – 500
Средняя прочность на базе 10 мм, ГПа	2 – 4
Предельная деформация, %	0,3 – 0,5
Температурный коэффициент расширения, К ⁻¹	$3,3 \cdot 10^{-6}$

Проволоочные волокна из сталей являются самыми доступными. Для изготовления тонкой высокопрочной проволоки чаще всего используют коррозионно-стойкие стали с метастабильным в условиях холодной деформации аустенитом. В процессе изготовления по оптимальным технологическим режимам происходит практически полное превращение аустенита в мартенсит, что обеспечивает значительное упрочнение (в сочетании с наклепом при холодном деформировании). Кроме того, возможно дополнительное упрочнение в результате отпуска проволоки.

Разупрочнение стальных проволок происходит после выдержек при температуре 650...670 К. Исключением является проволока из стали ВНС-9, сохраняющая свои прочностные характеристики до температуры 750...780 К.

Вольфрамовые волокна являются достаточно технологичными волокнами для изготовления композитов, эксплуатируемых при высоких температурах. Введение в вольфрам и сплавы на его основе тугоплавких дисперсных частиц (карбидных и др.) позволяет существенно повысить способность вольфрамовых волокон к сохранению высокотемпературной прочности и сопротивления ползучести.

Для повышения длительной прочности при высокой температуре распылением наносят различные тонкие (4...12 мкм) барьерные покрытия (карбиды титана и гафния, оксиды алюминия и гафния и др.). Наиболее эффективным является покрытие HfC —

единственное покрытие, позволяющее избежать рекристаллизации вольфрамовых волокон при температуре 1400 К в течение 1000 ч.

Молибденовые проволоочные волокна несколько уступают вольфрамовым по прочностным, упругим параметрам и жаропрочности.

Механические свойства некоторых металлических волокон приведены в табл. 7.

Таблица 7

Механические свойства металлических волокон

Материал волокон	Плотность, кг/м ³	Диаметр, мкм	Модуль упругости, ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм, ГПа
Алюминий (Al)	2700	—	70	0,29
Бериллий (Be)	1850	130	310	1,1
Титан (Ti)	4540	—	120	0,55
Кремний (Si)	2330	—	72	1,0
Сталь ВНС-9	7800	100–300	200	3,5–3,8
Молибден (Mo) + + 5 % ванадия (V)	10015	250	334	1,8–2,0
Вольфрам (W)	19300	50	410	3,3

Отметим, что наиболее легким и упругим металлом по критерию максимального отношения значения модуля упругости к плотности металла является бериллий.

Волокна с металлическими покрытиями. Волокна конструкционных композитов в ряде случаев имеют покрытия, выполняющие различные функции: защиту поверхности волокон от окисления или активного химического объемного взаимодействия с поверхностью матрицы, от теплового воздействия при изготовлении изделия или при его эксплуатации (барьерные функции), повышение смачиваемости поверхности волокон при формовании композита, устранение поверхностных микродефектов волокон.

Нанесение покрытий на углеродные волокна особенно важно в связи с тем, что они плохо смачиваются расплавами основных конструкционных металлов и сплавов либо смачиваются, но при этом активно химически взаимодействуют с ними. Расплавы алюминия и сплавов на его основе не смачивают углеродные волокна

и ленты из них. В то же время при контактировании с большими массами расплава происходит образование карбида алюминия Al_4C_3 и разупрочнение волокон.

Никелевые покрытия наряду с определенными достоинствами (коррозионная стойкость, пластичность) имеют серьезные недостатки. При длительных выдержках при температуре 1100...1400 К применение никелевого покрытия углеродных волокон приводит к резкому снижению прочности вследствие рекристаллизации и графитизации волокон. При малой толщине покрытия последующая пропитка расплавом алюминия приводит к растворению покрытия, отслоению матрицы от волокон. При увеличении толщины никелевого покрытия отмечаются высокие концентрации насыщения алюминия никелем, образование интерметаллидного соединения Al_3Ni и увеличение хрупкости матрицы (и в целом композита).

Более эффективны металлические покрытия (Cr, Mo, W), наносимые на углеродные волокна или ленты методом термического разложения легколетучих карбониллов перечисленных металлов при температуре соответственно 900, 1050, 950 К, а также покрытия из карбида кремния, карбида титана, нитридов титана или циркония.

Параметры углеродных волокон с различными покрытиями и без них приведены в табл. 8.

Таблица 8

Свойства углеродных волокон с покрытиями

Материал покрытия	Толщина покрытия, мкм	Модуль упругости, ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм, ГПа
Карбид кремния (SiC)	0,001	247/292	1,42/154
	0,002	252/319	1,78/1,67
	0,010	218/220	1,88/1,75
Нитрид титана (TiN)	0,029	244/—	1,73/2,26
	0,035	263/—	1,15/1,45
Нитрид циркония (ZrN)	0,055	215/257	1,77/1,36
	0,004	—	1,10/1,32
	0,061	268/281	1,10/0,97

Примечание. В числителе приведены значения для волокон без покрытий, в знаменателе — с покрытиями.

При выборе материалов покрытий необходимо учитывать, что способ нанесения покрытия и его рабочие параметры должны обеспечивать концентрацию атомов материала волокон в материале покрытия, близкую к предельной растворимости, причем необходимо, чтобы происходило ограниченное растворение материала волокна в материале покрытия, а не наоборот. Структура покрытия должна быть относительно крупнозернистой, иначе в связи с высокой избыточной энергией кристаллов микропластическая деформация материала покрытия затрудняется, и его разрушение имеет в основном хрупкий характер. Оптимальные толщины металлических покрытий — в пределах от нескольких десятых долей микрона до нескольких микронов. В частности, при пластифицировании молибденовой проволоки диаметром 120 мкм гальваническими покрытиями меди, никеля и хрома наибольшее увеличение прочности волокон достигается при толщине покрытий около 1 мкм. При этой толщине покрытия из меди прочность возрастает с 1,8 до 2,0 ГПа.

Исходная прочность углеродных волокон 2,2...3,2 ГПа после пассивации путем осаждения на их поверхность атомарного пироуглерода, отжига при 1273 К в течение 100 ч и в результате нанесения никелевого покрытия толщиной 1 мкм возрастает до 8 ГПа.

Технологическими и пластифицирующими покрытиями волокон бора, бора с покрытием из карбида кремния, а также карбидокремниевых волокон являются покрытия из алюминия и сплавов на его основе, наносимые методом протягивания волокон через расплав. Эти покрытия существенно стабилизируют прочность перечисленных волокон.

Тканые армирующие материалы. Для получения слоистых композитов в качестве армирующих элементов используют ткани на основе высокопрочных волокон различной природы. Тканые армирующие материалы получают путем текстильной переработки стекловолокон диаметром 3...11 мкм. Такие материалы удобны при изготовлении крупногабаритных изделий.

Тканые материалы могут быть классифицированы по материаловедческому или конструктивному принципам. В первом случае, классифицируя армирующие ткани по материалу волокон, можно выделить стеклоткани, органоткани, углеткани, органостеклоткани, бороорганостеклоткани. Классификация по конструктивному прин-

ципу — это классификация по типу переплетения волокон в ткани: полотняное, ситцевое, сатиновое, саржевое, трикотажное. В зависимости от соотношения волокон в основе и утке ткани могут обладать анизотропией механических свойств и варьироваться от равнопрочных до кордных (основных и уточных), в которых основная масса волокон ориентирована в направлении основы или утка.

Выпускают ткани на основе стеклянных, органических и углеродных волокон, имеющие различные типы переплетения. Наиболее простая схема — полотняное переплетение, когда каждая нить основы и утка проходит поочередно сверху и снизу пересекающихся нитей. При сатиновом переплетении каждая нить проходит поочередно сверху, а затем снизу пересекающей ее нити. Более сложное — саржевое переплетение, при котором каждая нить основы и утка проходит поочередно сверху и снизу двух и четырех пересекающих ее нитей. При этом на поверхности ткани образуется структура диагональных линий. Возможны и другие типы переплетений, например трехмерные.

Стеклоткани имеют поверхностную плотность ориентировочно $0,07...0,39 \text{ кг/м}^2$ при толщине $0,06...0,40 \text{ мм}$, средняя прочность по основе составляет $0,2...0,5 \text{ ГПа}$, по утку — $0,14...0,29 \text{ ГПа}$.

Органоткани имеют поверхностную плотность ориентировочно $0,075...0,180 \text{ кг/м}^2$, толщину — $0,15...0,35 \text{ мм}$, среднюю прочность по основе $0,26...0,29 \text{ ГПа}$, по утку — $0,21...0,39 \text{ ГПа}$.

Арамидные ткани характеризуются довольно высокой термостойкостью. После нагрева до 530 К они сохраняют исходный уровень свойств, имеют малую усадку по сравнению с другими армирующими тканями.

Углеродные ткани обладают высокой термостойкостью, жесткостью и прочностью. Их выпускают в виде однонаправленных лент (кордовые ткани), с полотняным, сатиновым переплетением, иногда — саржевого или более сложного переплетения.

5. КОРОТКОВОЛОКНИСТАЯ АРМАТУРА

Измельченные *минеральные волокна* получают из минеральной ваты. Эти волокна состоят на 75% из силиката кальция и других легких металлов (25%). Диаметр таких волокон равен $1...10 \text{ мкм}$,

средняя длина — 275 мкм. Размеры нитевидных армирующих кристаллов керамических, полимерных и других материалов составляют от долей до нескольких микрометров по диаметру и примерно 10...15 мм по длине.

Измельченные минеральные волокна можно использовать в качестве наполнителя реактопластов и термопластов, а также в клеях, герметиках и каучуке. Модуль упругости таких волокон — 103 ГПа, средняя прочность — 1,4 ГПа.

Волокна *франклин* представляют собой волокнистый кристаллический сульфат кальция в форме полугидрата, γ -ангидрита или β -ангидрита. Волокна франклин образуются в результате кристаллизации в водной среде при повышенных давлении и температуре. Длина кристаллов — 80 мкм, диаметр — 2 мкм. Эти волокна химически стабильны, обладают очень низкой растворимостью в воде, имеют высокую термостойкость и хорошие теплоизоляционные свойства. Волокна франклин применяют как наполнитель пластмасс и металлических сплавов (например, алюминия).

Волокна *даусонит* — искусственные игольчатые кристаллы карбоната гидроксида и алюмината натрия диаметром 0,4...0,6 мкм длиной порядка 20 мкм, используемые для наполнения термопластов. Такие композиты сочетают в себе высокий модуль упругости, хорошую теплостойкость и пониженный термический коэффициент расширения.

Волокна *файбекс* — монокристаллы неорганического титаната диаметром 0,10 ... 0,15 мкм, получаемые перекристаллизацией солей из расплава и имеющие сравнительно высокие модуль упругости (276 ГПа) и прочность (6,9 ГПа). Их используют в качестве усиливающего наполнителя для пластмасс.

Усы (нитевидные монокристаллы) имеют механическую прочность, эквивалентную прочности связи между атомами. Их прочность обеспечена высоким совершенством и бездефектностью структуры. Разрушающее напряжение при растяжении усов в 5–10 раз больше, чем у непрерывных армирующих волокон. Свойства некоторых нитевидных кристаллов приведены в табл. 9.

Свойства нитевидных кристаллов

Материал	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, 10 ⁹ Н/м ²	Удельная прочность, 10 ⁶ Н·м/кг	Модуль упругости, 10 ⁹ Н/м ²
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	2050	3960	28	7,10	500
Нитрид алюминия (AlN)	2400	3300	15	4,55	380
Карбид бора (B ₄ C)	2450	2520	14	5,55	480
Оксид магния (MgO)	2800	3600	24	6,66	310
Карбид кремния (SiC)	2650	3210	27	8,40	580
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	1900	3180	15	4,72	495
Углерод (C)	3650	1700	21	12,35	700

6. КОМПОЗИТЫ С ПОЛИМЕРНОЙ И УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦАМИ

Наполнителями в композитах с полимерной и углеродной матрицами могут быть непрерывные и дискретные волокна различной природы, ткани и нетканые материалы из таких волокон. Наиболее широко применяют пластики, армированные стеклянными, углеродными, органическими, борными и некоторыми другими волокнами. В качестве матрицы используют эпоксидные, полиэфирные и некоторые другие термореактивные смолы в отвержденном виде, а также термопластичные полимерные материалы.

Достоинствами композитов с полимерной матрицей являются высокие удельные прочностные и упругие параметры, стойкость к агрессивным химическим средам, низкие тепло- и электропроводность, прозрачность стеклопластиков для радиоволн. К достоинствам также следует отнести технологичность этих композитов при изготовлении: наполнитель соединяется с матрицей при умеренных температурах и давлениях, при этом можно применять прес-

сование и намотку наполнителя с последующей или одновременной его пропиткой материалом матрицы.

К недостаткам пластиков относятся их низкая прочность и жесткость, низкая тепловая и радиационная стойкость, гигроскопичность, изменение свойств в процессе старения и под воздействием климатических факторов. Карбонизация полимерной матрицы, получаемая при образовании углерод-углеродных композиционных материалов, позволяет достичь качественно нового уровня свойств материала. Такие материалы представляют собой систему «углеродное волокно — углеродная матрица» и обладают чрезвычайно высокой теплостойкостью (до 2500 К), хорошей стойкостью к термоудару (как тугоплавкие материалы), низкими значениями температурного коэффициента расширения и теплопроводности, высокой стойкостью к химическим реагентам.

Изготовление волокнистых полимерных композитов

Важнейшими технологическими методами изготовления волокнистых композитов являются: пропитка армирующих волокон матричным материалом; формование в пресс-форме лент упрочнителя и матрицы, получаемых намоткой; холодное прессование обоих компонентов с последующим спеканием; электрохимическое нанесение покрытий на волокна с последующим прессованием; осаждение матрицы плазменным напылением на упрочнитель с последующим обжатием; пакетная диффузионная сварка монослойных лент компонентов; совместная прокатка армирующих элементов с матрицей.

Прессование позволяет изготавливать в пресс-формах детали массой от нескольких граммов до 100 кг с толщиной от 0,5 до 100 мм, а иногда и более. Существует две разновидности метода прессования: прямое и литьевое.

Прямое горячее прессование применяют при изготовлении деталей средней сложности, с большими габаритами и массой.

При *литьевом прессовании* материал укладывают в загрузочную камеру предварительно замкнутой пресс-формы, а затем под действием высокой температуры и давления материал перетекает непосредственно в пресс-форму. Литьевое прессование целесообразно применять при изготовлении тонкостенных деталей сложной

конфигурации с мелкой и тонкой арматурой при повышенных требованиях к точности размеров изготавливаемой детали.

Для стеклонаполненных композитов на основе эпоксидного связующего минимальное давление прессования равно 2,5...5,0 МПа, для слоистых композитов — 1,0...5,0 МПа при всех видах связующих материалов.

Технологический процесс прямого прессования волокнистых полимерных композитов состоит из стадий подготовки и дозирования материала, его предварительного подогрева, загрузки пресс-формы и смыкания пресс-формы, подпрессовки, выдержки под давлением, подъема подвижной плиты пресса и разъема пресс-формы, извлечения детали, очистки пресс-формы и подготовки ее к следующему рабочему циклу.

Контактное формование применяют для изготовления крупногабаритных малонагруженных изделий сложной конфигурации. Процесс изготовления заключается в нанесении разделительного покрытия на формы, раскрое армирующих материалов, приготовлении связующего, укладке армирующего материала на форму, нанесении на армирующий материал связующего и пропитки арматуры, формовании изделия с одновременным или последующим его отверждением при комнатной температуре или нагревании до 70...95 °С, извлечении изделия из формы и его размерной обработке. Контактное формование имеет целый ряд недостатков: значительный разброс физико-механических свойств изделий, длительность и трудоемкость процесса. Метод считается недорогим, так как для его реализации не требуется дорогостоящая технологическая оснастка. Его применяют при изготовлении лодок, крыльев автомобилей, кузовов специальных машин и радиопрозрачных укрытий для антенн.

Контактно-вакуумное формование осуществляется за счет прижима к форме слоя мягкой композитной заготовки с помощью внешнего эластичного мешка. Этот способ применяют, как правило, в опытном производстве при изготовлении небольших серий крупногабаритных изделий сложной формы из однослойных и многослойных композитов.

Автоклавное формование применяют в производстве однослойных и многослойных крупногабаритных изделий сложной формы с более высокими и стабильными свойствами при доста-

точно большой серии изделий. Формование происходит при контроле температуры, обеспечивающей режим отверждения композита. Избыточное давление в автоклаве создается инертным газом и в процессе формования может изменяться в соответствии с технологической программой. Режимы автоклавного формования по температуре и давлению назначают исходя из вида применяемого связующего и размеров формуемого изделия.

Намотка — один из самых распространенных и совершенных процессов изготовления высокопрочных армированных оболочек. При этом методе лента, образованная системой нитей или сформированная из ткани, пропитывается полимерным связующим, подается на вращающуюся оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия, и укладывается в ней в различных направлениях. После получения необходимой толщины и структуры материала осуществляется отверждение конструкции и удаление оправки. Метод позволяет получать оболочки вращения сложной формы, реализуя при этом с высокой точностью большое количество схем армирования изделий из композитов.

При «сухой» намотке волокнистый армирующий материал перед формованием предварительно пропитывают связующим на пропиточных машинах, которые обеспечивают качественную пропитку и требуемое равномерное содержание связующего в заготовке на основе стекло-, органо- и углеволокон. При этом применяются практически любые связующие: эпоксидный, эпоксидно-фенольный, фенолформальдегидный, полиамидный.

«Мокрая» намотка отличается тем, что пропитка армирующего волокнистого материала связующим и намотка на оправку совмещены. Преимущество «мокрой» намотки заключается в низком контактном давлении формования, для чего требуется оборудование с меньшей мощностью привода. Способ «мокрой» намотки используют для изготовления крупногабаритных оболочек сложной конфигурации. Для получения заданных углов армирования применяют намоточные машины с программным управлением.

Натяжение армирующего материала при намотке — фактор, регулирующий начальное напряженное состояние двухкомпонентной системы волокнистого композита. Изменяя усилие натяжения волокон при намотке по заданному закону, можно существенно влиять на начальные напряжения в готовом изделии.

Полимерные связующие

Полимерная матрица образуется после полимеризации связующего. К связующим и матрицам предъявляют широкий комплекс требований как в процессе изготовления, так и при эксплуатации готового изделия. На этапе изготовления требуются хорошая смачивающая способность и адгезия к армирующему материалу, низкая усадка при отверждении, низкая вязкость, высокая скорость отверждения. Матрица должна обладать высокими физико-механическими параметрами, высокой термостойкостью, стойкостью к климатическим и биологическим факторам. Наиболее распространены следующие полимерные матрицы: полиэфир, фенолы, эпоксидные компаунды, силиконы, алкиды, меламины, полиамиды, фторуглеродные соединения, поликарбонат, акрилы, ацетали, полипропилен, акрилонитрилбутадиенстирольный сополимер (АБС), полиэтилен и полистирол.

Эпоксидные связующие имеют плотность 1230...1300 кг/м³, модуль упругости при растяжении 2000...4000 МПа.

Полиэфирные смолы имеют плотность 1030...1300 кг/м³, время гелеобразования 1...2 ч при комнатной температуре. Термостойкость полиэфирных матриц составляет в среднем 330...350 К, прочность при растяжении — 25...70 МПа, при сжатии — 79...130 МПа.

Термопластичные матрицы (полиэтилены высокого, среднего и низкого давления, полипропилен, фторопласты, полиэтилен-терефталаты, поликарбонат, полиамиды и др.) имеют модуль упругости 600...3000 МПа, прочность — 10...300 МПа.

Роливсаны — связующие, состоящие из дивинилароматических соединений. Отверждаются полимеризационно-поликонденсационным методом. Особенности этих связующих веществ состоят в том, что введение термостойких структур в молекулярные цепи связующего перенесено со стадии синтеза мономерно-олигомерных композиций и жидкофазного формования на стадию дополнительной обработки готового изделия после придания ему заданной формы. На этой стадии формования не требуются высокоплавкие вещества, растворители, не образуются побочные летучие продукты, что делает излишним применение высокой температуры и значительного давления. Матрица на основе роливсанов приобретает полностью сформированную конечную термостойкую структуру на

стадии термообработки при температуре не менее 450 К или облучении мощной дозой ускоренных электронов. При этом образуется сетчатый сополимер с теплостойкостью 670...700 К. Матрицы на основе роливсанов при комнатной температуре имеют плотность 1150...1170 кг/м³, модуль упругости — 1500...2500 МПа, прочность при растяжении 50...70 МПа.

Композиты с полимерной матрицей

Стеклопластики — органокомпозиты, армированные стекловолокном, в настоящее время применяемые наиболее широко. Обладают относительно высокой прочностью, устойчивостью к знакопеременным нагрузкам и тепловым ударам, высокой радиопрозрачностью, коррозионной и эрозионной стойкостью, легко поддаются механической обработке. Армирующие элементы в конструкционных стеклопластиках — непрерывные волокна в виде нитей и жгутов различной степени крутки либо ткани различного переплетения. Слоистые стеклопластики на основе тканей называют *стеклотекстолитами*.

Наиболее высокие механические параметры имеют стеклотекстолиты на основе однослойных тканей сатинового переплетения. Применение объемных стеклотканей увеличивает межслоевую прочность пластика, упрощает сборку заготовки изделия. Такие стеклотекстолиты используются в авиа- и судостроении, космической технике. Свойства стеклопластиков приведены в табл. 10.

Органопластики на основе высокопрочных арамидных волокон обладают высокими удельными прочностными и упругими параметрами, ударной вязкостью, электрическим сопротивлением, химической стойкостью, высокими теплоизоляционными свойствами. Арамидные волокна при текстильной и других видах обработки незначительно меняют свои свойства, что послужило причиной широкого применения метода намотки при изготовлении изделий из органопластиков.

Некоторые свойства органопластиков приведены в табл. 11.

Таблица 10

Свойства стеклопластиков на основе эпоксидных смол

Параметр	Однонаправленный на основе волокон		Ортогонально армированный на основе волокон	
	Е-стекло	Стекло ВМ-1	Е-стекло (1:1)	Стекло ВМ-1 (1:1)
Плотность, кг/м ³	2000	2200	1900	1050
Модуль упругости при растяжении, МПа	56	70	26	32
Прочность при растяжении, МПа	1600	2100	500	860
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,4	0,5	0,3	0,35
Температурный коэффициент линей- ного расширения, К ⁻¹	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$5,0 \cdot 10^{15}$	$0,1 \cdot 10^{15}$	$5,0 \cdot 10^{15}$	$0,1 \cdot 10^{15}$
Диэлектрическая проницаемость	4,2	4,3	4,0	4,1

Таблица 11

**Свойства эпоксидных композитов
с арамидными волокнами Кевлар-49**

Марка ткани	Плот- ность, кг/м ³	Объемное содержание связующего, %	Прочность, МПа		Модуль упругости при растя- жении, ГПа
			при рас- тяжении	при меж- сроевом сдвиге	
243	1310	44,6	561	36	40,8
281	1290	36,0	499	35	25,9
285	1280	32,5	500	31	27,3
328	1340	54,4	370	20	20,3
1050X	1280	32,1	512	32	$25,6 \cdot 10^{-6}$
1033X	1300	38,6	374	29	$24,4 \cdot 10^{-6}$

Углепластики — композиты на основе высокопрочных углеродных волокон — наряду с органопластиками являются наиболее перспективным видом композиционных материалов. Они отличаются высокими удельными параметрами прочности и жесткости, термостойкостью до 570 К, низким температурным коэффициентом линейного расширения, эрозионной стойкостью и стойкостью к агрессивным средам. В качестве армирующих элементов в конструкционных углепластике применяют непрерывные волокна в виде нитей или жгутов, ткани и нетканые материалы, в качестве матриц — эпоксидные, эпоксифенольные, полиамидные и другие смолы. Углепластики применяются в авиационной, ракетной и космической технике, в автомобилестроении, при изготовлении спортивного инвентаря и в других областях.

Механические свойства некоторых углепластиков приведены в табл. 12.

Таблица 12

Механические свойства однонаправленных углепластиков при 298 К

Матрица	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа			Предел выносливости на базе 1000 циклов, МПа
		при растяжении вдоль волокон	при сжатии вдоль волокон	при сдвиге вдоль волокон	
Эпокситрифенольная	1500 – 1550	740 – 1020	250 – 540	30 – 48	350 – 500
Полиамидная	1300 – 1400	380 – 900	300 – 400	25 – 30	300 – 400
Эпоксифенольная	1400	650	400	29	300

Боропластики — пластики с армирующими элементами в виде волокон бора. Применяются в тех случаях, когда требуется высокая прочность при сжатии, а также когда элементы конструкции работают в условиях повышенных температур. Борные волокна относятся к числу полупроводников, поэтому борные композиты обладают повышенными тепло- и электропроводностью.

В качестве связующих применяются эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и другие смолы. Некоторые свойства боропластиков приведены в табл. 13.

Таблица 13

Свойства однонаправленных волоконных боропластиков

Параметр	Значение при температуре, К	
	293	473
Прочность, МПа:		
при растяжении	1200	980
при сжатии	1160	1020
при сдвиге	60	45
Модуль упругости при растяжении, ГПа	250	240
Относительное удлинение при разрыве, %	0,35	0,45
Предел выносливости при изгибе на базе 10^7 циклов, МПа	400	350
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,5	54
Температурный коэффициент линейного расширения, K^{-1}		
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
	1,0	0,5

Гибридные армированные пластики — композиты, получаемые совмещением в едином материале волокон разной природы. Такой процесс изготовления является эффективным средством регулирования свойств композитов. Возможны различные варианты сочетания непрерывных армирующих волокон:

- создание гетероволокнистых материалов по принципу однородных смесей (волокна различных типов равномерно распределяются в первичной нити или жгуте);
- использование многокомпонентного армирующего материала: ткани, мата или шпона из различных нитей и жгутов;
- чередование слоев листовых армирующих материалов с различными волокнами.

Наибольшее распространение среди гетероволокнистых композитов получили трехкомпонентные материалы, например *углестекло-, органобор-, боругле-, углеоргановолокниты*. Независимо

от технологических приемов сочетания волокон различия в термоупругих параметрах армирующих волокон приводят к появлению термических напряжений в процессе формования композита и при изменении температурных режимов эксплуатации трехкомпонентного материала в изделии.

Для эпоксидных композитов с борокарбостеклонитями объемное содержание волокон может варьироваться в следующих диапазонах: борных — 27...78 %, углеродных — 10...69 %, стеклянных — 5...11 %. Плотность волокон составляет 1560...1840 кг/м³; прочность — 810...1660 МПа при изгибе, 430...840 МПа при сжатии; модуль упругости — 103...215 МПа. Более высокие параметры прочности соответствуют более высокому содержанию борных волокон.

Для эпоксидных композитов на основе боростеклоткани объемное содержание борных и стеклянных волокон варьируется в диапазонах 64...84 % и 16,5...35,5 % соответственно; плотность — 1730...1800 кг/м³; прочность — 730...1090 МПа при изгибе, 1040...1240 МПа при сжатии; модуль упругости — 87...152 ГПа. Более высокие значения параметров прочности и упругости соответствуют большему содержанию борных волокон в композитах.

Сочетание арамидных и углеродных волокон считают удачным вследствие того, что значения предельных температурных коэффициентов термического расширения у них близки и поэтому внутренние термические напряжения не столь значительны.

При сочетании углеродных и арамидных волокон в разном соотношении были получены однонаправленные композиты с существенно более высокими значениями прочности при сжатии, изгибе и сдвиге в сравнении с органокомпозитами. Свойства некоторых из них приведены в табл. 14.

Углерод-углеродные композиты имеют углеродную матрицу, подобную по физико-химическим свойствам углеродному волокну, обеспечивающую термостойкость углеродных композитов и позволяющую наиболее полно реализовать в композите свойства углеродного волокна.

Известны два способа получения углеродной матрицы: карбонизация полимерной матрицы (фенолформальдегидной, эпоксифенольной, кремнийорганической, полибензимидазольной) заранее сформированной углепластиковой заготовки путем высокотемпе-

ратурной обработки в неокисляющей среде (инертный газ, угольная засыпка) и осаждение из газовой фазы пироуглерода, образующегося при термическом разложении углеводородов в порах углеволокнистой подложки.

Таблица 14

Свойства однонаправленных гибридных композитов на основе углеродного волокна Торнелл-300 и арамидного волокна Кевлар-49

Параметр	Объемное содержание углеродных/арамидных волокон, %			
	100/0	75/25	50/50	0/100
Плотность, кг/м ³	1600	1560	1510	1350
Модуль упругости, ГПа	145,48	119,97	108,25	77,22
Прочность:				
при растяжении, ГПа	1,57	1,28	1,21	1,66
при сжатии, ГПа	1,01	0,94	0,69	0,29
при сдвиге, МПа	91,01	75,85	55,85	48,95

Цель термообработки — перевод связующего в кокс. Процесс сопровождается удалением испаряющихся смолистых соединений и газообразных продуктов и образованием твердого кокса, обогащающегося атомами углерода. Скорость подъема температуры при карбонизации — от нескольких градусов до нескольких десятков градусов в час, продолжительность процесса — 300 ч и более. Карбонизация заканчивается в интервале температур 1073...1773 К, при необходимости нагрев может проводиться до более высокой температуры, соответствующей переходу углерода в графит. Для устранения пористой структуры полученного кокса и повышения плотности карбонизованный материал вновь пропитывают связующим и карбонизируют. Этот процесс можно повторять неоднократно, добиваясь получения композитов с плотностью 1800 кг/м³ и более.

При получении углерод-углеродных композитов осаждением пироуглерода из газовой фазы газообразный углеводород (метан, бензол, ацетилен и т. п.) или смесь углеводорода и разбавляющего газа (водород или инертный газ) диффундирует через углеволокнистый пористый каркас, где под действием высокой температуры

происходит разложение углеводорода на нагретой поверхности волокна. Осаждающийся пироуглерод постепенно создает соединительные мостики между волокнами. Процесс осаждения проводят в вакууме или под давлением в индукционных печах. Возможно получение композитов с плотностью 1700...1800 кг/м³.

Структура карбонизованных пластиков и композитов с пироуглеродной матрицей после уплотнения из газовой фазы несовершенна. Поэтому с целью улучшения структуры материала изделия в необходимых случаях осуществляют кратковременную (несколько часов) высокотемпературную (до 3273 К) обработку в неокисляющей среде. Для защиты углерод-углеродных композитов от окисления можно наносить барьерные защитные покрытия, такие как карбиды, салициды, а также пироуглерод.

Свойства углерод-углеродных композитов существенно зависят от способа их армирования. При разрушении композит с однонаправленным армированием ведет себя как хрупкий материал, при двумерной армирующей структуре — как частично хрупкий; объемно-армированный композит проявляет свойства псевдопластичного материала. Разрушение наступает при нагрузке в 2 раза больше, чем для высокоплотного графита. Прочность при изгибе — 0,25...1,4 ГПа в зависимости от схемы армирования. Изучение структуры углерод-углеродных композитов с тремя ортогональными направлениями армирования в масштабе структурной ячейки показывает сложный характер строения углеродной матрицы без какого-либо преимущественного направления ориентации. Поэтому в масштабах, превышающих размер одной структурной ячейки, матрицу композита рассматривают как однородный и изотропный материал с известными упругими параметрами: модулем упругости E_m и коэффициентом Пуассона ν_m . Жгуты армирующих волокон, в которых микропустоты заполнены материалом матрицы, также можно считать однородным материалом, обладающим трансверсально-изотропной симметрией свойств.

Космическая техника является особой областью применения композитных материалов. Корпусные и несущие конструктивные элементы космических аппаратов — стержни и оболочки — должны обеспечивать сохранение формы и размеров в условиях периодического и неоднородного нагрева потоками солнечного излучения и теплового излучения Земли. Уровень температурных

градиентов в таких конструкциях относительно невелик (не более 1 К/мм). Однако при больших размерах конструкций могут возникать существенные деформации, притом, что, например, для космических станций допустимые деформации при размерах в десятки метров не должны превышать долей миллиметра.

Для уменьшения температурных градиентов можно применять материалы с высокой теплопроводностью, в том числе углеродные композиты. Из двумерно-армированного углерод-углеродного композита можно изготавливать крупногабаритные детали космических аппаратов. Процесс изготовления таких деталей включает в себя намотку армирующего углеродного волокна на металлическую оправку, пропитку волокна фенолформальдегидной связующей массой и отверждение сформированного пакета при температуре 140 °С и давлении 10 атмосфер, карбонизацию полученной углепластиковой заготовки в инертной среде при температуре 800...900 °С, термообработку карбонизированной заготовки в вакуумной печи при температуре 1900...2000 °С. Окончательное заполнение пор (диаметром 0,01...100 мкм) в материале, осуществляется осаждением углерода, получаемого из газовой фазы при пиролизе метана при температуре 900...1000 °С. Для максимальной сдвиговой прочности содержание связующего волокна должно составлять 26...36 мас. долей, %, а для обеспечения максимальной эрозионной стойкости содержание связующего волокна должно составлять 30 мас. долей, %.

Углеродные композиты имеют более высокую удельную прочность и меньшую плотность, чем алюминиево-магниевые сплавы, хотя теплопроводность углеродных композитов с полимерной основой (углепластик) существенно меньше, чем алюминиевых сплавов. Сравнительные характеристики алюминиевых сплавов и углеродных композитных материалов приведены в табл. 15.

Композиционные материалы применяются и в конструкциях космических солнечных энергетических установок. Эффективность солнечных батарей зависит, помимо прочего, от технических характеристик их несущей конструкции, которая включает в себя силовые элементы (рамы, балки, мачты), несущую подложку для фотоэлементов, межэлементные соединения и механизм раскрытия. Подложка жестких солнечных батарей чаще всего представляет собой тонкие листы композита, укрепленные сотовым запол-

нителем. В случае гибких солнечных батарей из стеклопластика или углепластика изготавливают раскладные мачты и пантографы, удерживающие тонкопленочные солнечные элементы в рабочем положении.

Таблица 15

**Свойства углеродных композитов и алюминиевых сплавов
(ориентировочные значения)**

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)		Коэффициент оптического поглощения	Коэффициент излучения
		100 К	400 К	100 К	400 К		
Алюминиевый сплав	2640	108	125	770	940	0,5	0,4
Углепластик	1450	3,0	11,5	450	1650	0,92	0,8

В качестве оптических приемо-передающих антенн космических летательных аппаратов применяют сферические и асферические зеркала. Надежная работа оптических систем среди прочего определяется повышенными требованиями к температурной и прочностной стабильности зеркал. Прогиб и связанные с ним искривления оптических поверхностей приводят к искажениям волновых фронтов, нарушая работоспособность оптических систем. Допустимая деформация отражающей поверхности оптического зеркала не должна превышать 1/8 длины световой волны. Для уменьшения деформаций оптических зеркал применяют облегченную арочную структуру их материала. Уменьшение массы оптического зеркала диаметром 600 мм за счет применения оптимальных материалов может составлять до 20 кг. Использование облегченных зеркал с заданными термомеханическими свойствами является важной задачей современного оптического приборостроения.

В конструкциях жидкостных реактивных двигателей космических аппаратов применяют углерод-углеродные и углерод-

карбидные композитные материалы. Такой выбор связан с необходимостью сочетания высокого механического качества с термической и окислительной стойкостью. Основные требования к композиту в этом случае — высокие прочность и стойкость к окислению при температуре до 2700 °С, малый коэффициент термического расширения, газонепроницаемость, возможность надежного и эффективного перехода «композит — металл».

7. КОМПОЗИТЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

В металлических композитах в качестве матричных составляющих применяют преимущественно алюминий, титан, сплавы на основе этих материалов, а также магниевые сплавы. В частности, используют технический алюминий, сплавы марок АМц, АМг2, АМг6, АД33, АВ, 1201, Д20, Д16, В95 и другие. При комнатной температуре алюминиевые сплавы имеют модуль упругости 68...72,5 ГПа, прочность плазменно-напыленных алюминиевых матриц варьируется от 60 до 300 МПа. Магниевые и титановые матричные составляющие обладают рядом достоинств: магниевые матрицы имеют малую плотность, титановые сохраняют высокие прочностные свойства при повышенных температурах. Однако по технологичности, особенно при горячем деформировании, они заметно уступают алюминиевым матрицам. Применяются магниевые сплавы МА2-1, МА5, МА8 и другие. Модуль упругости таких матриц 37...43 ГПа, прочность — 250...310 МПа. Титановые матрицы обладают удовлетворительной технологичностью при горячем деформировании, хорошей свариваемостью, сохраняют высокие прочностные параметры (360...1050 МПа) при повышенных температурах (до 300...450 °С).

Технологичность металлических материалов имеет большое значение, поскольку процесс изготовления металлических композитов часто включает в себя изготовление полуфабрикатов в виде лент, жгутов, а затем переработку их в готовые изделия посредством механической обработки: прокатки, прессования, спекания, сварки и др.

Механические свойства композитов определяются свойствами волокон, их ориентацией, объемным содержанием, механическими

свойствами материала матрицы. В узлах конструкций, требующих наибольшего упрочнения, армирующие волокна располагаются по направлению приложенной нагрузки. Цилиндрические изделия и другие тела вращения (например, сосуды высокого давления) армируют волокнами, ориентируя их в продольном и поперечном направлениях. Увеличение прочности и надежности цилиндрических корпусов, уменьшение их массы достигается внешним армированием высокопрочными и высокомодульными волокнами. Это позволяет в 1,5–2 раза повысить удельную конструктивную прочность по сравнению с цельнометаллическими корпусами. Упрочнение материалов волокнами из тугоплавких веществ значительно повышает их жаропрочность. Например, армирование никелевого сплава вольфрамовым волокном позволяет повысить его жаропрочность вдвое. Модуль упругости и предел прочности волокнистых композитов из алюминия, армированного волокном из бора, примерно вдвое превышают аналогичные параметры алюминиевых сплавов В-95 и АК4-1.

Таблица 16

Свойства металлических композитов с непрерывными волокнами

Матрица	Волокно-упрочнитель	Объемная доля, %	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, 10 ⁹ Н/м ²	Удельная прочность, 10 ³ Н·м/кг	Модуль упругости, 10 ⁹ Н/м ²	Удельный модуль упругости, 10 ⁹ Н·м/кг
Никель (Ni)	Вольфрам (W)	40	12500	0,8	64	265	21,2
	Молибден (Mo)	50	9300	0,7	75	235	25,25
Титан (Ti)	Карбид кремния (SiC)	25	4000	0,9	227	210	52
Алюминий (Al)	Борное волокно	45	2600	1,1	420	240	100
	Стальная проволока	25	4200	1,2	280	105	23,4
Магний (Mg)	Углеродное волокно	50	1600	1,18	737	168	105

Свойства композитов на основе алюминия и магния (прочность, модуль упругости, усталостная прочность) более чем вдвое (при температуре до 500 °С) выше, чем у обычных сплавов. Композиционные материалы на никелевой и кобальтовой основах увеличивают уровень рабочих температур конструкций, в которых они используются, до 1000...1200 °С, а на основе тугоплавких металлов и соединений — до 1500...2000 °С. Повышение прочностных и упругих свойств материалов позволяет существенно уменьшить массу конструкции, а увеличение рабочих температур этих материалов дает возможность повысить мощность двигателей, машин, агрегатов.

Некоторые свойства волокнистых композитов с металлической матрицей приведены в табл. 16.

8. ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Коррозия. Коррозионная стойкость — характерное свойство пластмасс, армированных волокном. Это позволяет использовать их вместо корродирующих металлических конструкционных материалов для эффективного предупреждения коррозии, хотя в определенной степени композиты также подвергаются химической и электрохимической коррозии.

Химическую коррозию композиционного материала можно предупредить правильным выбором смол, армирующих материалов и добавок. Наиболее ответственно следует подходить к выбору основной смолы и химических добавок, которые могут выщелачиваться из композиционного материала, приводя к коррозионному разрушению.

Электрохимическая коррозия может происходить при наложении металлических крепежных деталей на изделия из эпоксидной смолы, армированной углеродным волокном. Аналогичное явление характерно для других комбинаций, где металлические детали контактируют или находятся в непосредственной близости с более инертными композиционными материалами из эпоксидной смолы и углеродного волокна. При сочетании нескольких материалов при соответствующих условиях электрохимическое коррозионное раз-

рушение сначала происходит у «анодного» материала, затем — у «катодного». Интенсивность этой коррозии зависит от расстояния между взаимодействующими материалами в ряду напряжений, степени поляризации и величины образующегося тока. В соответствующем электролите эти факторы могут привести к разрушению двух разнородных материалов.

Табл. 17 иллюстрирует высокую инертность композиционных материалов из углеродного волокна и эпоксидной смолы по сравнению с различными металлами.

Углепластики можно использовать в контакте с менее инертными металлами при правильном выборе изоляции. На плотно прилегающие поверхности обычно наносят покрытия, которые прерывают ток гальванической пары, уменьшают площадь катода, используют ингибиторы коррозии и удаляют влагу из окружающей среды.

Таблица 17

**Гальванический потенциал в продуваемом воздухе
3,5%-ном растворе NaCl при 300 К**

Материал	Гальванический потенциал, В
Магний	–1,57
Кадмированная сталь	–0,74
Плакированный алюминий 7075	–0,69
Неплакированный алюминий 2024	–0,59
Сплав Ti-6Al-4V	–0,44
Коррозионно-стойкая сталь 304	–0,26
Насыщенный каломельный электрод	0
Эпоксидные углепластики	+0,074

Влагостойкость. Влага вызывает постепенное разрушение связующего вещества. Влажная среда приводит к постепенному снижению механических параметров эпоксидных композитов. Например, предел прочности эпоксидного композита с углеродными волокнами при повышении температуры до 400 К уменьшается примерно вдвое после 90-суточного пребывания во влажной среде. Это обстоятельство следует учитывать при использовании компози-

тов в конструкциях обтекателей скоростных летательных аппаратов. Снижение влагопоглощения способствует лучшему сохранению прочностных свойств композиционных материалов. Наилучшей защитой эпоксидных композитов от воздействия влаги является покрытие (оклейка) их поверхности алюминиевой фольгой.

Воздействие озона. Озон вызывает окислительную деструкцию таких материалов, как резина и металлы. Вместе с тем воздействие озона на композиционные материалы в условиях земной атмосферы, в том числе на больших высотах, не оказывает решающего влияния на основные механические параметры таких материалов.

Атмосферные воздействия. К атмосферным воздействиям относят суммарные эффекты, вызываемые солнечным светом, влагой, перепадами температуры, ветром и загрязняющими веществами. Влияние атмосферных воздействий на композиты проявляется в ухудшении их механических параметров в результате выщелачивания химических компонентов, частичного гидролиза смолы и отслоения связующего от волокон. Солнечное излучение может вызывать «сшивку» молекул полимера, приводящую к увеличению его хрупкости, или разрыв химических связей, который приводит к разрушению наружных слоев, расслоению и повреждению материала. Уменьшение последствий атмосферных воздействий может быть связано с использованием наружного защитного смоляного слоя (*гелькоата*). Для уменьшения воздействия ультрафиолетовой составляющей солнечного излучения в матричное вещество можно добавлять подходящие ингибиторы. Еще один стандартный прием — нанесение на композиционный материал специального «жертвуемого» покрытия, который принимает на себя разрушающие воздействия атмосферных явлений, сохраняя композит.

Воздействие температуры. Армированные пластики работают в широком диапазоне температур с максимальными перепадами от -54 до $+121$ °C и более. Прочность и жесткость обычно не меняются при низкой температуре, а в некоторых случаях даже увеличиваются. При отрицательной температуре полимеры становятся менее гибкими и в результате этого более чувствительными к усталостному разрушению. Все смолы имеют определенные пределы рабочих температур и разрушаются в большинстве случаев

при неправильном подборе матрицы для данных температурных условий. Причиной разрушения могут быть циклические температурные нагрузки, вызывающие периодические тепловые расширения и сжатия. Воздействие высокой температуры может вызвать деструкцию смол. Если температурный максимум при эксплуатации превышает 121 °С, то большинство матриц, перерабатываемых при комнатной температуре, непригодны. Смолы, отверждающиеся при высоких температурах, можно эксплуатировать при температурах, превышающих 316 °С.

Допустимые значения рабочей температуры, температуры плавления, области применения некоторых конструкционных материалов и теплозащитных композитов приведены в табл. 18.

Таблица 18

**Допустимые значения температуры применения
и температуры плавления некоторых конструкционных
и теплозащитных материалов**

Материал	Допустимая температура, К	Температура плавления, К	Область применения
Сплавы на основе алюминия	450	930	Силовые (в том числе герметичные) конструкции в виде оболочек и систем пластин
Стали	750	1500	То же
Сплавы на основе титана	840	2000	»
Сплавы на основе никеля	1140	—	То же, нагреватели печей
Вольфрам	1000	3695	Теплозащитные элементы сопел реактивных твердотопливных двигателей, обтекателей ракет, электроды
Плотный графит	1500	4000	Теплозащитные элементы сопел реактивных твердотопливных двигателей, нагреватели печей

Материал	Допустимая температура, К	Температура плавления, К	Область применения
Керамика на основе частиц или волокон SiO_2	1500 – 2000	2270	Теплозащита космических аппаратов, обтекатели ракет, технологическая оснастка печей, электротехнические детали
Полиэтилентерефталатная пленка Mylar	420	—	Надувные конструкции, солнечные концентраторы, экраны
Полиэтилентерефталатная пленка Teflon	530	600	То же, защитные покрытия в электротехнике
Полиимидная пленка Kapton	620	—	То же
Углепластик — графитэпоксид	425	—	Силовые конструкции в виде оболочек, стержней, пластин
Углепластик — графитополиимид	560	—	То же
Композит «Al — Al_2O_3 »	750	—	»
Композит «углерод — углерод»	1920	4000	Сопла реактивных твердотопливных двигателей, носовые обтекатели и кромки крыльев космических аппаратов, нагреватели печей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нельзя не отметить еще несколько достоинств конструкций из композитов. Сочетанием материалов слоев можно добиться требуемого комплекса физико-механических характеристик. Многослойные конструкции из композитов могут обеспечить не только высокую удельную жесткость и прочность, но и тепло- и звукоизоляцию, радиопрозрачность, вибропрочность, герметичность, коррозионную стойкость, стойкость к агрессивным средам, защиту от рентгеновского излучения и др. Многослойные композиты обладают уникальными свойствами, и эти свойства может проектировать инженер-конструктор или инженер-технолог.

Композиционные материалы — это материалы настоящего и будущего. С развитием современных дисперсно-упрочненных композиционных материалов связаны широкие перспективы использования принципиально новых наноматериалов и нанотехнологий.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3 т. Т. 1: Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий / Ю.В. Полежаев, С.В. Резник, Э.Б. Василевский и др.; Под ред. С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 224 с.
2. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3 т. Т. 2: Передовые технологии производства / В.В. Скороход, Н.А. Никифоров, С.В. Резник и др.; Под ред. С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 296 с.
3. *Зиновьев П.А.* Расчет конструкций из композиционных материалов: Учеб. пособие / Под ред. Н.А. Алфутова. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982. 62 с.
4. *Кузьмин М.А., Попов Б.Г., Лебедев Д.Л.* Строительная механика. Расчеты композитных конструкций на прочность. М.: Академкнига, 2007. 172 с.
5. *Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г.* Прочность, жесткость и устойчивость элементов конструкций. Теория и практикум: Строительная механика и расчеты композитных конструкций на прочность / Под ред. Б.Г. Попова. М.: Академкнига, 2008. 191 с.
6. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
7. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: Учебное пособие / О.М. Алифанов, Н.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов и др. М.: Логос, 2001. 400 с.
8. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; Под ред. Б.Э. Геллера. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1 448 с.; Кн. 2 584 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Общие сведения о композиционных материалах	4
2. Классификация композиционных материалов	6
3. Строение композиционных материалов	9
4. Волокнистые армирующие элементы.....	12
5. Коротковолокнистая арматура.....	23
6. Композиты с полимерной и углеродной матрицами.....	25
Изготовление волокнистых полимерных композитов.....	26
Полимерные связующие	29
Композиты с полимерной матрицей	30
7. Композиты с металлической матрицей.....	39
8. Влияние окружающей среды на свойства композиционных материалов	41
Заключение	46
Список рекомендуемой литературы	47