
ВВЕДЕНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И ИХ ПРИМЕНЕНИИ

Под *композиционным материалом* (КМ) понимают материал с неоднородными физическими свойствами, гетерогенный материал (т. е. материал, состоящий из множества структурных элементов), некую математическую модель, описываемую с помощью разрывных по координатам материальных функций (например, функций зависимости модулей упругости от координат), определяющих соотношений (например, соотношений напряжений и деформаций). Механика композиционных материалов рассматривает поведение различных материалов и процессы, приводящие к потере ими эксплуатационных свойств.

Композиционные материалы находят непрерывно возрастающее применение в различных областях техники, поскольку обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными конструкционными материалами, в частности: высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью и массой, жаростойкостью, радиотехническими, электроизоляционными и др. свойствами. Это предопределило успехи практического использования КМ в различных областях техники: в строительстве, аэрокосмической технике, производстве трубопроводов, газотурбинных двигателей, авиа- и вертолетостроении. КМ широко применяются в строительстве железобетонных пролетов мостов, балок, оболочек, барж, скоростных автомобилей, корпусов экстремальных яхт и судов, спортивного инвентаря, медицинской техники, протезов и т. п. Хорошо известный железобетон позволяет сооружать

конструкции, выдерживающие большие изгибающие нагрузки, которые противопоказаны исходному бетону, — он растрескивается при достаточно небольших растягивающих напряжениях. Из современных композиционных материалов на основе стеклянных, углеродных и борных волокон и полимерного связующего изготавливаются корпуса летательных аппаратов, сопловые блоки ракет, носовые конусы, отсеки, балки, элементы конструкции крыла, фюзеляжа и хвостового оперения самолета, баллоны высокого давления, лопасти несущих винтов вертолета, диски и лопатки турбин, другие элементы газотурбинных двигателей. Создание новых *нанотехнологий*, *наноструктур* композиционных материалов, высоконадежных композиционных трубопроводов для транспортировки и распределения топлива объявлено одним из приоритетных в рамках направлений развития энергетики и энергоснабжения Российской Федерации. Четко выражена тенденция перехода от изготовления отдельных элементов сборных конструкций к производству неразъемных корпусов сложной формы. Существенно, что при этом применяется эффективный технологический процесс — непрерывная намотка, позволяющая получить значительный экономический эффект даже при относительно большой стоимости исходных материалов. Различные композиционные материалы успешно используются для усиления металлических панелей и профилей. Такие конструктивные элементы позволяют получать традиционными технологическими методами каркасированные конструкции, обладающие степенью весового совершенства.

Композиционные материалы могут быть как естественного, так и искусственного происхождения. К естественным КМ относят древесину, горные породы и минералы, к искусственным — различные виды полимеров и пластмасс (стеклопластики, асбопластики, углепластики, текстолиты, гетинакс, армированная резина и др.), материалы на основе древесины, металлические и металлополимерные композиции, сварные соединения.

История применения композиционных материалов насчитывает много веков. Уже на стадии развития циви-

лизации человек использовал для строительства кирпич из глины, в которую для повышения прочности замешивалась солома. Употребление природных битумов позволило повысить водостойкость природных материалов и изготавливать суда из камыша, пропитанного битумом. Современные технологии непрерывной обмотки корпусов ракет подобны технологии мумификации умерших с последующей обмоткой тела в виде кокона из полос ткани. Применяемые в настоящее время во многих отраслях металло-дерево-тканевые слоистые конструкции (например, *файберглас* из стеклянных волокон, скрепленных полимерным связующим) подобны материалу боевых луков у кочевников с использованием нескольких слоев из дерева, рога, шелка, скрепляемых с помощью клея.

Особое место среди прочих занимают углеродные композиционные материалы. Уникальная химическая стойкость углеродных полимеров, по которой они превосходят золото, платину, палладий, иридий, обусловила применение материалов на основе углерода в химической промышленности для изготовления реакторов, тиглей, теплообменников, насосов, трубопроводов. Температура, агрессия, радиация, герметичность, прочность и необходимое замедление нейтронов сопровождает работу конструкций атомных энергостанций, которые работоспособны в этих условиях благодаря углероду. Удельная прочность графита равна удельной прочности закаленной стали. Прочность повышается с ростом температуры (до 2700°C), а при 3600°C материал испаряется без плавления (сублимирует). Спекая без доступа воздуха коксовую крошку, смешанную с каменноугольным дегтем или нефтяным битумом и спрессованную в виде брикетов, исследователи многих стран изготавливают углеродную токопроводящую керамику. Графит используется в смазках и антифрикционных полимерных покрытиях. Состояние поверхности частичек этого вещества позволяет уменьшить трение. Поверхность графитовых лепестков сорбирует и сохраняет на себе молекулы газов, воды. Специальная обработка углеродных материалов может лишить их антифрикционных качеств, и они превращаются в высокоэффективные долговечные тормоза. Именно углеродные

материалы позволили создать космические корабли много-разового использования «Энергия» и «Буран». Материал используется в медицине для изготовления протезов, тонких клапанов, замены обожженной кожи.

Общим для всех композиционных материалов является сочетание в них разнородных компонентов, один из которых пластичен (*связующее, матрица*), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (*наполнитель, арматура*). Сама композиция при этом имеет свойства, которых не имеют отдельные составляющие, а разнообразие свойств композитов можно понять по признакам их классификации.

Современное определение композиционных материалов предполагает выполнение следующих условий [1]–[3]:

1. Композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами, один из которых пластичен (*связующее, матрица*), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (*наполнитель, арматура*).

2. Компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием.

3. Композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Существующие КМ по микроструктуре можно разделить на *дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами, армированные волокном и нанокомпозиты*. Все эти материалы представляют собой матрицу из какого-либо вещества или сплава, в которой распределена вторая фаза — обычно более жесткая, чем матрица, которая служит для улучшения того или иного свойства. В основе классификации четырех видов композиционных материалов лежат особенности их структуры.

В матрице *дисперсно-упрочненных КМ* равномерно распределены мельчайшие частицы размером от 0,01 до 0,1 мкм в количестве от 1 до 15 об. %. К этой группе композиций относятся материалы на основе металлических матриц, где в качестве дисперсных частиц выступают окислы (например, SiO_2 , Al_2O_3 в медной матрице), а также на основе некоторых силикатных матриц. Из-за близости

формы дисперсных частиц к сферической анизотропии свойств в материалах практически не возникает.

В *композициях, упрочненных частицами*, размер последних превышает 1 мкм, а содержание — 20–25 об. %. Наполнители здесь представляют собой неорганические порошковые композиции, входящие в состав разнообразных керамических и полимерных материалов (термопласти, реактопласти), наполненные разнообразными мелкодисперсными наполнителями (слюдой, графитом, тальком, мелом, медью и т. п. — в антифрикционных полимерных покрытиях). Основные преимущества керамических композиционных материалов связаны с высокими температурами и одновременно со значительной прочностью. Свойства упрочненных частицами материалов, как правило, изотропны; появление анизотропии может быть связано с вытянутой формой частиц некоторых дисперсных наполнителей; прочностные свойства существенно зависят от характера межфазного взаимодействия.

Наиболее обширную и разнообразную по своему составу группу составляют *КМ, армированные волокнами*, с помощью которых можно реализовать наиболее высокие прочностные и термические характеристики. Диаметр армирующих волокон колеблется от долей микрона до десятков микрон, а длина — от микрон до непрерывных волокон практически неограниченной длины при содержании от нескольких процентов до 90 об. %. Такие КМ образованы путем совмещения армирующих элементов (волокон, нитей, кристаллов, проволоки или ткани), определяющих основные механические характеристики, и связующего на металлической и неметаллической основе, обеспечивающего монолитность материала и совместную работу армирующих элементов.

Нанокомпозиты характеризуются включением второй фазы с размерами в несколько нанометров ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), содержание которой также достаточно невелико. Столь малых размеров частиц удается достигнуть в результате химического выделения из их соединений с другими элементами, в частности из металлоорганических производных. Введение этих частиц влияет на каталитическую

активность в химических реакциях, магнитные и электромагнитные свойства.

Существенное повышение некоторых характеристик, которое является важнейшим преимуществом композиционных материалов, на практике привело в настоящее время к относительно широкому применению лишь двух групп материалов на их основе: высокопрочных и жаростойких.

Существенное улучшение некоторых свойств на практике привело в настоящее время к относительно широкому применению лишь двух групп композиционных материалов: высокопрочных и жаростойких. Природа упрочняющего эффекта в композиционных материалах связана с использованием двух материалов с различной прочностью и жесткостью. Упрочняющий эффект следует связать с появлением в материале поверхности раздела фаз и пограничных слоев, примыкающих к ней. Более высокие характеристики материала пограничных слоев обеспечивают рост прочностных показателей материала, и именно по этой причине в дисперсно-упрочняющих композитах стремится к использованию тонкодисперсных жестких компонентов, распределенных в более пластичной матрице. В композициях, упрочненных частицами, их содержание достигает больших значений — 40–50% и более. В такой системе реализация наиболее высоких показателей достигается при наличии хорошего контакта (смачивания) на поверхности раздела и создания условия для образования адгезионных связей. Вместе с тем возможность химического взаимодействия на поверхности и в пограничном слое, особенно при эксплуатации, нежелательна, так как это может привести к утрате упрочняющего эффекта.

Для достижения максимального упрочняющего эффекта более прочный компонент должен играть роль упрочняющей структуры. Для этого необходимо, чтобы упрочняющие элементы имели достаточную длину, в этом случае прочность сцепления с матрицей достаточно велика, чтобы они могли выполнить свою основную роль арматуры. Поэтому наиболее выгодной формой использования армирующей фазы является тонкое и длинное волокно: известно, что с уменьшением толщины волокон их проч-

ность заметно возрастает (масштабный эффект). Наилучший прочностной эффект достигается при длине, в 20 раз превышающей диаметр.

По макроструктуре большинство композиционных материалов можно разделить на три основные группы: *изотропные, трансверсально-изотропные и ортотропные материалы*. К группе *изотропных* относятся материалы, для армирования которых используют наполнители в виде рубленых коротких волокон, соизмеримых с диаметром, сплошных и полых сфер и микросфер, порошков и др. мелкодисперсных компонентов. В таких материалах армирующий наполнитель хаотически перемешан со связующей матрицей. В качестве наполнителей используют синтетические, минеральные и металлические компоненты, а в качестве связующей матрицы — термореактивные и термопластичные полимеры (эпоксидные, полиэфирные, полиамидные, полистирольные, поливинилхлоридные, фенольные и другие смолы и их комбинации), а также металлы, обладающие высокими адгезионными свойствами по отношению к наполнителю. К группе *трансверсально-изотропных* относятся материалы, физико-механические свойства которых изотропны в плоскости листа и анизотропны по толщине. Армирование таких материалов производят укладкой изотропных (пленки стеклянные, полимерные, металлические, рубленые волокна и др.) или анизотропных слоев (шпон древесный, стеклянный, из металлических волокон и др.). Слои укладываются под углами 10–60° относительно друг друга. К группе *ортотропных* композиционных материалов относят материалы, которые имеют три взаимно перпендикулярные оси упругой симметрии. Такие материалы получают укладкой анизотропных элементарных слоев (шпон, ткань, нити, ленты, жгуты). Они обладают высокими удельными физико-механическими свойствами в заданных направлениях. Используются для изготовления корпусных конструкций, труб, оболочек, резервуаров, гребных винтов, профильных элементов методами горячего, контактного или вакуумного формования, намотки, протяжки. При изготовлении изделий получают однонаправлен-

ную, продольно-поперечную, косоперекрестную, тканую, ткано-прошивную и различные комбинированные структуры (*термопласт* и *реактопласт*). Если в матрицу вложены включения с различными свойствами q типов, то композит называется $(q+1)$ -компонентным. Если компоненты композита примыкают друг к другу параллельными слоями, то данный композит называется *слоистым*. Геометрические размеры армирующих элементов в одном из направлений таких материалов значительно (на несколько порядков) меньше, чем геометрические размеры в двух других взаимно-перпендикулярных направлениях. Каждая поверхность раздела такого композита, т. е. поверхность сопряжения двух компонентов, описывается в специально выбранной системе координат уравнением $Z=\text{const}$. Композит, включения которого представляют собой длинные цилиндры, называется *волокнистым композитом*. Геометрические размеры армирующих элементов в двух взаимно-перпендикулярных направлениях таких материалов значительно (на несколько порядков) меньше, чем геометрические размеры в третьем взаимно-перпендикулярном направлении. Если же эти цилиндры (волокна) параллельны между собой, то волокнистый композит называется *однонаправленным*. Если определяющие соотношения являются периодическими функциями координат, то композит называется *зернистым*, или *композитом с периодической структурой*. Большое влияние на свойства изделий оказывают дефекты, возникающие в процессе их изготовления.

Механику композиционных материалов разбили на несколько разделов, отличающихся по кругу рассматриваемых процессов, происходящих в материалах и приводящих к потере ими эксплуатационных свойств. Это два крупных раздела — *механика деформирования* и *механика разрушения*. В рамках каждого из этих разделов КМ разделяют по характеру связи между напряжениями и деформациями на *упругие*, *вязкоупругие* и *упругопластичные*, а по степени учета структуры и масштабному уровню рассматриваемых явлений различают *феноменологический*, *структурный* и *микроструктурный* подходы к решению проблем МКМ.

ЗАДАЧИ КУРСА МЕХАНИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наука о композиционных материалах зародилась на рубеже 60-х гг. прошлого столетия и разрабатывалась главным образом для решения проблемы улучшения механических характеристик (удельной прочности, антифрикционных показателей) и жаростойкости. Задачи механики композиционных материалов группируются вокруг трех основных проблем:

- задач механики, связанных с технологией создания армирующих волокон, процессов изготовления композиционных материалов и конструкций из них;
- собственно механики композиционных материалов;
- механики элементов конструкций и объектов, выполненных из композиционных материалов.

Исследование механики материалов предполагает их моделирование и использование соответствующих методов изучения свойств материала. Особенностью моделирования композита на любом уровне является учет его структуры, анизотропии, проявление не только *упругих* свойств, но и временной зависимости деформаций (*вязкоупругости*), модуля упругости (*упругопластичности*) и поврежденности (*нелинейность суммирования повреждений*), зависимость свойств материалов от технологии их изготовления. При разработке методов проектирования изделий из композиционных материалов различной структуры (слоистых, волокнистых, зернистых и т. д.) применяют упрощения, связывая структурный и феноменологический подходы путем создания различных теорий определения приведенных свойств и характеристик состояния. При рассмотрении вопросов обеспечения и оценки прочностных свойств уже созданных конструкций целесообразным является учет реальной микроструктуры материалов и кинетических закономерностей разрушения (кинетический подход).

Развитие науки о композиционных материалах и использование их в несущих силовых конструкциях ставит перед специалистами — прочностями, конструкторами, технологами, материаловедами — ряд задач.

Первой среди них следует отметить задачу функциональную — *разработку требований к новым материалам и создание материалов, отвечающих современным требованиям*. Ее решение возможно при совместных усилиях материаловедов и механиков. Поскольку изготавливаемые из композиционного материала детали и элементы конструкций воспринимают механические нагрузки, сам материал должен быть достаточно прочным, жестким, устойчивым. В настоящее время созданы углеродные, борные и полимерные волокна, обладающие высокой удельной прочностью и жесткостью и позволяющие получать материалы с удельной прочностью, на порядок большей, чем у стали. И есть основания ожидать дальнейшего улучшения этих характеристик. Однако полимерные связующие, в основном обеспечивающие получение монолитных материалов типа стеклопластиков, нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Кроме эксплуатационных свойств композиционные материалы должны обладать высокой технологичностью.

Разработка перспективных связующих сопряжена с рядом трудностей, так как часто они должны удовлетворять противоречивым требованиям — обладать, с одной стороны, достаточно большой жесткостью, обеспечивающей совместную работу волокон, а с другой — достаточною податливостью и теплостойкостью. Особенно большие трудности возникают при разработке связующих для высокомодульных материалов — разница в модулях упругости волокон и связующего, по-видимому, потребует специальных мероприятий, например, введения промежуточных прослоек между волокнами и связующими. В последнее время наметилась тенденция к замене полимерного связующего металлами. Она позволяет устраниить разрушение связующего в процессе деформирования композита и увеличить пластичность материала.

Большое значение имеют вопросы разрушения композиционных материалов. Имеющиеся в этом направлении исследования связаны в основном с разрушением системы волокон при разрыве одного или нескольких из них и с разрушением в результате межслоевого сдвига. Нам представ-

ляется, что разрушение армированных материалов носит сложный характер, разрушение волокон и связующего происходит не одновременно, оно, как правило, не описывается существующими критериями прочности и может быть объяснено в рамках микромеханического подхода.

Вторая основная проблема, связанная с применением композитов в силовых конструкциях, определяется характерными физическими свойствами армированных материалов — неоднородностью их механических свойств. Частный случай неоднородности — анизотропия (от греч. *ánisos* — неравный и *trópos* — направление) — неодинаковость физических (физико-химических) свойств среды (например, упругости, электропроводности, теплопроводности, показателя преломления, скорости звука и др.) по различным направлениям внутри этой среды (в противоположность изотропии). В совокупности с возможностями существующих технологических процессов, которые позволяют в широких пределах изменять структурные параметры материала, эта особенность обеспечит возможность управления его механическими свойствами и создаст лишнюю «степень свободы» при проектировании конструкций. Поэтому использование композиционных материалов вызывает необходимость в определении оптимальных схем армирования и распределения материала в конструкции, соответствующих условию ее нагружения. Критерием оптимальности, например, для авиационных и ракетных конструкций является минимум веса с ограничениями по прочности, жесткости и другим конструктивным и технологическим факторам. Оптимизация осуществляется итерационным методом: на каждом этапе процесса проводятся испытания или решается задача поверочного расчета и производится выбор параметров армирования, приводящих к снижению веса.

Весьма актуальными представляются также задачи оптимизации армирования оболочек с несимметричными вырезами и отверстиями при воздействии локальных нагрузок. Существенные трудности в их решении связаны с отсутствием осевой симметрии, статической неопределенностью задачи и рядом технологических ограничений,

связанных с возможностью укладки нитей по траектории, отличающейся от геодезической линии. Кроме того, тенденция к замене полимерного связующего металлом, очевидно, потребует существенной модификации критериев оптимальности и расчетных методов, связанной с учетом пластиичности связующего.

На пути внедрения композиционных материалов с максимальным использованием их положительных свойств имеются трудности, связанные с неопределенностью свойств материала при проектировании. До настоящего времени остаются недостаточно исследованными вопросы, касающиеся назначения коэффициентов безопасности авиационных конструкций из композиционных материалов, вопросы надежности, живучести авиационной техники и экономической эффективности новых материалов. При этом одной из основных конструкторских проблем, связанных с рассматриваемыми материалами, являются *проектирование и расчет соединений*. Неоднородность структуры композиционных материалов и анизотропия их физико-технических свойств существенно увеличивают число возможных форм разрушения соединений. Поэтому необходимы новые методы проектирования соединений конструкций из композиционных материалов, учитывающие локальную прочность в зоне крепежных элементов и позволяющие прогнозировать виды разрушений.

Проблема создания конструкций из армированных материалов неотделима от *вопросов технологии*. В настоящее время достаточно хорошо отработаны два основных технологических процесса изготовления силовых армированных конструкций: *метод формования* и *метод намотки*. Для расширения возможностей, которые открывает метод намотки, большое значение приобретает необходимость повышения коэффициента трения между укладываемой лентой и оправкой. Низкое значение коэффициента трения, не превышающее в настоящее время 0,5, не позволяет реализовать методом намотки ряд эффективных схем армирования конструкций типа корпуса летательного аппарата. Поэтому следует обратить особое внимание на разработку новых конструкционных материалов и составов

для их пропитки, а также на создание новых типов намоточных станков, способных при программном управлении создавать конструкции с заданными характеристиками. Предстоит совершенствовать и методы формования конструкций, армированных волокнами.

Третья основная проблема, на которой необходимо остановиться, связана с созданием *методов неразрушающего контроля и поверочного расчета*, позволяющих контролировать структурную неоднородность материала, выявлять особенности и дефекты структуры, учитывать низкую жесткость и прочность композитов при деформировании в направлениях, не совпадающих с направлениями армирования.

Основной особенностью материала, определяющей специфику рассматриваемых задач, является то, что он образуется одновременно с конструкцией. При этом в процессе изготовления изделия свойства материала, определяемые типом и схемой расположения армирующих волокон, могут изменяться в широких пределах. В связи с этим проектирование помимо традиционного выбора геометрических параметров конструкции включает одновременно конструирование самого материала, т. е. определение его структурных параметров, наилучшим образом соответствующих полю действующих нагрузок. Наличие дополнительной «степени свободы», связанной с регулированием свойств материала, открывает перед конструктором новые возможности для создания конструкций, обладающих максимальной сопротивляемостью в широком диапазоне статических и динамических воздействий.

В настоящее время в уточнение классических теорий изгиба балок, пластин и оболочек применительно к композиционным материалам получено довольно много результатов, учитывающих поперечный сдвиг на основе однородной модели композита как некоего анизотропного материала. Эти результаты, однако, недостаточно точны, поскольку базируются на чрезмерно упрощенных моделях композиционного материала, основанных на концепции «равномерного размазывания» дискретных армирующих элементов по всему объему связующего. Основная задача здесь состоит

в создании и систематическом освоении различных вариантов дискретно-континуальной модели композиционного материала, которая будет играть роль своеобразного моста, связывающего макро- и микромеханику композиционных материалов и конструкций из них. Наиболее существенные результаты получены при оптимальном армировании оболочек вращения, изготовленных из композиционного материала методом непрерывной намотки и применяющихся в качестве корпусов деталей летательных аппаратов, судов, трубопроводов, баллонов давления и баков. Проводятся исследования оптимальных конструктивных форм емкостей и баллонов давления из композиционных материалов и комбинированных конструкций с несущим металлическим герметизирующим слоем.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Большое значение имеет развитие методов исследования свойств композитов, разнообразие которых говорит о непрекращающемся поиске наиболее эффективных. Особенно это относится к области механики разрушения, в связи с чем в разделах 6–17 данного пособия рассматривается новый подход к определению нанохарактеристик прочности материалов и технических объектов, информативность которого обеспечивается использованием кинетических закономерностей и микромеханической модели процесса разрушения, представлениями о его многоэтапности и иерархичности, статистическом характере распределения свойств структурных элементов и высокой чувствительности метода акустической эмиссии. Это позволяет моделировать процесс разрушения на различных масштабных уровнях, формулировать и оперативно определять соответствующие этим уровням энергетические, структурные и временные характеристики прочности (время ожидания разрушения структурных элементов, энергию активации, активационный объем процесса разрушения молекулярных связей, параметры состояния структурных элементов и показатели их статистических

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru