

Оглавление

I. Введение	6
1.1. Общие сведения о неоднородных и композиционных материалах и их применении	6
1.2. Задачи курса механики композиционных материалов	13
II. Структура, эксплуатационные и технологические свойства неоднородных и композиционных материалов	20
2.1. Волокнистые армирующие материалы	20
2.2. Матрицы (связующие) для композиционных материалов	23
2.3. Процессы изготовления деталей и изделий из полимерных волокнистых композитов	24
III. Механика деформирования неоднородных материалов (МДТТ)	32
3.1. Основы механики деформированного твёрдого тела	32
3.2. Упругое тело	35
3.2.1. Уравнения теории упругости анизотропного тела	35
3.2.2. Расчёт оболочковых конструкций	40
3.3. Эффективные характеристики композитов. Вариационные принципы расчета	45
3.4. Вязкоупругость и длительная прочность	51
3.5. Упругопластическое тело	61
3.6. Экспериментальные исследования свойств композиционных материалов	62
3.6.1. Упругий материал	63
3.6.2. Вязкоупругий материал	66
3.6.3. Упругопластичный материал	74
IV. Механика разрушения неоднородных материалов	75
4.1. Классификация задач механики разрушения неоднородных материалов	75
4.2. Параметры трещиностойкости и критерии роста трещин материалов основных типов	76
4.2.1. Упругие материалы	76
4.2.2. Вязкоупругий материал	82
4.2.3. Упругопластичный материал	82
V. Микромеханика разрушения неоднородных материалов	85
5.1. Кинетическая концепция прочности и микромеханика разрушения твёрдых тел	87
5.2. Компьютерное моделирование процесса разрушения	96

5.3. Экспериментальное наблюдение за накоплением микротрещин. Метод акустической эмиссии	103
5.4. Анализ влияния прочностной неоднородности на информативность диагностических параметров акустической эмиссии	117
5.5. Микромеханическая модель разрушения неоднородных материалов	131
5.6. Прогнозирование времени разрушения образца на основе определения параметров микромеханической модели акустической эмиссии программными средствами	138
5.7. Критерии работоспособности деталей и конструкций из композиционных материалов и методы их оценки	146
VI. Экспериментальное определение параметров микромеханической модели разрушения неоднородных материалов	150
6.1. Упругий материал	150
6.2. Экспресс-оценка прочности и ресурса упругодеформированного материала.....	166
6.3. Вязкоупругий материал.....	174
6.4. Упругопластичный материал.....	188
VII. Технологические напряжения и прочность композитов в технологическом процессе	197
7.1. Общие понятия и причины появления технологических напряжений	197
7.2. Влияние технологических и эксплуатационных факторов работы неоднородных материалов на прочность и параметры микромеханической модели	202
7.3. Применение микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов (ММАЭГМ) для исследования свойств пористого железа.....	224
7.4. Нанотехнологии композиционных материалов.....	233
VIII. Типовые элементы конструкций из композиционных материалов	239
8.1. Стендовые испытания металлополимерных деталей машин и оптимизация технологии их изготовления	239
8.2. Экспериментальная оценка прочности оболочек	245
8.2.1. Обзор методов оценки прочности оболочек из композиционных материалов	245

8.2.2. Исследование акустических характеристик материала корпусного изделия.....	249
8.2.3. Исследование акустической эмиссии при гидроиспытаниях корпусов	253
8.2.4. Методика оценки прочности корпусных изделий при их контрольно-технологических гидроиспытаниях по результатам регистрации акустической эмиссии.....	259
Список литературы.....	269

I. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Общие сведения о неоднородных и композиционных материалах и их применении

Механика неоднородных материалов рассматривает поведение материалов и процессы, приводящие к потере ими эксплуатационных свойств. Под неоднородным материалом понимают материал с неоднородными физическими свойствами, гетерогенный материал (то есть 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)» [1, 2].

Все материалы в той или иной степени неоднородны. Дефекты материала и сложности конструкции приводят к неоднородности их структурного, напряжённо-деформированного и прочностного состояний, неопределённости поведения и необходимости повышения запаса прочности, что не всегда является возможным. Критериями рода и показателями неоднородности состояния конкретного объекта могут являться разбросы величин размеров или координат его структурных элементов, энергий деформирования или интенсивностей их разрушения, значений характеристик действующих или предельно допустимых напряжений, деформаций и т.п., и тогда имеется в виду неоднородность структурная, энергетическая, кинетическая, силовая, или деформационная. Прочностная неоднородность структурных элементов материала ограничивает объект от полного разрушения, локализуя его на стадии образования и роста трещины в момент достижения критической концентрации, является предпосылкой кинетической неоднородности трещинообразования, проявляющейся в снижении интенсивности разрушения, приводит к неопределённости функциональных свойств материалов, необходимости повышения запаса прочности или индивидуализации контроля неразрушающими методами. В случаях, когда неоднородность контролируется и активно используется для оптимизации свойств материалов, говорят о составлении их композиции, сводимой к направленному управлению структурой и составом материала, а материал называют **композиционным**.

Композиционные материалы (КМ) 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 другими свойствами. Это предопределило успехи практического использования КМ в различных областях техники: строительстве, аэрокосмической технике, производстве трубопроводов, газотурбинных двигателей, авиа- и вертолётостроении. КМ широко применяются в строительстве железобетонных пролётов мостов, балок, оболочек, барж, скоростных автомобилей, корпусов экстремальных яхт и гоночных 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, лопадки, диски и лопадки турбин, другие элементы газотурбинных двигателей. Создание новых *нанотехнологий, наноструктур* композиционных материалов, высоконадёжных композиционных трубопроводов для транспортировки и распределения топлива объявлено Правительством РФ одним из приоритетных направлений в рамках развития энергетики и энергоснабжения РФ на 2007-2012 гг. 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, асбобластики, углепластики, текстолиты, гетинакс, армированную резину и др.), материалы на основе древесины, металлические и металлополимерные композиции.

История использования человеком композиционных материалов насчитывает много веков. Уже на стадии развития цивилизации человек использовал для строительства кирпич из глины, в которую для повышения прочности замешивалась солома. Использование 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. Используемые в настоящее время во многих отраслях металло-дерево-тканевые слоистые конструкции (например, *фиберглас* из стеклянных волокон, скреплённых полимерным связующим) подобны материалу боевых луков у кочевников с использованием нескольких слоёв из дерева, рога, шёлка, скрепляемых с помощью клея [1].

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 сопровождают работу конструкций атомных энергостанций, которые работоспособны в этих условиях благодаря углероду. Удельная прочность графита равна удельной прочности закалённой 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 дёгтем или нефтяным битумом и спрессованную в виде брикетов, исследователи многих стран изготавливают углеродную токопроводящую керамику. Графит используется в смазках и антифрикционных полимерных покрытиях для уменьшения трения, что

позволяет состояние поверхности частичек этого вещества. 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 многоразового 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 жёсткостью (*наполнитель, арматура*). Сама композиция при этом имеет свойства, которых не имеют отдельные составляющие, а разнообразие свойств композитов можно оценить по признакам их классификации.

Современное определение композиционных материалов предполагает выполнение следующих условий.

1. Композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с чёткой границей раздела между фазами, один из которых пластичен (связующее, матрица), а другой обладает высокой прочностью и жёсткостью (наполнитель, арматура).
2. Компоненты композиции образуют её своим объёмным сочетанием.
3. Композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из её компонентов в отдельности.

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

В матрице *дисперсно-упрочнённых 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, упрочнённых 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 (термопласты, реактопласты), 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 значительной прочностью. Свойства упрочнённых 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.

Нанокмпозиты 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 удаётся достигнуть в результате химического выделения их из соединений с другими элементами, в частности из металлоорганических производных. Введение этих частиц влияет на каталитическую активность в химических реакциях, магнитные и электромагнитные свойства.

В настоящее время существенное улучшение некоторых характеристик, которое является важнейшим преимуществом композиционных материалов, на практике привело к относительно широкому применению лишь двух групп материалов на их основе: высокопрочных и жаростойких. Природа упрочняющего эффекта в композиционных материалах связана с использованием двух материалов с различной прочностью и жёсткостью. Упрочняющий эффект следует связать с появлением в материале поверхности раздела фаз и пограничных слоёв, примыкающих к ней. Именно более высокие характеристики материала пограничных слоёв обеспечивают рост прочностных показателей материала, и именно по этой причине в дисперсно-упрочняющих композитах стремятся к использованию тонкодисперсных жёстких компонентов, распределённых в более пластичной матрице. В композициях, упрочнённых частицами, их содержание достигает больших значений – 40-50% и более. В такой системе реализация наиболее высоких показателей достигается при условии 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 в условиях 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 прочность 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 других мелкодисперсных компонентов. В таких материалах армирующий на-

полнитель хаотически перемешан со связующей матрицей. В качестве наполнителей используют синтетические, минеральные и металлические компоненты, а в качестве связующей матрицы – термоактивные и термопластичные полимеры (эпоксидные, полиэфирные, полиамидные, полистирольные, поливинилхлоридные, фенольные и другие смолы и их комбинации), а также металлы, обладающие высокими адгезионными свойствами 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 (плёнки стеклянные, полимерные, металлические, рубленые волокна и др.) или анизотропных слоёв (шпон древесный, стеклянный, из металлических волокон и др.). Слои укладываются под углами $10-60^\circ$ друг относительно друга. К группе **орто-тропных** композиционных материалов относятся материалы, которые имеют три взаимно перпендикулярные оси упругой симметрии. Такие материалы получают укладкой анизотропных элементарных слоёв (шпон, ткань, нити, ленты, жгуты). 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 однонаправленную, продольно-поперечную, косопоперекрёстную, 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 такой 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, то есть поверхность сопряжения двух компонентов, описывается в специально выбранной системе координат уравнением $Z=const$. Композит, включения которого представляют собой длинные цилиндры, называется **волокну-стым композитом**. Геометрические размеры армирующих элементов в двух взаимно перпендикулярных направлениях таких материа-

лов 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 учёта структуры и масштабному уровню рассматриваемых явлений различают *феноменологический, структурный и микроструктурный* подходы к решению проблем МКМ.

1.2. Задачи курса механики композиционных материалов

Наука о композиционных материалах зародилась на рубеже 60-х годов прошлого столетия и разрабатывалась главным образом для решения проблемы улучшения механических характеристик (удельной прочности, антифрикционных показателей) и жаростойкости. Задачи механики композиционных материалов группируются вокруг трёх 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 учёт его структуры, анизотропии, проявление не только *упругих* свойств, но и временной зависимости деформаций

(вязкоупругости), модуля упругости (упругопластичности) и повреждённости (*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 путём создания различных теорий определения приведённых свойств и характеристик состояния. При рассмотрении вопросов обеспечения и оценки прочностных свойств уже созданных конструкций целесообразным является учёт реальной микроструктуры материалов и кинетических закономерностей разрушения (кинетический подход).

Развитие науки о композиционных материалах и использование их в несущих силовых конструкциях ставит перед специалистами-«прочнистами», конструкторами, технологами, материаловедом ряд задач.

Первой среди таких задач [3] следует отметить разработку требований к новым материалам и создание материалов, отвечающих современным требованиям. Решение этой задачи возможно при совместных усилиях материаловедов и механиков. Поскольку изготавливаемые из композиционного материала детали и элементы конструкций воспринимают механические нагрузки, то 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 – достаточной податливостью и теплостойкостью. Особенно большие трудности возникают при разработке связующих для высокомодуль-

ных 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 устранить 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 представляется, 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 неоднородных и композиционных материалов в силовых конструкциях, определяется характерной чертой – анизотропией их механических свойств. **Анизотропíя** (от греч. *ánisos* – неравный и *trópos* – направление) – неодинаковость физических (физико-химических) свойств среды (например, прочности, 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 условиям её 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 произ-

водится выбор параметров армирования, приводящий 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 неопределимостью 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 пластичности связующего.

На пути внедрения композиционных материалов с максимальным использованием их положительных свойств имеются трудности. Первая из них, как нам представляется, связана с проектированием. Перенесение на композиционные материалы опыта проектирования металлических конструкций, стандартных методов испытаний, нормированных для металлов запасов прочности и коэффициентов безопасности не позволяет получить ожидаемого эффекта. При этом одними из основных конструкторских проблем, связанных с рассматриваемыми материалами, являются **проектирование и расчет соединений**. Эффективность использования композиционных материалов в летательных аппаратах в значительной степени определяется тем, насколько удачно выбрана конструктивная схема соединения и насколько полно учтены при этом особенности материала. 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.

Сложность и важность проблемы проектирования соединений определяются особенностями механических свойств композиционных материалов, и в первую очередь их низкой прочностью при срезе и отсутствием пластичности, вызывающей, как известно, благоприятное перераспределение напряжений в зонах соединения металлических конструкций. До настоящего времени остаются недоста-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru