

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет

Ю. С. ПЕРВУШИН, В. С. ЖЕРНАКОВ

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Уфа 2008

УДК 620.22 (07)

ББК 30.3 (я7)

П29

*Рецензенты: проф. кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета, д-р техн. наук, проф. Чернявский О.Ф.;*  
*главный консультант ГУП «НПП«Мотор», д-р техн. наук, проф. Рыжов А.А.*

**Первушин, Ю. С., Жернаков, В. С.**

П29 Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов: учеб. пособие / Ю. С. Первушин, В. С. Жернаков; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа. 2008. –303с.

ISBN 5-86911-626-0

Рассмотрены особенности проектирования и технологии изготовления изделий из композиционных материалов (КМ) на основе полимерных, металлических и керамических матриц, армированных непрерывными волокнами. Излагаются теоретические основы построения сбалансированных композитных материалов. Значительное внимание уделено вопросам армирования, послойному анализу напряженного состояния, прогнозированию механических свойств слоистых композиционных материалов. Рассматриваются примеры построения сбалансированных структур КМ, расчеты на прочность и жесткость балочных элементов из КМ, методы соединения композиционных материалов.

Предназначено для подготовки дипломированных специалистов по направлению 150 500 – Материаловедение, технология материалов и покрытий: специальности 150 502 – Конструирование и производство изделий из композиционных материалов.

Табл. 24 . Ил. 131. Библиогр.: 57 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. Первушин Ю.С.

УДК 620.22 (07)

ББК 30.3 (я7)

**ISBN 5-86911-626-0**

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	6
1. Классификация композиционных материалов .....	10
2. Компоненты композиционных материалов .....	12
2.1. Матричные (связующие) компоненты композиционных материалов .....	12
2.2. Армирующие материалы .....	17
3. Основы микромеханики двухкомпонентных систем .....	42
3.1. Определение упругих характеристик однонаправленного слоя .....	42
3.2. Прочность однонаправленного слоя .....	54
4. Микромеханика гибридных композитов .....	88
4.1. Упругие характеристики гибридного композита .....	88
4.2. Прогнозирование упругих свойств гибридных композитов (ГКМ) .....	90
4.3. Прогнозирование прочности однонаправленного гибридного композита в направлении армирования .....	92
5. Напряженно-деформированное состояние слоистых композиционных материалов .....	100
5.1. Соотношение между напряжениями и деформациями (обобщенный закон Гука) .....	100
5.2. Зависимость между напряжениями и деформациями для ортотропного тела при несовпадении осей нагружения с осями упругой симметрии .....	105
5.3. Деформирование ортотропного слоя при неоднородном напряженном состоянии .....	112
5.4. Закон деформирования многослойного композиционного материала .....	116
5.5. Определение упругих характеристик слоистых пластиков .....	124
5.6. Определение напряжений в слоях армированного слоистого материала при плоском напряженном состоянии .....	134

6. Поперечный изгиб балок из композиционных волокнистых материалов .....	142
6.1. Техническая теория изгиба .....	142
6.2. Особенности изгиба балок из композиционных материалов.....	153
6.3. Определение прогибов композиционных балок при поперечном изгибе .....	159
7. Основные виды соединений из композиционных материалов .....	176
7.1. Общая характеристика соединений композитных элементов .....	176
7.2. Механические соединения .....	177
7.3. Адгезионное (клеевое) соединение композитов .....	188
8. Основные этапы технологических процессов изготовления изделий из композиционных материалов .....	201
8.1. Общие требования к матрицам конструкционных полимерных материалов .....	201
8.2. Подготовка исходных компонентов КМ .....	210
8.3. Жидкофазное совмещение связующих с наполнителем (пропитка) .....	221
8.4. Полуфабрикаты ПКМ, получаемые твердофазным совмещением компонентов .....	233
8.5. Методы формования изделий из волокнистых КМ .....	245
8.6. Изготовление изделий из углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ) .....	267
8.7. Технология получения композиционных материалов с металлической матрицей .....	269
Список литературы .....	299

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное состояние и дальнейшее совершенствование летательных аппаратов определяется и будет определяться развитием нового класса материалов, называемых композиционными (КМ). В переводе термин «композиционный» или «композитный» означает сложный. Так называют материалы, которые состоят из нескольких компонентов, различных по своей природе. Каждая составляющая композиционного материала обладает своими физико-механическими свойствами и имеет свое назначение, а композиционный материал приобретает как свойства входящих компонентов, так и новые свойства, которыми компоненты не обладают. Столь большой интерес к этим материалам вызван их высокими и управляемыми конструктивными свойствами: прочностью, жесткостью, усталостной прочностью, низкой плотностью и др. Эти свойства позволяют существенно повысить несущую способность и весовую эффективность, снизить материалоемкость и эксплуатационные расходы.

Изобретатель композитов – природа. Природа создает весь животный и растительный мир только на основе композиционных структур. Так, дерево, стебель любого растения являются яркими представителями композитной структуры, в которой высокопрочные волокна целлюлозы связаны биологическим связующим – лигнином. Тем не менее, наука о композитах появилась в связи с их применением в летательных аппаратах. Еще в восьмидесятые годы в конструкции самолета гиганта «Руслан» были заложены элементы конструкции и сборочные единицы из композитов общей массой  $5,5 \cdot 10^3$  кг, что позволило снизить массу конструкции на  $1,5 \cdot 10^3$  кг и сэкономить в течение периода эксплуатации не менее  $18 \cdot 10^3$  кг горючего. В современных аэробусах доля композитов достигает 50 %. В силовых конструкциях современных вертолетов на долю композитов приходится до 60 – 70 % от общей массы, что позволяет снизить массу конструкции на 25 – 30 %, увеличить ресурс эксплуатации в 2 и более раз, снизить трудоемкость изготовления в 1,5 – 2 раза. В современных корпусах твердотопливных ракетных двигателей доля КМ составляет 85 – 90 %. Масштабное применение композитов имеет место в автомобилестроении, машиностроении, энергетике, химической и нефтяной промышленности, строительстве и др. Будущее принадлежит композитам.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение композиционных материалов (КМ) в летательных аппаратах подняло на качественно новый уровень самолето- и вертолетостроение, ракетную и космическую технику. Убедительным примером является существенное отличие в структуре материалов гражданских самолетов-аэробусов, выпущенных в 2000 году и которые будут выпущены в 2007 – 2008 годах. В 2000 году в конструкциях аэробусов алюминий и алюминиевые сплавы составляли 70 %, композиты – 11 %, титановые сплавы – 7 %, сталь – 11 %. В аэробусах 2007 – 2008 года алюминий и алюминиевые сплавы составляют всего 20 – 30 %, композиты 30 – 50 %, титановые сплавы 15 %, сталь 9 – 10 %.

Наглядно это видно на диаграмме, изображенной на рис. В.1, показывающей структуру материалов аэробусов XXI века (кроме двигателя).

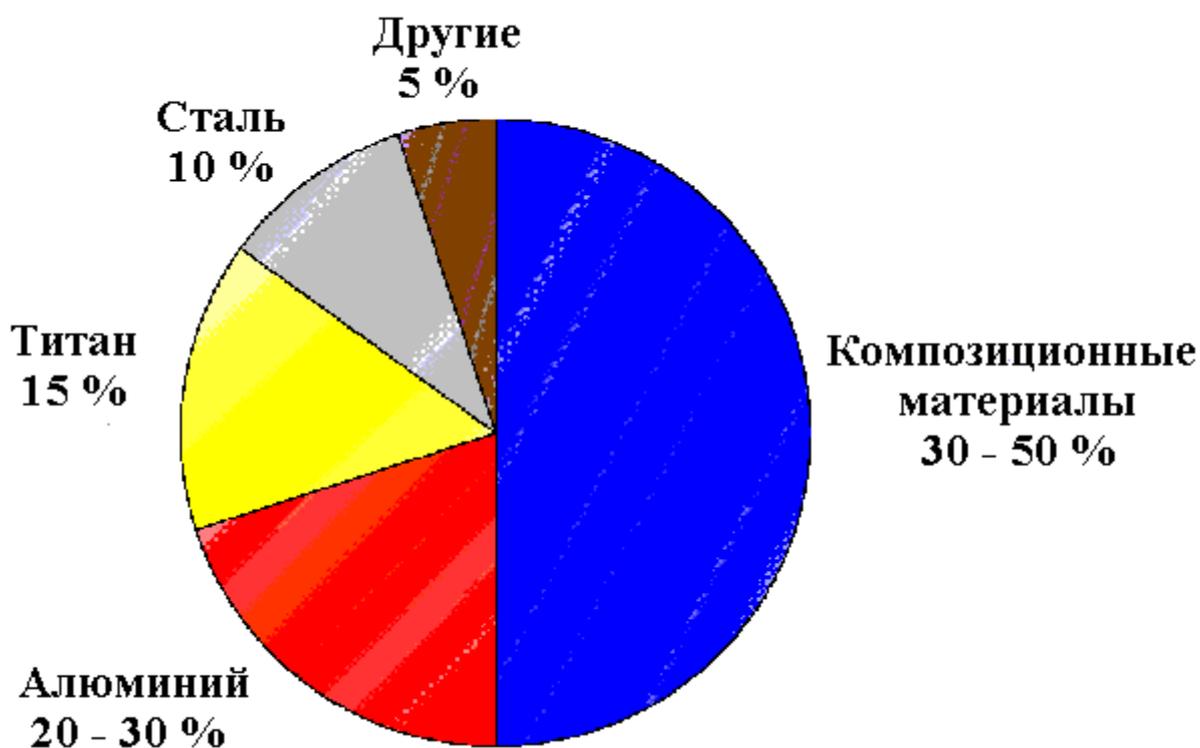
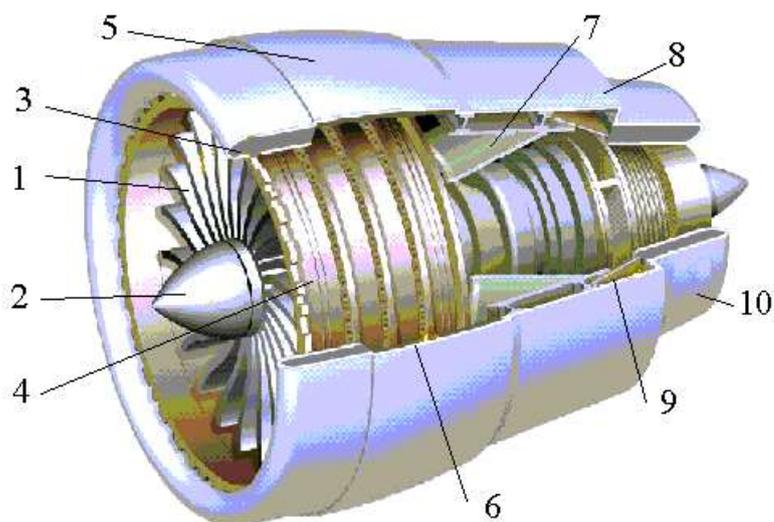


Рис. В.1. Структура материалов аэробусов XXI века

На рис. В.2 представлены элементы авиационного двигателя из композиционных материалов.



*Рис. В.2.* Элементы авиационных двигателей из КМ:  
 1 – лопасть вентилятора, 2 – носовой конус, 3 – входной конус,  
 4 – герметичная оболочка (обтекатель), 5 – обшивка, 6 – обшивка  
 вентилятора в сборке, 7 – внутренняя стенка (перегородка) в сборке,  
 8 – обтекатель двигателя, 8 – корпус реверсивного устройства,  
 9 – задняя оболочка в сборке, 10 – внешняя оболочка реактивного сопла

В вертолетостроении масштабы применения композитов достигли 70 ÷ 80 %. Такой масштаб применения говорит о том, что композиты в авиастроении – это, действительно, материалы XXI века.

Но для того чтобы овладеть искусством конструирования изделий из таких новых материалов, какими являются композиты, необходимо овладеть знаниями, которые позволили бы наиболее эффективно использовать их в различных отраслях производства.

В большинстве авиационных технических вузов, где отсутствует подготовка специалистов по конструированию и изготовлению изделий из КМ, назрела необходимость в изучении дисциплины по основам механики, проектированию и изготовлению изделий из КМ, которая бы вооружала выпускников технических вузов необходимыми знаниями для конструирования и изготовления изделий из композитов.

Учебники, учебные пособия, которые бы концентрированно содержали эти сведения, практически отсутствуют.

Данное учебное пособие в определенной мере восполняет этот пробел. Содержание его базируется на материалах отечественных и зарубежных источников и курсе лекций, читаемых в Уфимском государственном авиационном техническом университете в течение многих лет.

Круг рассмотренных в учебном пособии вопросов определялся с целью научить будущего специалиста основам механики слоистых композиционных материалов, механическое поведение которых во многом принципиально отличается от традиционных металлов, основам проектирования структур слоистых композитов, включающим прогнозируемое поведение элементов конструкций в процессе эксплуатации, конкретным методам расчета стержневых систем из КМ на прочность и жесткость, методам расчета соединений элементов из КМ, основам технологических процессов изготовления изделий из КМ.

Специфика применения композиционных материалов состоит в том, что их структура (объемное содержание, тип волокон и связующего, число слоев и их ориентация) проектируется для каждого конкретного изделия. Принципиальное отличие изготовления изделий из КМ от изделий из традиционных металлов заключается в том, что формирование материала и конструкции происходит одновременно, поэтому будущий специалист по проектированию элементов конструкций из КМ должен соединять в себе знания конструктора, материаловеда и технолога одновременно. В этом состоит и особенность содержания данного пособия.

В предисловии и введении показана роль композиционных материалов в авиационной, ракетной и космической технике.

В первом разделе представлена классификация композиционных материалов по матричным и армирующим компонентам и функциональным признакам.

Второй раздел посвящен свойствам матричных и армирующих материалов. Рассмотрены структуры армирующих каркасов и их особенности.

Третий раздел посвящен основам микромеханики двухкомпонентных систем, в котором на основе инженерного метода «смесей» прогнозируются упругие и прочностные характеристики однонаправленного слоя. Рассматривается прочность однонаправленного слоя при плоском напряженном состоянии.

В четвертом разделе рассматривается микромеханика гибридного композита с прогнозированием его упругих и прочностных характеристик.

В пятом разделе приведены основные уравнения обобщенного закона Гука для анизотропного материала и рассмотрены частные

случаи анизотропии, позволяющие спроектировать слоистую структуру с заданным деформационным поведением.

Шестой раздел посвящен расчету композиционных балок на жесткость при поперечном изгибе. В основу расчета положена гипотеза плоских сечений. Подробно изложено отличие расчетов на жесткость балок из композиционных анизотропных материалов от балок из изотропных материалов.

В седьмом разделе рассмотрены основные виды соединений композиционных элементов. Основное внимание уделено механическим и клеевым соединениям, их преимуществам и недостаткам.

В восьмом разделе приведены основные технологические процессы изготовления типовых элементов конструкций.

Учебное пособие предназначено для студентов высших технических учебных заведений, в которых отсутствует подготовка специалистов по конструированию и изготовлению изделий из КМ. Оно может быть полезным аспирантам и специалистам, занимающимся разработкой и производством изделий из современных композиционных материалов.

Авторы выражают благодарность А. Р. Билаловой за большую работу при подготовке рукописи к изданию.

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Основные понятия и классификация композиционных материалов

Композиционными материалами (КМ) называют материалы, состоящие из двух и более нерастворимых друг в друге компонентов с четко обозначенной границей раздела и прочным взаимодействием по всей площади контакта [13, 20, 33, 35]. Один из компонентов КМ является непрерывной фазой и называется матрицей, в которой размещены нерастворимые в ней материалы другой природы, *называемые армирующими или наполнителями* [29, 32].

Композиционные материалы обладают комплексом свойств, которыми обладают компоненты, и свойствами, которыми отдельные компоненты не обладают.

Для обеспечения прочного взаимодействия между компонентами КМ матрица должна обеспечить хорошую смачиваемость всей поверхности распределенного в ней наполнителя, не вызывая химических реакций в них, должна обеспечить формуемость состава в монолитное изделие без нарушения формы и размера частиц наполнителя и их взаимного расположения в течение всего периода эксплуатации изделия.

Распределение наполнителя в матрице может быть хаотичным или подчиненным определенной схеме. В первом случае материал будет изотропным, во втором – анизотропным. К изотропным относят КМ, содержащие в качестве наполнителя частицы сферической формы, чешуйки, рубленные волокна, равномерно распределенные в полимерной или металлической матрице. Заданную схему взаимного распределения арматуры в анизотропном материале легче достигнуть с помощью непрерывных волокон. По определенной схеме можно подготовить волокна в виде лент, тканей заданного плетения, трикотажа.

Рассмотрим классификацию композиционных материалов по различным признакам:

- по типу матрицы композиционные материалы подразделяются на отверждающие (реактопласты), термопластичные композиционные материалы (ТКМ), композиционные материалы на металлической матрице, КМ на керамической матрице;

- по природе наполнителей композиционные материалы подразделяются на минеральнонаполненные (стекло, базальт), углеродонаполненные (углеродные волокна), органонаполненные (органические волокна), металлонаполненные, КМ на основе керамических наполнителей;

- по форме частиц наполнителя различают композиционные материалы с дисперсными наполнителями (порошки, микросферы, чешуйки), композиционные материалы, наполненные короткими волокнами (3÷12 мм), и КМ с непрерывными волокнами;

- по распределению наполнителей в матрице различают изотропные и анизотропные композиционные материалы. К первым относятся КМ с дисперсными наполнителями и наполненные короткими волокнами. Ко вторым – КМ с непрерывными волокнами.

Отдельную классификационную группу образуют гибридные КМ, армированные волокнами различной природы (стеклянные, органические, углеродные и т.д.).

## **2. КОМПОНЕНТЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **2.1. Матричные (связующие) компоненты композиционных материалов**

**2.1.1. Требования к матрицам.** Армирующие компоненты композиционных материалов в виде волокон, нитей, тканей и др. сами по себе не являются конструктивными материалами. Для того чтобы получить армированный пластик, необходимо соединить волокна друг с другом, обеспечить передачу усилий между ними, зафиксировать форму изделий и взаимное расположение армирующей компоненты, т. е. создать монолитную структуру композита. Для этого используются различные связующие. В качестве связующих применяются полимерные, металлические и керамические материалы.

Физико-механические и технологические свойства связующих должны позволять получать конструкции прочные, легкие, малоэнергоемкие, технологичные. При выборе связующего, помимо удовлетворения требованиям к прочностным, технологическим, адгезионным свойствам, необходимо обратить внимание на следующее: относительное удлинение матрицы при растяжении, сжатии, сдвиге должно быть не меньше относительного удлинения волокон. Иначе

при действии внешней нагрузки разрушение в первую очередь начнется в связующем, высокая прочность армирующей компоненты не будет использована полностью, что существенно снизит несущую способность конструкции. Нужно стремиться к тому, чтобы коэффициенты теплового расширения связующего и волокна были близкими. Как правило, коэффициенты теплового расширения смол значительно больше, чем волокон, что приводит к большим внутренним напряжениям, снижающим несущую способность конструкции. Связующее должно обладать малой вязкостью и хорошей адгезионной способностью к армирующему материалу. Малая вязкость необходима для того, чтобы связующее могло проникнуть и склеить между собой волокна и после отверждения получить монолитную структуру. Выбранный тип связующего должен обеспечить легкость и простоту технологического формования и заполнения формы при возможно более низких температурах и давлениях. После полимеризации (отвердевания) оно должно иметь монолитную структуру и обеспечить передачу внешних усилий к волокнам. Связующее должно обладать высокой адгезионной прочностью к волокнам. Для повышения адгезионной прочности волокна покрывают очень тонким слоем специальных веществ, называемых аппретами. Аппреты не только обеспечивают высокую адгезионную прочность между связующим и волокнами, но и снижают внутренние напряжения на границе волокно-матрица, возникшие из-за разности коэффициентов линейного расширения. От связующего в значительной степени зависят такие свойства композиционных материалов, как теплостойкость, влагостойкость, длительная прочность, стойкость под действием агрессивных сред. Теплостойкость должна быть не меньше температуры эксплуатации изделий из КМ.

После формования изделия из композиционных материалов отвержденное связующее называется матрицей. Часто эти понятия являются синонимами.

Пропитанный связующим армирующий каркас при формировании обычно подвергается действию значительного давления. Важно, чтобы пузырьки воздуха или технологического газа – носителя связующего – не задерживались в композите. Поскольку для достижения высоких механических характеристик объемное соотношение армирующего материала и полимерной матрицы в текстильных композитах должно составлять около 70/30, важно иметь способ удаления из-

бытка связующего, введенного при пропитке. После получения требуемой степени пропитки полимерное связующее отверждается. Отверждение происходит при нормальной или повышенной температуре в одну или несколько стадий в зависимости от вида армирующего материала, типа связующего, способа изготовления композита, необходимой скорости отверждения, степени отверждения и требований к свойствам конечного продукта. Отверждение при высокой температуре увеличивает термостойкость матрицы и композита, однако при этом возрастает их хрупкость.

**2.1.2. Терморезактивные матрицы.** Основным видом смол для изготовления композитов, от которых не требуется высокой термостойкости, являются полиэфирные смолы, которые относительно дешевы, обладают хорошей текучестью, хорошо смачивают поверхность волокон (благодаря низкой вязкости) и отверждаются при умеренных температурах. Однако при повышенных температурах они имеют низкую прочность, плохо сопротивляются удару и проявляют значительную усадку. Тем не менее они с успехом применяются для изготовления композитов самого разного назначения, что позволило накопить значительный опыт в этой области технологии композитов.

Для высокотемпературных областей применения основным связующим для волокнистых композитов являются эпоксидные смолы [39]. Они обладают высокой прочностью и отверждаются при сравнительно невысоких температурах. Эти системы характеризуются меньшей усадкой и меньшей склонностью к ползучести, чем полиэфирные. К отрицательным свойствам эпоксидных смол относятся высокая стоимость и токсичность, повышенная хрупкость, а также пониженная прочность при высоких температурах. В целом, по существу им комплексу свойств, эпоксидные смолы являются наилучшими из доступных полимерных систем для изготовления композитов, работающих при повышенных температурах. Ударные воздействия или высокие напряжения при повышенных температурах эксплуатации требуют от композита повышенной ударной прочности. В этом случае необходимо применять рецептуры эпоксидных смол, обладающих большей эластичностью. Такие рецептуры существуют, однако их применение связано с необходимостью выбора между улучшенной ударной вязкостью и сниженными прочностью, жесткостью и термостойкостью.

*Термостойкие матрицы.* Термостойкие матрицы представляют

собой полимеры, молекулярные цепи которых состоят из гетероароматических звеньев, имеющих высокую температуру стеклования, способные выдержать на воздухе продолжительный нагрев свыше 300 °С без заметных изменений структуры. Наибольшее применение получили полиимиды полимеризационного типа, состоящие из олигомеров и смесей имидообразующих мономеров.

Полиимидные связующие наносятся на волокна различными методами. Полученные полуфабрикаты имеют длительную жизнеспособность. Отверждение полиимидных связующих протекает при температурах 300 ... 350 °С без выделения летучих продуктов.

Композиты с полиимидными матрицами характеризуются высокой термостойкостью, прочностью, стойкостью к действию различных агрессивных сред, стабильностью размеров в широком температурном интервале.

Основными недостатками полиимидных связующих являются технологические трудности изготовления изделий на их основе.

**2.1.3. Термопластичные матрицы.** В настоящее время получает развитие производство термопластичных композиционных материалов (ТКМ) на основе твердофазного совмещения непрерывных армирующих и термопластичных волокон по так называемым “волоконной” и “пленочной” технологиям [4, 5, 14]. Суть “волоконной” технологии заключается в максимальном приближении термопластичного связующего в виде волокон к волокнам армирующего материала. Создается тканый полуфабрикат (ткани, лента, трикотаж и др.), состоящий из армирующих волокон и волокон термопластичного связующего с взаимно максимальным их приближением друг к другу.

Возможность чередовать непрерывные матричные и армирующие волокна с заданной регулярностью с надежной фиксацией схемы армирования структуры на всех стадиях переработки полуфабрикатов создала предпосылки создания целой гаммы перспективных КМ. Необходимо подчеркнуть, что “волоконная” технология отличается экологической чистотой и неограниченным сроком хранения полуфабрикатов по сравнению с жидкофазным совмещением традиционных технологий получения полуфабрикатов КМ.

Физико-механические характеристики некоторых терморреактивных матриц приведены в табл. 2.1.

**2.1.4. Металлические матрицы.** К ним относятся легкие металлы и сплавы. Наибольшее использование в качестве матриц получили алюминий, магний и их сплавы, что объясняется благоприятным сочетанием физико-механических и технологических свойств при создании термостойких композиционных материалов [2, 3, 21, 27, 46].

Наибольшее применение металлические матрицы получили в изделиях из КМ в авиационной технике.

Композиционные материалы – углеалюминий, углеалюминий-магний в настоящее время находят применение в производстве поршней для двигателей внутреннего сгорания.

Таблица 2.1

Физико-механические свойства терморреактивных матриц

Характеристика	Матрица		
	эпоксидная	полиэфирная	фенолдегид
Плотность, $\rho \cdot 10^3$ , кг /м <sup>3</sup>	1,1 ... 1,4	1,1 ... 1,5	1,2 ... 1,4
Модуль упругости при растяжении, ГПа	1,9 ... 5,0	1,5 ... 4,5	1,4 ... 2,0
Модуль сдвига $G$ , ГПа	0,8 ... 1,5	1,0 ... 1,9	1,0 ... 1,5
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0,34 ... 0,4	0,35 ... 0,42	0,3 ... 0,4
Предел прочности, МПа:			
- при растяжении	27,4 ... 140	23 ... 70	23 ... 70
- при сжатии	85 ... 274	50 ... 250	68,5 ... 250
- при сдвиге	42 ... 53	38 ... 48	38 ... 48
Предельное удлинение, %	1,2 ... 9	1,0 ... 6,0	0,4 ... 1,0
Объемная усадка, %	0,5 ... 3,6	4 ... 15	0,5 ... 1,0
Теплостойкость по Мартенсу, °С	140 ... 150	50 ... 60	140 ... 150
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-5}$ , 1/ °С	4,8 ... 8,0	6,0 ... 9,0	6,0 ... 8,0

Водопоглощение за 24 ч, %	0,03 ... 0,3	0,15 ... 0,6	0,15
---------------------------	--------------	--------------	------

**2.1.5. Керамические матрицы.** Керамические матрицы используются для создания КМ, работающих в условиях высоких температур ( $T > 1000$  °С, лопатки газовых турбин, камеры сгорания и др.). В поле зрения практического использования наибольший интерес представляют нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , кремний Si, нитрид бора BN, карбид кремния SiC. Эти керамические материалы обладают наилучшей комбинацией высокотемпературной прочности и стойкостью к горячей коррозии. Однако из-за хрупкого характера разрушения и неспособности к рассеянию концентрированных напряжений при низких и средних температурах керамические матрицы чувствительны к тепловому удару и надрезу.

## 2.2. Армирующие материалы

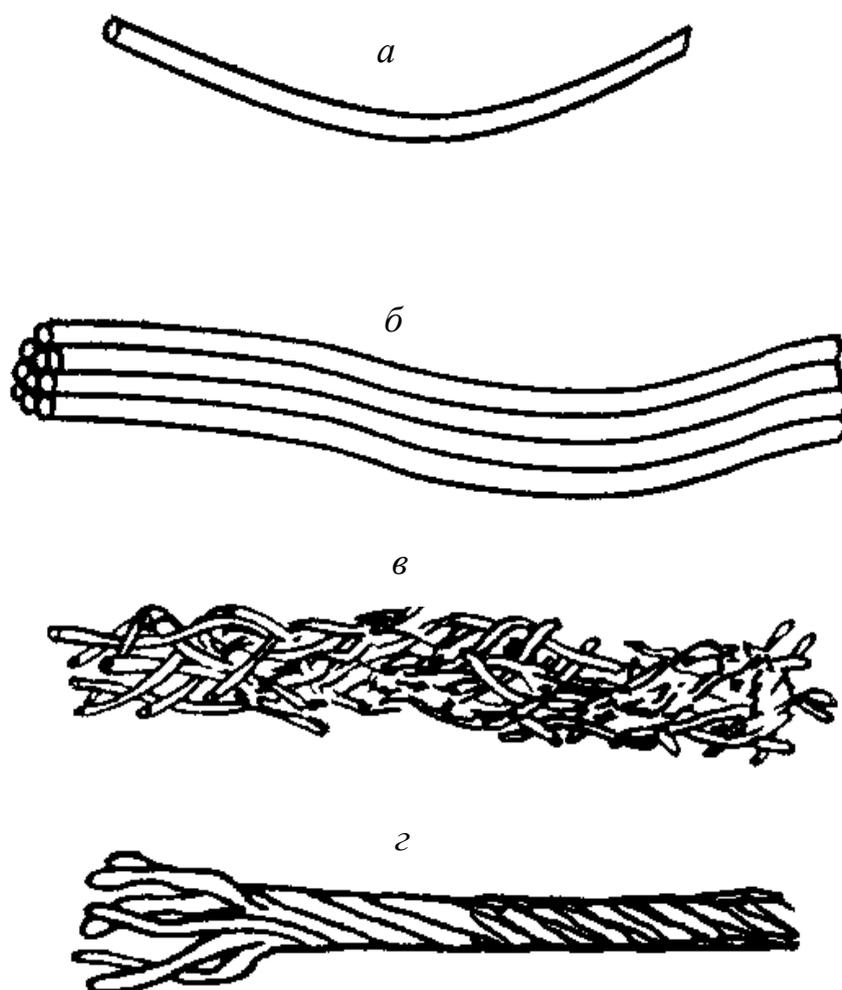
**2.2.1. Структура и свойства нити.** Непропитанные волокнистые материалы (волокна, нити, жгуты, ткани, трикотаж и др.), образующие определенную плоскую или пространственную структуру, называют армирующими каркасами.

В основе всех типов армирующих каркасов лежит нить. Свойства нити зависят в свою очередь от физических свойств и структуры составляющих ее волокон [25, 29, 32, 35, 48].

По определению, нить есть линейное соединение волокон, сформированное в непрерывную прядь. Нить может состоять из одного или более непрерывных волокон (до нескольких тысяч) либо из множества прерывающихся коротких (так называемых штапельных) волокон. Чтобы предотвратить проскальзывание волокон относительно друг друга и образовать функциональную нить, штапельным волокнам придают значительную крутку или переплетение. Нити из штапельных волокон называются штапельными нитями или штапельной пряжей. Две или более единичные нити могут скручиваться вместе с образованием крученых нитей в два, три и более сложения, из которых последующей круткой можно получить пряжу более сложного строения. На рис. 2.1 представлены схемы нитей различных структур [50].

Свойства нити зависят от физических свойств и структуры составляющих ее волокон. Структурные особенности нити зависят

главным образом от геометрии образующих ее волокон, а также от технологических параметров получения нити (ориентации волокна относительно оси нити, крутки, степени сцепления волокон). Важным параметром нити является относительная плотность волокон в поперечном сечении нити, которая выражается количественно через коэффициент упаковки (объемность) волокон. Коэффициент упаковки равен отношению удельного объема волокна ( $\text{см}^3/\text{г}$ ) к удельному объему нити ( $\text{см}^3/\text{г}$ ). Значения коэффициента упаковки волокон в нитях различных структур приведены в табл. 2.2.



*Рис. 2.1.* Идеализированные схемы нитей различных структур:  
*а* – непрерывное волокно; *б* – некрученная нить из непрерывных волокон;  
*в* – штапельная нить; *г* – крученная нить из непрерывных волокон

Структура нити играет главную роль в механизме реализации свойств волокон в свойства нити. Эффективность переноса свойств зависит главным образом от искривления волокон в нити и характера зацепления волокон, присущих разным типам структур нити. В нитях

из высокомодульных материалов коэффициент реализации значительно ниже, чем у низкомодульных, из-за повреждения волокон в процессе переработки. Известно, что высокомодульные волокна и нити плохо сопротивляются контактному, сжимающему и изгибающему напряжениям. Поэтому высокомодульные волокна в ткани сохраняют не более 50 % исходной прочности и жесткости. Для достижения более высокого коэффициента реализации свойств в системах волокно – нить и волокно – ткань применяют различные структуры ткани, технологические приемы.

Таблица 2.2

Типичные коэффициенты упаковки различных нитей

Структура нити	Коэффициент упаковки
<i>Моноволокно</i>	1,00
<i>Нить из моноволокон</i>	
некрученная	0,25
слегка крученная	0,30
регулярно крученная	0,60
сильно крученная	0,90
текстурированная	0,33
<i>Штапельная нить</i>	
слабо крученная	0,33
сильно крученная	0,60

**2.2.2. Армирующие каркасы композитов.** Армирующие каркасы подразделяются на четыре категории: дискретную, непрерывную одномерную, плоского переплетения (двухмерную) и пространственную интегрированную [20, 25, 50].

В дискретной волокнистой системе ориентация волокон хаотична и не поддается точному контролю.

Для структур второй категории характерна наивысшая степень непрерывности и линейности волокон. В этих структурах реализуется наибольшая эффективность свойств волокон. Подобные структуры характерны для намоточных волокнистых систем. Недостаток армирующих каркасов намоточных волокнистых систем заключается в их низкой внутри- и межслоевой прочности.

Третью категорию волокнистого армирования составляют системы плоского переплетения, с помощью которых можно получить различные геометрии структур армирующих каркасов. В случае тканых материалов путем изменения частоты переплетения нитей основы и утка можно образовывать полотняное (наибольшая частота переплетения), саржевое или сатиновое переплетения (наименьшая частота переплетения). Чем меньше извитость волокон в армирующем каркасе, тем больше эффективность использования его прочностных и жесткостных свойств и меньшая структурная целостность. Полотняное переплетение характеризуется большой структурной целостностью за счет снижения эффективности использования прочности нити. И, наоборот, большая эффективность использования прочности нитей у ткани сатинового переплетения характеризуется меньшей структурной целостностью.

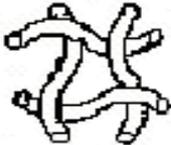
Четвертую категорию волокнистых систем образуют интегрированные пространственные системы, в которых армирующие волокна ориентированы в разных направлениях в плоскости и пространстве. Основная положительная черта таких структур – отсутствие выраженных направлений слабого сопротивления сдвигу, отрыву и расслоению благодаря многонаправленному армированию.

**2.2.3. Структура и текстурные свойства текстильных армирующих материалов.** К текстильным армирующим материалам относятся ткани, трикотаж, плетение, нетканый материал. Структура и текстурные свойства данных материалов зависят от требований к прочностным и деформационным свойствам композита, а также от требований, связанных с множеством разных технологических воздействий, которым подвергается армирующий материал в процессе переработки в изделие. В зависимости от технологии переработки и вида изделия армирующий материал должен обладать или высокой размерной стабильностью, или умеренной формуемостью, или способностью принимать нужную форму при глубокой вытяжке. Основными типами структур текстильных армирующих материалов являются тканые, трикотажные (вязаные), плетеные и нетканые структуры, показанные в табл. 2.3 и на рис. 2.2.

**2.2.4. Тканые материалы.** В производстве композитов используются различные типы тканей. Они различаются между собой по весу, толщине, типу и номеру нити, по типу переплетения. Наибольшего применения получили ткани трех основных типов переплетения: полотняного, саржевого и сатинового. В ткани полотняного переплетения (рис. 2.2,*a*) основа и уток взаимно переплетаются. Саржевая ткань соткана так, что на ее поверхности получается характерный узор из диагональных полос. В ткани сатинового переплетения каждая нить основы или утка проходит над несколькими нитями утка или основы. Применяя ткани различных типов, можно получать композиты с различными прочностными и технологическими свойствами. Наиболее высокими прочностными свойствами обладают ткани сатинового переплетения, так как нити в них в основном прямолинейны. Такакая технология позволяет получать ткани разной ширины, в виде рукавов или полотен с различными конструкциями основы и утка с дополнительными проложенными (непереплетающимися) системами нитей.

Таблица 2.3

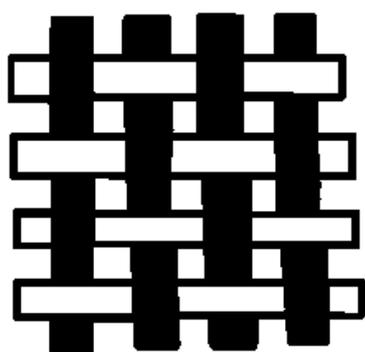
Основные типы структур армирующих текстильных материалов [50]

Составной элемент	Ткань	Трикотаж	Плетение	Нетканый материал
	Нить	Нить	Нить	Волокно
Способ образования	Перекрещивание	Переплетение	Переплетение	Соединение склейкой
Геометрия				

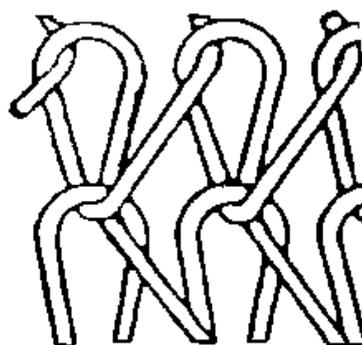
К недостаткам тканых материалов с точки зрения конструирования некоторых композитных изделий относятся ограниченная способность облегания криволинейных поверхностей (формуемость), слабое сопротивление сдвигу в плоскости, низкая эффективность реализации прочностных свойств волокон в ткани по отношению к растягивающим нагрузкам из-за непрямолинейности нитей основы и ут-

ка, обусловленной характером процесса ткачества. Ткани, образованные системой трех нитей, переплетающихся под углом  $60^\circ$ , характеризуются меньшей анизотропией, повышенной сдвиговой жесткостью, более однородной формуемостью. Тем не менее ни один из тканых материалов не обладает способностью к вытяжке, достаточной для реализации глубокого формования.

Геометрия



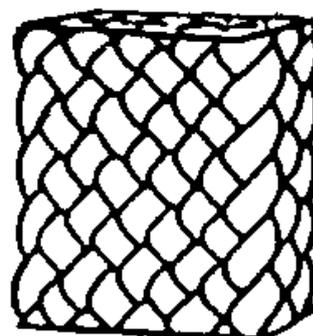
*a*



*б*



*в*



*д*

Рис. 2.2. Структуры тканых (*a*), вязаных (*б*), плетеных (*в*) и нетканых (*д*) армирующих материалов [50]

**2.2.5. Трикотажные структуры.** Трикотажные структуры (рис. 2.2,*б*), образованные переплетением одной или нескольких армирующих нитей, позволяют реализовать значительно более широкий диапазон форм и свойств, чем тканые. Такие трикотажные структуры, как основно-вязаные и уточно-вязаные (кулирные), обеспечивают деформируемость полотна во всех направлениях и пригодны для изготовления композитных изделий глубоким формованием. Ис-

пользуя систему проложенных переплетающихся нитей, можно придать стабильность размеров в одном направлении и способность к формованию в других. Основно-вязаные трикотажи с проложенными нитями особенно удобны для ряда областей применения благодаря необычной способности сохранять высокие механические свойства проложенной нити и вследствие этого открывают широкие возможности проектирования изделий с разными эксплуатационными характеристиками, начиная от высокой стабильности размеров до заданной деформируемости в нужных направлениях. Более того, трикотажи этого типа с проложенными основными нитями обладают более высокими коэффициентами реализации свойств волокон при растяжении, сопротивлении сдвигу в плоскости, чем сопоставимые по структуре тканые материалы. Главный недостаток трикотажных систем применительно к некоторым видам изделий: ограниченная толщина материала (от трех до пяти диаметров нити) и большой расход сырья относительно требуемой застильности.

**2.2.6. Плетеные структуры.** Плетеные текстильные изделия могут обладать как стабильностью размеров, так и формуемостью в зависимости от структуры и вида переплетения систем нитей (рис. 2.2,в). Виды плетеных изделий весьма разнообразны и включают полые трубчатые рукава, сплошные цилиндры, полотна, стержни квадратного сечения и др. Структура перечисленных изделий может включать проложенные (т.е. переплетенные) системы нитей, расположенные между переплетаемыми нитями. Плетеные структуры с проложенными нитями или с уплотненными схемами плетения обладают хорошим сопротивлением растяжению в направлении проложенных нитей и одновременно плохо сопротивляются сжатию в этом направлении.

**2.2.7. Нетканые текстильные материалы.** Наиболее широко распространенной разновидностью арматуры из неориентированных волокон являются волокнистые маты. Они состоят из рубленых или штапельных хаотически расположенных элементарных нитей, механически или химически связанных между собой. Длина отдельных волокон составляет, как правило, 20-50 мм. Снижение длины волокна ниже 20 мм приводит к резкому падению прочности, увеличение же длины волокон выше 50-70 мм приводит к ухудшению формуемости материала, не давая при этом существенного увеличения прочности.

В химически связанных матах связующее (его наносят около 5 %) соединяет отдельные пряди и удерживает их вместе, придавая мату достаточную прочность, необходимую при укладке в процессе формирования. В механически связанных матах волокна скреплены между собой механическим путем – прошивкой и взаимным сцеплением. Они лучше поддаются смачиванию связующим и формованию.

**2.2.8. Стекланные волокна и армирующие материалы на их основе.** Наиболее распространенными армирующими волокнами являются стекловолокна [36]. Исходным технологическим процессом для получения всех видов стекловолокон является процесс вытяжки нитей из расплава.

Кварцевый песок, известняк, борная кислота, глина, уголь, шпаты и другие компоненты перемешиваются и плавятся в высокотемпературных печах. Температура плавления для каждой композиции своя, но в среднем она составляет около 1260 °С. Расплав стекла поступает непосредственно в оборудование для расплавного формования. Это одностадийный процесс. При двухстадийном процессе расплав перерабатывается вначале в стеклосферы, которые затем поступают в плавильные печи (емкость из платинового сплава, где происходит плавление стекломассы, называется бушингом). Под действием гидростатического давления расплав стекла вытекает через тонкие отверстия фильеры в днище бушинга. Экструдированные из каждого отверстия струи расплава в потоке водяных брызг застывают. Затем их собирают в нить и пропускают через ванну, в которой на волокна наносится покрытие – замасливатель, способствующий соединению волокон в компактную нить и предохраняющий поверхность волокон от механических повреждений при последующей текстильной переработке. Собранные в единой пучок элементарные волокна носят название " жгут или стренга ". Стекловолоконная стренга принимается на намоточное устройство со скоростью 3,2 км/мин. В дальнейшем бабины со стеклонитью проходят сушку для последующей переработки в товарную продукцию. Схема одностадийного получения стекловолоконна представлена на рис. 2.3.

Каждое элементарное волокно, вытягиваемое из отверстий фильеры, должно контролироваться для обеспечения стабильности размеров и свойств. Этот контроль достигается с помощью регулирования вязкости и температуры расплава стекломассы, а также скорости

вытяжки (скорости приема нити). Следовательно, можно получать волокна различной тонины. В мировой практике установлено несколько стандартов на толщину стекловолокон. Эти данные представлены в табл. 2.4.

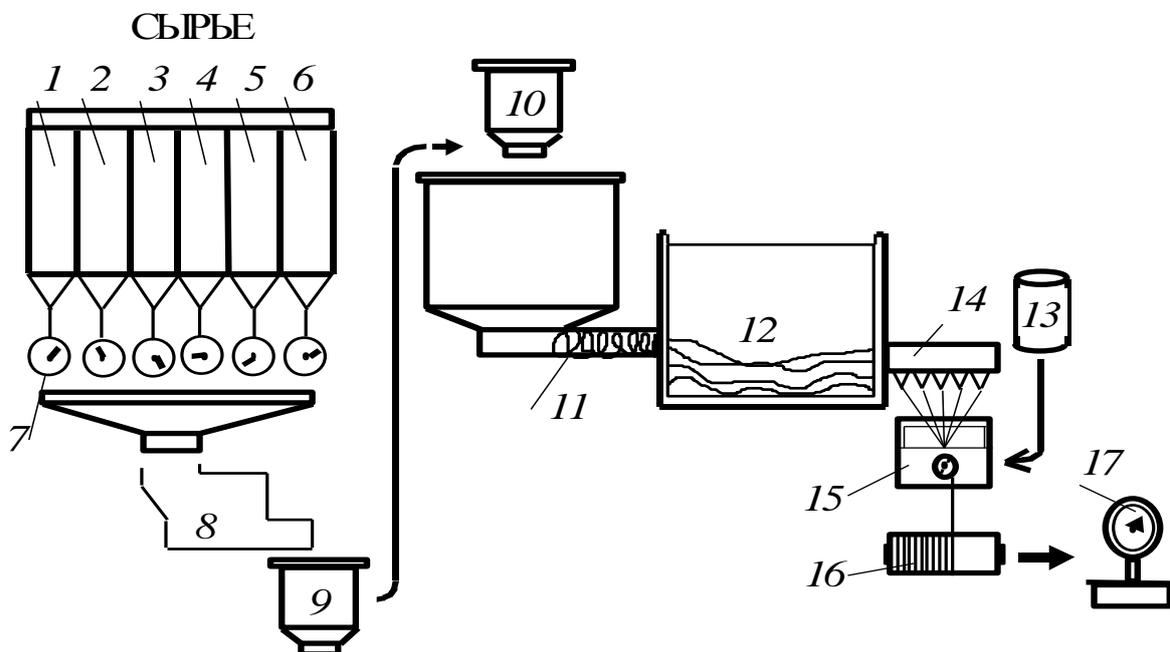


Рис. 2.3. Схема одностадийного получения стекловолокна:  
 1 – глина; 2 – известняк; 3 – уголь; 4 – кварцевый песок; 5 – флюорит;  
 6 – борная кислота; 7 – автоматические дозаторы; 8 – смеситель; 9, 10 – бункера;  
 11 – шнековый питатель; 12 – ванна; 13 – секция приготовления замасливателя (шлихты);  
 14 – платиновые фильеры (бушинги) с электронагревом и автоматическим управлением;  
 15 – замасливатель; 16 – высокоскоростное намоточное устройство;  
 17 – пост контроля и взвешивания

Таблица 2.4

Маркировка и размеры элементарных стекловолокон

Маркировка	Диаметр, мкм	Маркировка	Диаметр, мкм	Маркировка	Диаметр, мкм
<i>В</i>	3,8	<i>ДЕ</i>	6,0	<i>Н</i>	10,0
<i>С</i>	4,5	<i>Е</i>	7,0	<i>К</i>	13,0
<i>Д</i>	5,0	<i>Г</i>	9,0		

### Состав стекла

Стекло является аморфным материалом. С одной стороны, оно не обладает кристаллической структурой твердого тела, с другой - не обладает текучестью, характерной для жидкостей. Химически стекла

состоят в основном из кремнеземной основы ( $\text{SiO}_2$ ), существующей в виде полимерных цепочек. Однако диоксид кремния (кварц) требует высоких температур для расплавления и вытягивания волокон. Поэтому кварцевые волокна используются в основном в особых случаях. Для снижения температуры расплава стекломассы, при которой можно проводить вытяжку волокон, необходима модификация состава стекломассы. Способы модификации состава имеют целью получение стекловолокон с определенными свойствами. Рассмотрим некоторые из этих способов.

Высокощелочные стекла (известные как натриевые или бутылочные стекла) являются наиболее распространенными. Они используются в основном для производства емкостей и листового стекла. Высокощелочные композиции, известные под маркой *A* – стекла, используются для получения волокон, обладающих высокой хемостойкостью. Вместе с тем высокое содержание щелочи в стекле снижает его электрические свойства. Высокие электроизоляционные свойства стекол получены на основе низкощелочных композиций (алюмоборосиликаты), получившие наименование *E* – стекол. В настоящее время из волокон *E* – стекла изготавливается большая часть текстильного ассортимента стекловолокон. Когда требуется особо высокая хемостойкость изделий, используются волокна из *C* – стекла (натрийборосиликатная композиция). Для создания волокон с высокими прочностными свойствами (для отдельных высоконагруженных конструкций в самолето- и ракетостроении) используют *S* – стекла (магнийалюмосиликатные композиции). Прочность волокон из *S* – стекла приблизительно на 40 % выше, чем волокон из *E* – стекла. Кроме того, *S* – стекла имеют более высокую теплостойкость. Состав композиций для перечисленных марок стекол с указанием массовых долей компонентов в процентах приведен в табл. 2.5.

#### *Свойства стекловолокон*

Состав стекла в первую очередь определяет физико-механические свойства стекловолокон. Не менее важную роль играет соблюдение технологии получения стекловолокон на всех стадиях их производства. Ниже приведены основные физико-механические

свойства (табл. 2.6), которые определяют их применение в различных областях техники.

Таблица 2.5

Состав композиций стекловолокон, %

Состав композиций	Марка стекла			
	<i>A</i> (высокощелочное)	<i>C</i> (химически стойкое)	<i>E</i> (электроизоляционное)	<i>S</i> (высокопрочное)
Окись кремния	72,0	64,6	54,3	64,2
Окись алюминия	0,6	4,1	15,2	4,8
Окись железа	–	–	–	0,21
Окись кальция	10,0	13,2	17,2	0,01
Окись магния	2,5	3,3	4,7	10,27
Окись натрия	14,2	7,7	0,6	0,27
Окись калия	–	1,7	–	–
Окись бора	–	4,7	8,0	0,01
Окись бария	–	0,9	–	0,2
Прочие вещества	0,7	–	–	–

Таблица 2.6

Физико-механические свойства стекловолокон

Свойства	Марка стекла			
	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>S</i>
Плотность, кг/м	2500	2490	2540	2480
Предел прочности при растяжении, МПа:	3033	3033	3448	4585
			при 22 °С	–
при 371 °С	–	–	2620	–
Модуль упругости при растяжении при 22 °С, МПа	–	69,0	72,4	85,5
Относительное удлинение при разрыве, ε %	–	–	3,5	–
Коэффициент Пуассона	–	–	0,22	–

Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha \cdot 10^6 \text{ 1/}^\circ\text{C}$	8,6	7,2	5,0	5,6
Температура размягчения, $^\circ\text{C}$	727	749	841	–

*Высокая прочность при растяжении.* Прочностные свойства стекловолокон зависят от химического состава стекла, технологии их получения, наличия механических повреждений на поверхности волокон, их диаметра и длины. С увеличением диаметра волокон их прочность падает. Наибольшее использование имеют стекловолокна диаметром (6 ÷ 15) мкм. Удельная прочность стекловолокон (отношение предела прочности при растяжении к плотности) превышает удельную прочность стальной проволоки.

*Тепло- и огнестойкость.* Неорганическая природа стекловолокон определяет их негорючесть, высокую теплостойкость. Высокая температура плавления стекловолокон (более 1000  $^\circ\text{C}$ ) позволяет использовать их для изготовления конструкций, предназначенных для работы при высоких температурах.

*Хемостойкость.* Стекловолокна устойчивы к большинству химикатов, грибков, бактерий.

*Влагостойкость.* Стекловолокна не корродируют, не набухают и сохраняют высокие прочностные свойства в среде с повышенной влажностью.

*Термические свойства.* Стекловолокна имеют низкий коэффициент линейного расширения и относительно высокий коэффициент теплопроводности.

Поскольку стекловолокна являются хорошими изоляторами электрического тока, они широко используются в изделиях, где необходимы высокая электрическая прочность и низкая диэлектрическая проницаемость. Таким образом, для каждого конкретного применения используется то волокно, в котором реализуется максимальное число необходимых свойств. Так, например, в авиа- и ракетостроении при создании радиолокационных обтекателей используются высокие прочностные и электрические свойства армирующих стекловолокон. При создании вентиляторных лопаток компрессора турбореактивного двигателя используются высокопрочные *S* – стекла. Если требуется сохранение максимальных свойств в условиях высокой влажности, то предпочтительнее волокна из *E* – стекол, так как они максимально устойчивы к воздействию воды.

### *Стекловолоконные ровнинги*

Стекловолоконные ровнинги представляют собой объединение непрерывных параллельных стренг (жгутов). Традиционный ровнинг производится совместным прядением нескольких простых стренг, число которых определяется требованиями последующей переработки (параметром ровнинга является длина единицы его массы). Отдельная стренга (жгут) состоит из объединенных элементарных стекловолокон.

### *Текстильная стекловолоконная пряжа*

Текстильная стекловолоконная пряжа – это собранные вместе одиночные параллелизованные стренги или волокна, которые в дальнейшем могут быть переработаны в текстильный материал. Волокна, полученные непосредственно из бушинга и объединенные вместе, представляют собой простейшую форму текстильной стекловолоконной пряжи, известной как "простая пряжа". Для использования такой пряжи в дальнейшей текстильной переработке ее обычно подвергают незначительной крутке (менее 40 об/м). Однако для большинства тканей необходима более толстая пряжа, чем получается непосредственно из бушинга. Более толстая пряжа получается методом скручивания и трощения (т.е. последующим скручиванием двух или более уже предварительно скрученных жгутов). Типичным примером является скручивание двух простых стренг.

Пряжа или жгут имеют  $S$  – крутку, если скручиваемые элементы располагаются справа – вверх – налево, и  $Z$  – крутку, когда скручиваемые элементы располагаются слева – вверх – направо. Просто скрученный жгут будет образовывать петли, скрутки и запутываться, так как все элементы закручены в одном направлении. Во избежание этого при трощении общая крутка производится в направлении, противоположном "простой" крутке.

### *Ткани из стекловолокон*

Для изготовления стеклопластиков используются различные типы стеклянных тканей. Свойства и условия получения стеклотканей зависят от строения этих тканей, плотности переплетения, извитости пряжи, плотности исходной пряжи и от условий ткачества. Плотность нитей в основе и утке определяется числом нитей в 1 см ткани соответственно в продольном и поперечном направлениях. "Основа" –

это нить (пряжа), расположенная вдоль длины ткани, а "уток" переви-  
вает ткань в поперечном направлении. Плотность ткани, ее толщина и  
прочность при разрыве пропорциональны числу нитей и типу пряжи,  
используемым при ткачестве. Существуют различные виды перепле-  
тений основы и утка для создания тканей. Варьируя вид ткани, можно  
создать разнообразные армирующие структуры, влияющие на свой-  
ства композитов из них. Для производства стеклопластиков приме-  
няются ткани трех основных типов: полотняного, саржевого, сатино-  
вого. Ткань с полотняным переплетением, в которой уток проходит  
под каждой нитью основы и над ней, обладает самой высокой степе-  
нью устойчивости относительно проскальзывания пряжи и менее все-  
го повреждается. Такая ткань стабильна как по плотности утка и ос-  
новы, так и по расходу пряжи. Наиболее высокими прочностными  
свойствами обладают ткани сатинового переплетения, так как нити в  
них в основном прямолинейны.

**2.2.9. Углеродные волокна и армирующие материалы на их  
основе.** Основным высокопрочным, высокомодульным армирующим  
материалом при создании высокопрочных композитов с органиче-  
скими и неорганическими матрицами являются углеродные (графито-  
вые) волокна [29, 44]. Уникальные свойства композиционных волок-  
нистых материалов с углеродными волокнами определяются в  
первую очередь высокими механическими свойствами самих воло-  
кон. Эти характеристики обусловлены высокой анизотропией меха-  
нических свойств кристаллов графита. На рис. 2.4 показана кристал-  
лографическая структура идеального кристалла графита. Как видно  
из рисунка, атомы углерода расположены в так называемых базовых  
плоскостях и соединены очень прочными ковалентными (химически-  
ми) связями. Расстояние между базовыми плоскостями кристалла  
графита составляет  $3,35\text{\AA}$ . Наибольшая прочность и наибольший мо-  
дуль упругости реализуются при растяжении вдоль базовых плоско-  
стей. Теоретический предел прочности и теоретический модуль упру-  
гости при растяжении вдоль слоев составляют соответственно около  
100 и 1000 ГПа. Взаимодействие между плоскостями определяется  
относительно слабыми Вандер-Вальсовыми силами, что приводит к  
низким значениям механических свойств кристалла при растяжении в  
направлении, перпендикулярном базовым плоскостям. Теоретический  
модуль упругости поперек слоев составляет около 35 ГПа.

В углеродных волокнах структура кристаллов далеко не совер-

шенна. Межплоскостные расстояния не жесткофиксированы, и ориентация плоскостей относительно оси волокна существенно ниже. С увеличением степени ориентации базовых плоскостей вдоль оси волокна и уплотнением этих плоскостей возрастают прочностные и упругие свойства волокна.

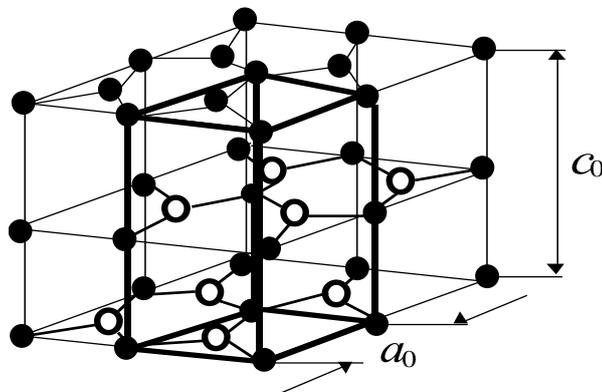


Рис. 2.4. Кристаллографическая структура идеального кристалла графита

Общепринятая технология производства углеродного волокна основана на графитизации при термической обработке в инертной среде различных органических волокон: полиакрилонитрильных (ПАН), из нефтяного пека, гидратцеллюлозных (ГТЦ), из полиамидных, полиэфирных, фенольных смол и др. Из всех видов исходных волокон наиболее пригодными по технологическим и экономическим параметрам оказались ПАН, пеки и ГТЦ. На сегодня они являются основным исходным сырьем для производства углеродных волокон. Использование в технологии производства углеродных волокон метода карбонизации органических волокон обусловлено их промышленным выпуском. Потенциально применяемые для пиролиза органические волокна должны удовлетворять ряду критериев. Во-первых, исходные волокна должны сохраняться как единое целое на всех стадиях изготовления углеродных волокон (УВ). Во-вторых, они не должны образовывать "расплава" исходных волокон ни на одной стадии производства. Атомы углерода в процессе пиролиза должны иметь тенденцию к образованию графитовых плоскостей, определяющих оптимальные свойства УВ. Самыми высокими свойствами обладают волокна, у которых графитовые плоскости наиболее ориентированы вдоль оси волокна. Одним из важных требований к исходным материалам является их низкая цена.

*Углеродные волокна из полиакрилонитрила (ПАН)*

Процесс переработки ПАН-волокна в углеродные волокна включает следующие стадии: формирование исходного ПАН-волокна; предварительная вытяжка; стабилизация при 220 °С на воздухе под натяжением (ориентация надмолекулярной структуры параллельно оси волокна); карбонизация при 1500 °С в атмосфере инертного газа; графитизация при 3000 °С в атмосфере инертного газа.

### *Характеристики ПАН*

ПАН является атактическим, линейным полимером, состоящим из углеродной скелетной молекулы с углеродоазотными боковыми полярными группами. Структура идеальной ПАН-молекулы показана на рис. 2.5.

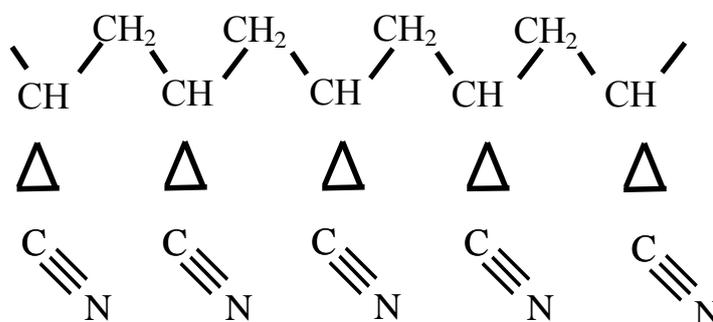


Рис. 2.5. Структура идеальной ПАН-молекулы

Полимер ПАН растворяют в полярных растворителях для образования прядильного раствора, который, пройдя через фильеры в осадительную ванну, образует волокно. Далее волокно проходит стадию промывки, вытяжки и сушки. Результатом процесса мокрого формирования является образование ориентированных структур в волокнах ПАН. Электронная микрофотография, полученная со свежесформованного волокна, показывает, что молекулы ПАН образуют плотные упаковки фибрилл, которые объединяются в виде трехмерной сетки. Ориентация фибрилл при образовании трехмерной сетки может быть повышена вытяжкой волокна в осадительной ванне (при формировании). Ориентационная вытяжка повышает механические свойства волокна. Схема ориентационной вытяжки изображена на рис. 2.6.

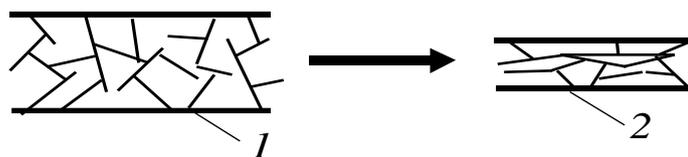


Рис. 2.6. Влияние вытяжки на фибриллярную сетку ПАН-волокна:  
1 – исходная фибриллярная сетка; 2 – вытянутое волокно

### *Стабилизация и карбонизация ПАН-волокна*

Для получения хорошего высокопрочного, высокомодульного УВ из ПАН необходимо создать преимущественную ориентацию макромолекул параллельно оси волокна. Затем следует стабилизировать структуру волокна, чтобы преимущественная ориентация сохранилась в волокне после карбонизации.

В настоящее время в технологии стабилизации ПАН предпочтительнее отдается методу предварительного натяжения волокна для ориентации фибриллярной сетки вдоль оси волокна и последующей стабилизации на воздухе при температуре 200...220 °С. Карбонизация ПАН-волокна, при которой происходит его превращение в углеродное волокно, проводится в атмосфере инертного газа при температуре 1000 – 1500 °С. При этой температуре из волокна удаляются почти все элементы за исключением углерода. Химический состав волокна после прогрева при 1000 °С включает в себя примерно 94 % углерода и 6 % азота. При обработке при 1300 °С в материале остается не более 0,3 % азота. При 1600 °С теряется 55...60 % массы исходного ПАН-волокна. 40...45 %-ное содержание углерода в ПАН является весьма хорошим показателем по сравнению с другими исходными материалами. Для дальнейшего повышения модуля упругости карбонизированных волокон проводят их графитизацию при температурах выше 1800 °С. Увеличение этого показателя достигается за счет улучшения кристаллической структуры и ее ориентации вдоль оси волокна.

### *Углеродные волокна из пеков*

Пеки являются продуктами деструкции, образующимися при перегонке сырой нефти, каменного угля и др. под воздействием высокой температуры. Многообразие пеков определяется их молекулярной структурой. Промышленное значение имеет только процесс получения углеродного волокна на основе жидкокристаллических

(мезофазных) пековых структур. В технологическую схему процесса вводится стадия перевода пека в жидкокристаллическое состояние путем его термообработки при определенных условиях. Мезофазное состояние характеризуется упорядочением молекулярной структуры еще в жидком состоянии. Под воздействием температуры из изотропного расплава формируется жидкокристаллическая структура. Схема процесса формования волокон из жидкокристаллических пеков показана на рис. 2.7.

Процесс производства УВ из мезофазных пеков состоит из следующих этапов: нагревания изотропного расплава пека при 400...450 °С в среде инертного газа для получения жидкокристаллического (мезофазного) состояния; формования волокон из жидкокристаллических пеков; отверждения волокон; карбонизации волокон; графитизации волокон.

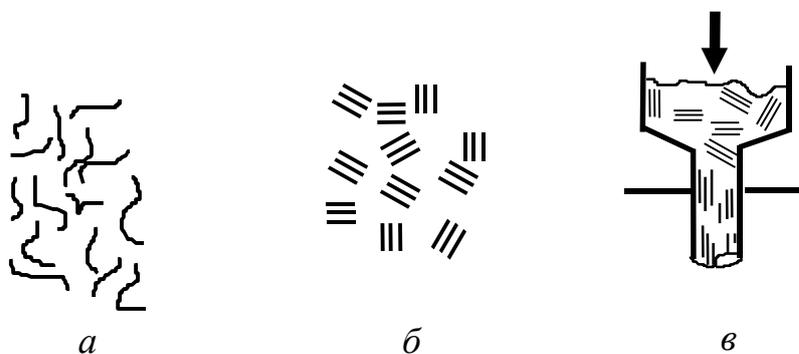


Рис. 2.7. Процесс получения волокна из жидкокристаллических пеков:  
а – изотропный расплав; б – жидкокристаллическая (мезоморфная) фаза;  
в – ориентированное волокно

Формирование волокон из мезофазных пеков производится из расплавов, содержащих 50 ... 90 % мезофазы. Мезофаза помещается в экструдер, предварительно нагретый до соответствующей температуры, а затем расплав мезофазы продавливается через фильеры в атмосферу инертного газа. Скорость формования составляет около 127 м/мин, при этом степень фильерной вытяжки составляет приблизительно 1000:1. Конечный диаметр волокон при этом равен 10...15 мкм. При малых степенях вытяжки сечение волокна равно площади сечения фильеры. Степень вытяжки играет важную роль не только для получения волокна нужной толщины, но и для увеличения степени молекулярной ориентации в волокне. Волокна, подвергнутые сильной вытяжке и обладающие высокой степенью молекулярной ориентации, оказываются более однородными. Далее, волокна под-

вергаются термообработке при температуре ...300 °С в кислородсодержащей среде. В результате такой обработки молекулы в мезофазной структуре сшиваются под влиянием окислительной полимеризации и образуют стабилизированное волокно. Следующим этапом является карбонизация и графитизация стабилизированного волокна, которая проводится при температурах 1000 ... 3000 °С соответственно. В результате этого процесса пек коксуется в углеродный и окончательно в графитовый материал. После карбонизации ориентация молекул возрастает. Волокна, с высокой степенью ориентации надмолекулярной структуры, имеют высокий модуль упругости ( $E = 880$  ГПа). Однако для волокон из пеков характерна высокая микро- и макропористость, что существенно снижает их прочность. Прочность волокна линейно зависит от температуры термообработки. При изменении температуры термообработки от 1700 °С до 3000 °С прочность изменяется от 1380 МПа до 2200 МПа.

#### *Углеродные волокна из волокон гидрата целлюлозы*

Волокна на основе гидрата целлюлозы получают методом мокрого формования из древесной целлюлозы. Начиная с 1959 г., эти волокна стали широко использоваться как сырье при получении высокопрочного, высокомодульного углеродного волокна для композиционных материалов. Процесс получения углеродных волокон из волокон гидрата целлюлозы (ГТЦ) включает три основные стадии: низкотемпературную стабилизационную термообработку, карбонизацию при 1300 °С, графитизацию с вытяжкой при 2800...3000 °С. Низкотемпературная термообработка проводится на воздухе при температуре 400 °С. Эта термообработка имеет целью стабилизацию надмолекулярной структуры волокна перед карбонизацией.

Графитизация волокон проводится при температуре выше 2800 °С. Волокна при этой температуре находятся очень короткое время, но за этот промежуток времени могут дополнительно быть вытянуты на 100 %. Эта вытяжка обеспечивает ориентацию надмолекулярной структуры, что позволяет достичь высоких физико-механических свойств углеродных волокон. Модуль упругости вытянутого в процессе графитизации волокна составляет  $E = 700$  ГПа, в то время как невытянутое волокно имеет модуль  $E = 70$  ГПа. Наиболее важными технологическими параметрами, влияющими на модуль упругости, являются: конечная температура термообработки, среднее

напряжение в волокне в процессе карбонизации и среднее напряжение в волокне при графитизации (при температуре 2800 °С и выше). Прочность УВ на основе ГТЦ также зависит от указанных выше технологических параметров. Предел прочности может изменяться от 690 до 3400 МПа. Деформация при растяжении не превышает 1 %. Процесс термовытяжки волокна при графитизации является дорогостоящим процессом, и это существенно влияет на высокую стоимость углеродных волокон из ГТЦ по сравнению с УВ из ПАН и пеков.

#### *Армирующие материалы на основе УВ*

Армирующие материалы на основе УВ выпускаются в виде самых разнообразных текстильных структур: непрерывных нитей, тканых и нетканых материалов, ровнингов, жгутов, войлока и др. Тип и вид текстильной структуры определяются ее применением в композиционном материале.

**2.2.10. Органоволокна (арамидные волокна).** Органические (арамидные) волокна относятся к классу ароматических полиамидных волокон. Их получают на основе линейных волокнообразующих полиамидов, в которых не менее 85 % амидных групп непосредственно связано с двумя ароматическими кольцами. Органические волокнообразующие полимеры получают методом поликонденсации диаминов и галогенангидридов дикарбоновых кислот в растворе при низкой температуре. Образующийся при этом полимер в виде крошки или геля измельчается, промывается и высушивается.

При формовании волокон раствор очищенного полимера в сильной кислоте ekstrудировается через фильеру при температуре 51... 100 °С, и после прохождения воздушной прослойки (толщиной 5... 19 мм) попадает в осадительную ванну с холодной (0... 4 °С) водой.

Органоволокно представляет собой полифенилентерефталамид, являющийся продуктом поликонденсации терефталойлхлорида и фенилендиамина. Химическая структура органоволокна представлена на рис. 2.8.

Органоволокно относится к классу жесткоцепных высокоориентированных полимеров. Ароматические кольца придают макромоле-

кулам высокую жесткость, способствуют преимущественной ориентации макромолекул вдоль оси и обуславливают высокую химическую стабильность. Кристаллическая природа органоволокна обеспечивает достаточно высокую термическую стабильность.

Органические волокна обладают уникальными свойствами. Среди органических волокон они имеют самые высокие значения прочности и модуля упругости. Кривые зависимости напряжение – деформация при испытании оказываются практически линейными вплоть до разрушения. Продольные механические свойства уникальны даже по сравнению с неорганическими армирующими материалами. Они устойчивы к пламени и высокотемпературным воздействиям, а также к органическим растворителям, нефтепродуктам и различным маслам. Они обладают большей вязкостью разрушения, чем стеклянные и углеродные волокна. Органические волокна перерабатываются в текстильные структуры на обычном текстильно-технологическом оборудовании. Физико-механические свойства органических волокон приведены в табл. 2.7.

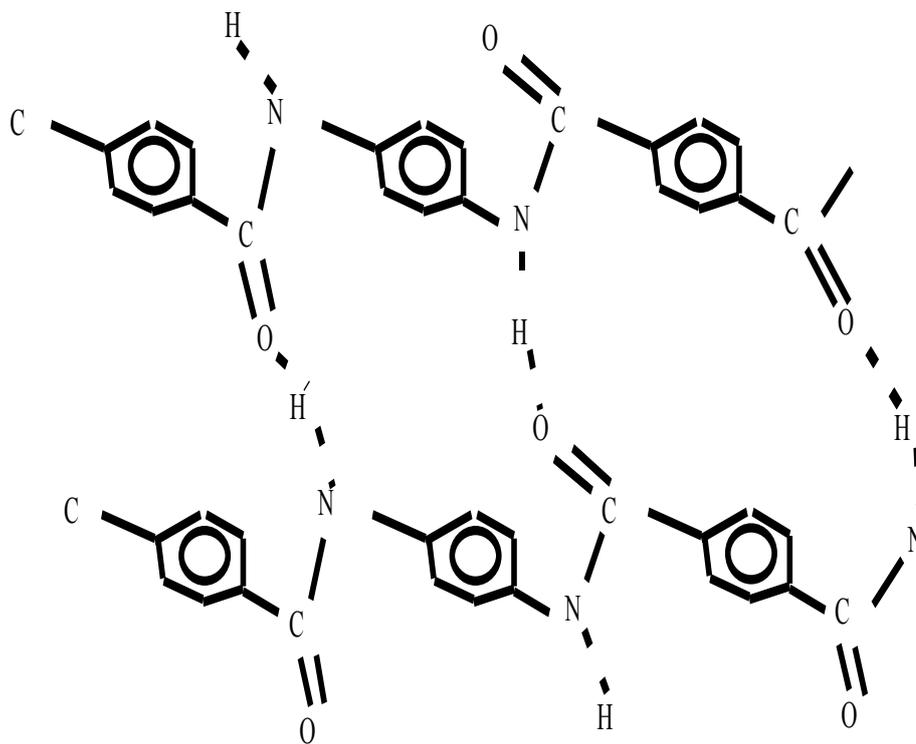


Рис. 2.8. Химическая структура органического волокна (кевлар)

### Свойства органических волокон

Плотность, кг/ м <sup>3</sup>	1440
Диаметр одиночного волокна, мкм	12
Предел прочности при растяжении $\sigma$ , МПа	2758
Удлинение при разрыве, %	2,4
Модуль упругости при растяжении, ГПа	130
Модуль упругости при изгибе, ГПа	105
Динамический модуль упругости, ГПа	137

Органоволокна не претерпевают при нагревании резких изменений свойств вплоть до разложения при высоких температурах. В табл. 2.8 представлены механические и теплофизические свойства органоволокон при различных температурах.

Армирующие материалы из органоволокон выпускаются в виде технических нитей с различной линейной плотностью и структурой, в виде пряжи, ровнинга и тканей.

Таблица 2.8

Механические и теплофизические свойства нитей из органоволокон при различных температурах

Температура длительного пребывания на воздухе без изменения свойств, °С	160
Температура разложения, °С	500
Предел прочности при растяжении, МПа: при 100 °С на воздухе при 200 °С на воздухе	3170 2720
Модуль упругости при растяжении, ГПа: при 100 °С при 200 °С на воздухе	113 110
Усадка, % / К	$4 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент линейного расширения в диапазоне 0- 100 °С, $\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ продольный радиальный	-2 59

**2.2.11. Борные армирующие волокна.** Борные волокна [6] отно-

сятся к наиболее высокопрочным, высокомодульным армирующим материалам. Они представляют собой непрерывные моноволокна диаметром 50 – 200 мкм. Высокая прочность борволокон обусловлена мелкокристаллическим строением (кристаллы порядка 1,5...3 нм) борного слоя. Борволокна имеют значительный разброс по прочности, который вызван неоднородностью структуры и дефектами в волокнах. Прочность борных волокон (диаметр 90... 140 мкм) составляет 3400... 3900 МПа, модуль упругости находится в пределах 360... 400 ГПа. Плотность борволокон зависит от их диаметра и изменяется от 2,4 до  $3,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент термического расширения в диапазоне температур 20...1000 К равен около  $7 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>. Борные волокна отличаются высокой твердостью. Прочностные характеристики борволокон сильно зависят от дефектов структуры. При нанесении термостойких покрытий может наблюдаться как повышение прочности за счет сглаживания поверхностных дефектов, так и снижение ее вследствие роста остаточных напряжений. Значение коэффициента Пуассона колеблется в пределах  $\nu = 0,04... 0,18$ . Пластические деформации имеют место при температурах свыше 900 К. На воздухе борволокна без покрытия начинают окисляться при 600 – 650 К и при температуре выше 900 К полностью теряют прочность. При нанесении термостойких покрытий прочность сохраняется до температур 1100 – 1300 К.

### **Технология получения борных волокон**

Борные волокна получают путем осаждения бора из газовой фазы на раскаленную током вольфрамовую нить диаметром 12,5 мкм [6]. Обычно используют смесь водорода H<sub>2</sub> и трихлорида бора BC1<sub>3</sub>. В промышленных масштабах выпускаются волокна диаметром 100, 140, 200 мкм.

Боровольфрамовые волокна производят в реакторе, схематически показанном на рис. 2.9. Вольфрамовую нить помещают в вертикальную стеклянную шахту с внутренним диаметром около 10 мм.

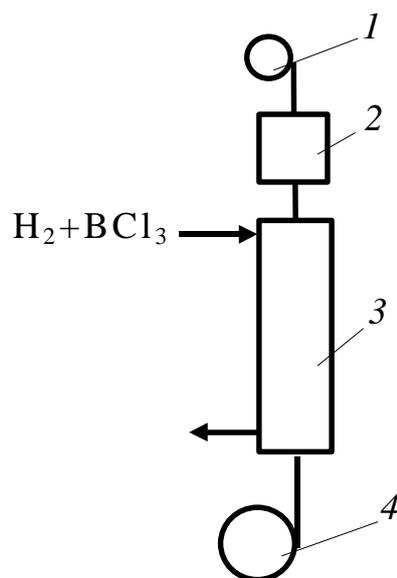


Рис. 2.9. Схема реактора для осаждения бора на вольфрамовую проволоку:

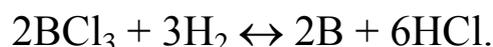
1 – исходная паковка вольфрамовой проволоки; 2 – секция очистки вольфрама;

3 – секция осаждения бора в одну или несколько стадий;

4 – приемная бобина для борного волокна

Для обеспечения электрического контакта с вольфрамом и для герметизации реактора (газовая смесь в реакторе находится при атмосферном давлении) шахта с обеих сторон закрыта наполненными ртутью емкостями, служащими затворами. В верхней части реактора вольфрамовая проволока нагревается в атмосфере инертных газов и очищается ими. В другой части реактора вольфрамовая основа нагревается до температуры 1350 °С в атмосфере смеси  $\text{H}_2$  и  $\text{BCl}_3$ , в которой и происходит осаждение бора на вольфрамовую проволоку.

Химическая реакция идет по схеме



Боровольфрамовые волокна имеют высокую стоимость, поэтому применение их ограничено. С целью снижения их стоимости в настоящее время ведутся интенсивные исследования возможности использования более дешевых углеродных волокон в качестве основы при получении борных волокон.

**2.2.12. Керамические волокна.** Керамические волокна применяются в металлокомпозитах и керамических КМ. К керамическим волокнам относятся  $\text{SiC}$  (карбит кремния),  $\text{BN}$  (нитрид бора),  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{ZrO}_2$  и др.

Керамические волокна являются одними из высокотермопроч-

ных и термостойких армирующих материалов. На их основе созданы перспективные композиционные материалы для элементов горячей части ГТД (лопатки соплового аппарата, турбины, камеры сгорания и др.), элементов конструкций ракетной и космической техники. В табл. 2.9 представлены физико-механические свойства некоторых керамических волокон.

Таблица 2.9

Физико-механические свойства керамических волокон

Волокно	$E$ , ГПа	$\sigma_{раст} \cdot 10^{-1}$ , МПа	КТР $\cdot 10^6$ , °C <sup>-1</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °C
SiC (на вольфрамовой подложке)	4,0–4,4	200÷400	4,8	3,2	2200–2500
BN	0,86	–	13,3	2,2–2,3	2720–3000
ZrO <sub>2</sub>	1,7÷2,5	120	7,6	5,6–5,75	2677–2710

При армировании керамики дисперсными частицами ее прочность удается повысить в 2 ÷ 3 раза, а ударную вязкость – не более чем в 10 раз. Армирование ее непрерывными волокнами позволяет увеличить ее предел прочности на растяжение более чем на порядок, а ударную вязкость – на 3–4 порядка. Тем не менее, основным недостатком, препятствующим широкому использованию керамических КМ, является их недостаточная ударная вязкость и высокая чувствительность к теплосменам.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое композиционный материал?
2. Какую роль играет армирующая компонента в композиционном материале?
3. Какую функцию выполняет матричная компонента?
4. Каким требованиям должна удовлетворять матричная компонента?
5. Каким требованиям должна удовлетворять армирующая компонента?
6. Дайте определение термопластичной матрицы.
7. Дайте определение термореактивной (отверждающей) матри-

цы.

8. В чем заключается отличие термореактивной матрицы от термопластичной?
9. Классификация композиционных материалов по типу матричной компоненты.
10. Классификация композиционных материалов по типу армирующей компоненты.
11. Какие существуют методы получения углеродных волокон?
12. Какие волокна относятся к анизотропным?
13. Почему в композиционных материалах используются волокна малых диаметров ( $d = 6,5 \dots 15$  мкм)?
14. Зависит ли прочность волокна от диаметра и, если зависит, то почему?

### **3. ОСНОВЫ МИКРОМЕХАНИКИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ**

#### **3.1. Определение упругих характеристик однонаправленного слоя**

*3.1.1. Основные предпосылки.* Изучение механического поведения композиционных материалов проводится на двух уровнях абстрагирования. Первый уровень, называемый микромеханикой, включает тонкие детали структуры композита на уровне размеров волокна, которое помещено в матрицу [1, 10, 30]. Главная задача микромеханики – связать эффективные модули упругости композита со свойствами его компонентов.

Основным результатом решения задачи в микромеханической постановке является вычисление эффективных модулей однонаправленного слоя, которые определяются как коэффициенты, связывающие усредненные по объему значения напряжений (компонент тензора напряжений) и деформаций (компонент тензора деформаций) при определенных граничных условиях.

Рассматриваемый ниже подход к вычислению эффективных модулей композиционных материалов основан на понятии представительного элемента объема, т. е. такого элемента, в котором все усредненные по объему компоненты напряжений и деформаций равны соответствующим величинам, вычисленным для рассматриваемого

композита в целом. Как правило, микромеханика ограничивается вычислением эффективных модулей упругости и коэффициентов Пуассона однонаправленного композиционного слоя. Эти вычисления дают возможность дальнейшего аналитического исследования на новом уровне абстрагирования, а именно на уровне слоистого тела. При этом реальный неоднородный материал рассматривается как однородное анизотропное тело, состоящее из однонаправленных слоев, ориентированных под разными углами (рис. 3.1).

Слой – основной элемент в композите, состоящий из погруженных в матрицу однонаправленных волокон. Следовательно, можно связать упругие и прочностные свойства однонаправленного слоя с соответствующими свойствами компонентов. Таким образом, имеется возможность проектировать элементы конструкций из волокнистых композитов, зная конструктивные требования к конструкции и свойства компонентов композитов.

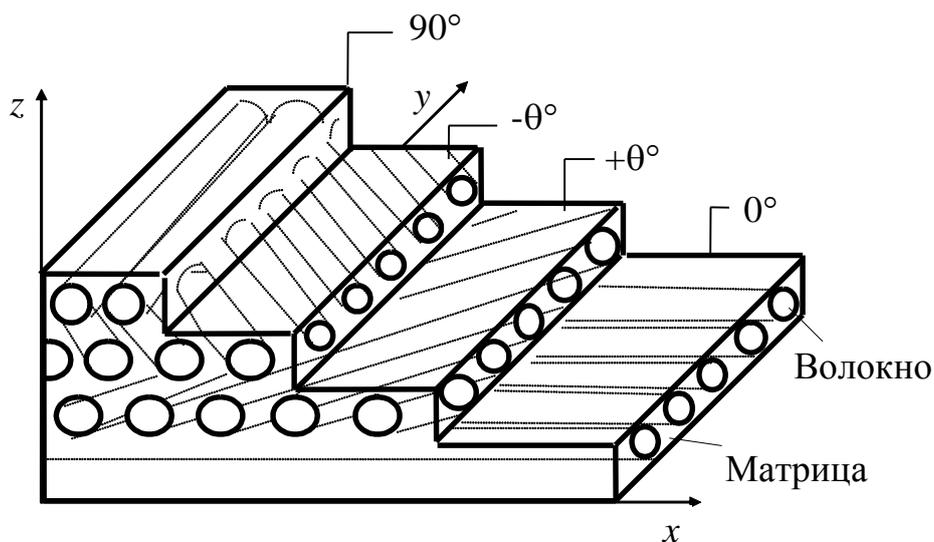


Рис. 3.1. Волокнистый композит с укладкой слоев:  $90^\circ$ ,  $-\theta^\circ$ ,  $+\theta^\circ$ ,  $0^\circ$

При определении упругих постоянных однонаправленного слоя по известным упругим характеристикам волокон и связующего необходимо рассмотреть напряженно-деформированное состояние последних при нагружении слоя вдоль армирования, поперек и при сдвиге. Совместная работа волокна и связующего, обладающих различными упругими характеристиками, представляет собой сложную математическую задачу. Для определения напряжений и деформаций в компонентах композиционного материала используют физические

и математические модели как самих компонентов, так и модели их совместной работы.

Для упрощения расчетов вводится ряд допущений:

1. Компоненты композиционного материала являются однородными и линейно-упругими материалами.

2. Связующее является изотропным, а волокна могут быть изотропными или трансверсально-изотропными.

3. Армирующие волокна являются прямыми и параллельными.

4. Армирующие волокна распределены равномерно и имеют одинаковое сечение.

Сама модель совместной их работы предполагает, что между арматурой и связующим существует жесткое сцепление, т. е. отсутствует скольжение. Поры как в арматуре, связующем, так и на поверхности их раздела отсутствуют.

Для определения напряжений в компонентах однонаправленного слоя в качестве расчетной модели будем пользоваться повторяющимся элементом структуры материала. Периодически повторяющийся элемент представляет собой типичную модель, применяемую в микромеханике для определения механических свойств композитов. На рис. 3.2 показаны модели, которые используются в работе [41] для определения упругих свойств композитов на основе методов сопротивления материалов.

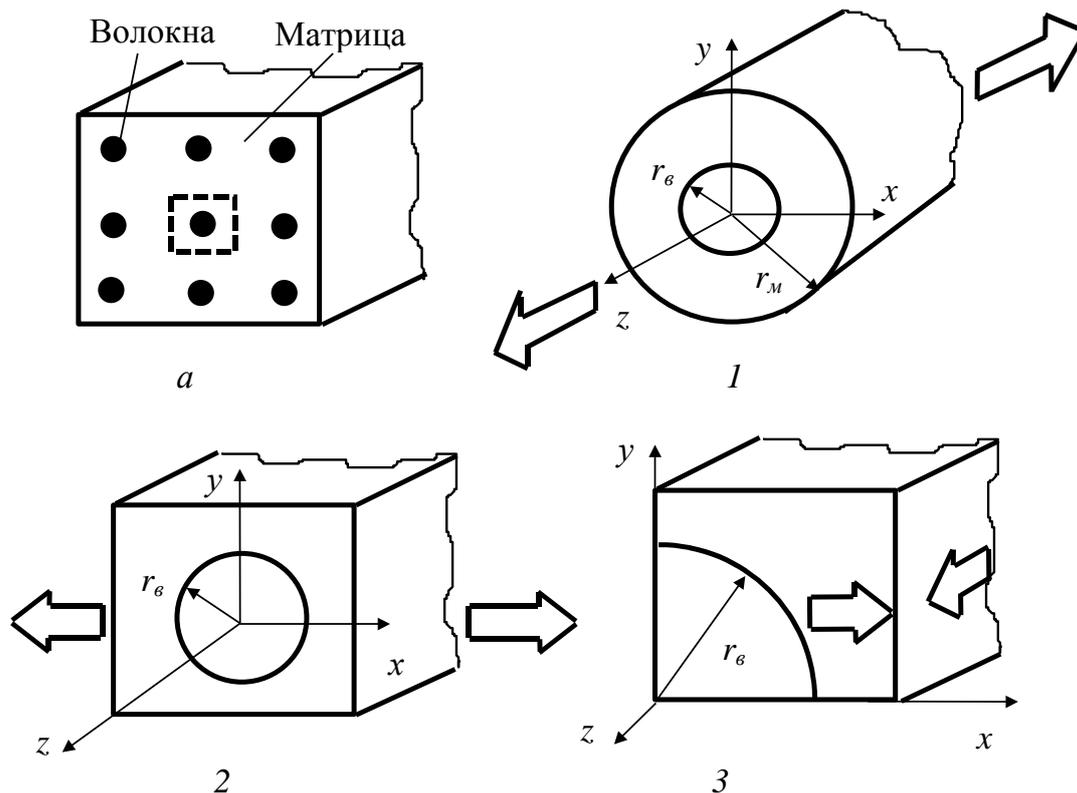


Рис. 3.2. Представительный объем композитного материала (а) и повторяющиеся элементы однонаправленного слоя для определения: 1 – продольного модуля упругости; 2 – поперечного модуля; 3 – модуля сдвига

В этой модели выделяются три элемента: первый – для определения поля внутренних напряжений при нагружении вдоль волокон, второй – для определения напряжений при нагружении поперек волокон, третий – для определения напряжений при сдвиге. Определение поля внутренних напряжений в волокне и связующем при различных видах нагружения представляет большие математические трудности. В инженерных расчетах, как правило, используют упрощенные модели, базирующиеся на методах сопротивления материалов. Полученные решения сопоставляются, где это возможно, с решениями, полученными на более точных моделях. Эти модели и решения изложены в целом ряде монографий и статей [30, 41, 43, 55 и др.].

В качестве упрощенной модели используется однонаправленный слой, состоящий из объема, занятого армирующими волокнами, и объема, занятого матрицей (рис. 3.3,б).

Возможность в этой модели пренебречь влиянием коэффициентов Пуассона волокна и матрицы, геометрической формой поперечного сечения армирующих волокон при определении эффективных

модулей упругости однонаправленного слоя позволяет существенно упростить решения.

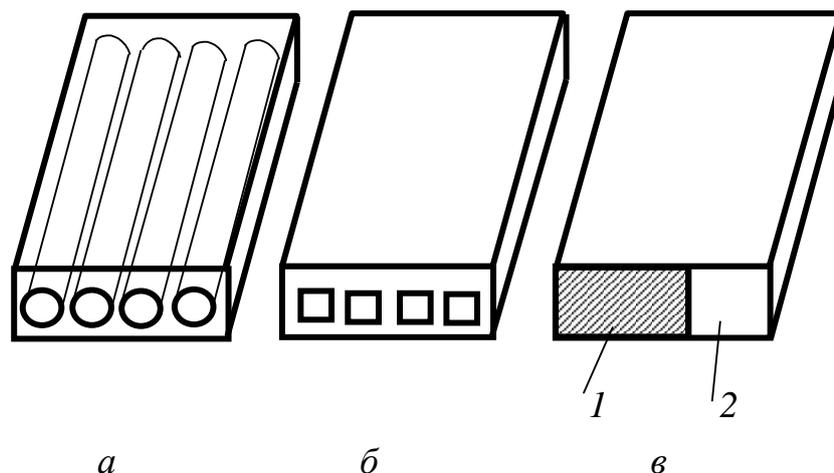


Рис. 3.3. Модели однонаправленного слоя с круглыми (а) и эквивалентными им по площади прямоугольными волокнами (б); в – упрощенная модель однонаправленного слоя для определения упругих свойств:  
 1 – объем, занятый волокном; 2 – объем, занятый матрицей

**3.1.2. Определение продольного модуля упругости.** Используем упрощенную модель однонаправленного слоя. Приложим к модели в направлении армирования усредненное по площади слоя напряжение  $\sigma_1$  (рис. 3.4).

Принимаем, что при растяжении в направлении армирования компоненты однонаправленного композита будут находиться в основном напряженном состоянии. Поперечно направленные к арматуре дополнительные напряжения, которые возникают ввиду различных значений коэффициентов Пуассона для армирующих волокон  $\nu_B$  и матрицы  $\nu_M$ , принимаются очень малыми и не учитываются.

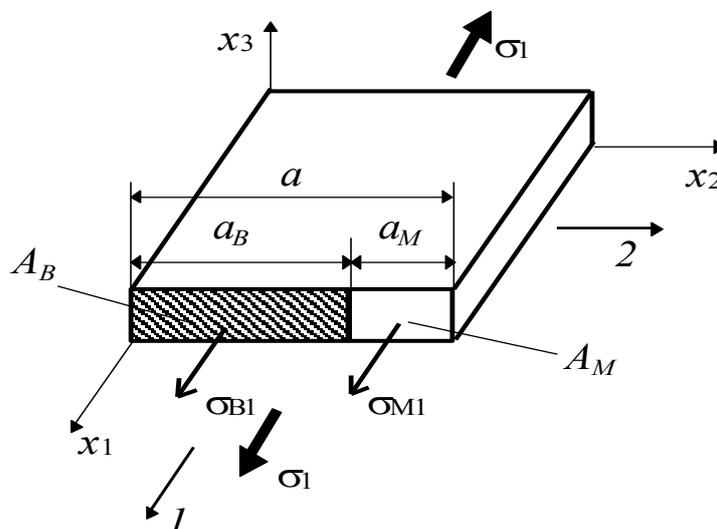


Рис. 3.4. Расчетная схема для определения продольного модуля упругости однонаправленного слоя:

$A_{\epsilon}$  – площадь сечения, занятая волокнами;  $A_m$  – площадь сечения, занятая матрицей;  
 $\sigma_1$  – усредненное напряжение, действующее на площадь сечения однонаправленного слоя;  
 $\sigma_{\epsilon 1}$ ,  $\sigma_{m1}$  – напряжения, действующие на площадях, занятых волокном и матрицей

Это допущение значительно упрощает модель, а полученные результаты соответствуют точности инженерных расчетов. Обозначим соответствующие перемещения по направлениям  $x_1, x_2, x_3$  через  $u_1, u_2, u_3$ . Считаем, что поперечные сечения при  $x_1 = \text{const}$  до деформации и после деформации являются плоскими и перпендикулярными направлению  $x_1$ . Это значит, что перемещения  $u_1$  не зависят от координат  $x_2$  и  $x_3$ . Отсюда следует, что  $\frac{\partial u_1}{\partial x_2} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3} = 0$ . Считаем так-

же, что перемещения точек в направлении  $x_2, x_3$  не зависят от координаты  $x_1$ . Поэтому  $\frac{\partial u_2}{\partial x_1} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1} = 0$ . Для определения модуля упруго-

сти в направлении  $x_1$  мысленно выделим параллелепипед и приложим напряжение  $\sigma_1$  в направлении армирования. Согласно предположкам, деформации компонентов в направлении  $x_1$  одинаковы:  $\epsilon_{m1} = \epsilon_{\epsilon 1} = \epsilon_1$ . Составим уравнение равновесия в направлении  $x_1$ . Представим сечение, перпендикулярное  $x_1$ , состоящим из двух частей: части, занятой армирующими волокнами, и части, занятой матрицей. В дальнейшем направление вдоль армирования будем обозначать “1”, поперечное направление – “2”.

Усилие, действующее в поперечном сечении однонаправленного слоя и вызывающее усредненное напряжение  $\sigma_1$ , воспринимается объемом, занятым волокном (напряжение  $\sigma_{1\epsilon}$ ), и объемом, занятым матрицей (напряжение  $\sigma_{1m}$ ). Обозначим объем, занимаемый волокном, через  $V_{\epsilon}$ . Общий объем обозначим через  $V$ . Введем понятие коэффициента армирования  $\Psi$  как отношение

$$\Psi = \frac{V_{\epsilon}}{V} = \frac{A_{\epsilon}}{A},$$

где  $A, A_{\epsilon}$  – соответственно, площадь всего сечения и площадь, занятая волокном.

Уравнение равновесия для рассматриваемого элемента будет

иметь вид

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_{\varepsilon 1} \cdot A_{\varepsilon} + \sigma_{m1} \cdot A_m .$$

Разделим левую и правую части полученного уравнения на  $A$ , получим

$$\sigma_1 = \sigma_{\varepsilon 1} \cdot \psi + \sigma_{m1} \cdot (1 - \psi) . \quad (3.1)$$

Считаем, что армирующие волокна, матрица и однослойный композит подчиняются закону Гука

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1}; \quad \varepsilon_{\varepsilon 1} = \frac{\sigma_{\varepsilon 1}}{E_{\varepsilon}}; \quad \varepsilon_{m1} = \frac{\sigma_{m1}}{E_m} . \quad (3.2)$$

Принимаем, что волокна и матрица деформируются совместно без проскальзывания

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{\varepsilon 1} = \varepsilon_{m1} . \quad (3.3)$$

Подставляя (3.2), (3.3) в (3.1), получим

$$E_1 = E_{\varepsilon} \cdot \psi + E_m \cdot (1 - \psi) . \quad (3.4)$$

Из (3.4) видно, что продольный модуль упругости однонаправленного композита в соответствии с выше принятой моделью (модель механической смеси) является суммой произведений модулей упругости компонент на их относительное объемное содержание. Таким образом, продольный модуль упругости однонаправленного слоя является управляемой характеристикой. Применяя волокна с соответствующими модулями упругости и варьируя их объемным содержанием, мы можем получать однонаправленный слой с заданными свойствами. В конструкционных полимерных волокнистых композициях, как правило, применяются армирующие волокна, у которых модули упругости значительно больше модуля упругости матрицы  $E_{\varepsilon} > E_m$ . В этих случаях продольный модуль упругости однонаправленного слоя определяется модулем упругости волокон и коэффициентом армирования  $E_1 \approx E_{\varepsilon} \cdot \psi$ . Зависимость продольного модуля упругости от коэффициента армирования представлена на рис. 3.5.

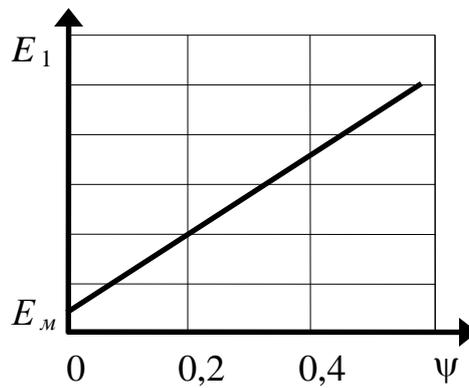


Рис. 3.5. Зависимость продольного модуля  $E_1$  от коэффициента армирования  $\psi$

Результаты вычислений продольного модуля упругости по формуле (3.4) были подтверждены многочисленными экспериментами и данными, полученными на основе более точных моделей, учитывающих форму поперечных сечений волокон, адгезионную связь между волокнами и матрицей, неоднородность напряженного состояния матрицы и волокон. Практически совпадающие результаты по упрощенной модели и уточненным моделям объясняются тем, что при растяжении вдоль волокон основную нагрузку воспринимает армирующая часть, и форма поперечных сечений волокон практически не влияет на величину продольного модуля упругости.

**3.1.3. Вычисление продольно-поперечного коэффициента Пуассона.** Рассмотрим вычисление коэффициента Пуассона однонаправленного слоя  $\nu_{12} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ , где  $\varepsilon_2, \varepsilon_1$  – относительные поперечная и

продольная деформации соответственно при действии напряжения  $\sigma_1$  (рис. 3.4). В отличие от изотропных материалов в композитах коэффициент Пуассона имеет два индекса: первый показывает направление действия напряжения, второй – направление поперечной деформации. Деформация в поперечном направлении состоит из деформации части, занятой волокнами, и части, занятой матрицей.

Деформация в поперечном направлении состоит из деформации части, занятой волокнами, и части, занятой матрицей.

$$\varepsilon_2 \cdot a = \varepsilon_{2в} \cdot a_в + \varepsilon_{2м} \cdot a_м,$$

где  $\varepsilon_{2в}, \varepsilon_{2м}$  – относительные поперечные деформации частей, занимаемых волокнами и матрицей;  $a, a_в, a_м$  – поперечные размеры сечения однонаправленного слоя и частей, занятых волокнами и матрицей соответственно (см. рис. 3.4).

Разделим левую и правую части на  $a$ . Получим

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2\sigma} \cdot \psi + \varepsilon_{2m} \cdot (1 - \psi), \quad (3.5)$$

где  $\psi = \frac{a_\sigma}{a}$ . Выразим относительные поперечные деформации однонаправленного слоя и частей, занимаемых волокном и матрицей, через их продольные деформации и коэффициенты Пуассона.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot \nu_{12}; \quad \varepsilon_{\sigma_2} = \varepsilon_{\sigma_1} \cdot \nu_{\sigma}; \quad \varepsilon_{m_2} = \varepsilon_{m_1} \cdot \nu_m, \quad (3.6)$$

где  $\nu_{12}$  – продольно-поперечный коэффициент Пуассона однонаправленного слоя;  $\nu_\sigma, \nu_m$  – коэффициенты Пуассона волокна и матрицы соответственно.

Подставляя (3.6) в (3.5) и учитывая, что продольные деформации однонаправленного слоя, волокон, матрицы одинаковы, т.е.  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\sigma_1} = \varepsilon_{m_1}$ , получим

$$\nu_{12} = \nu_\sigma \cdot \psi + \nu_m \cdot (1 - \psi). \quad (3.7)$$

Коэффициент Пуассона  $\nu_{21}$  определяется, как правило, из условия ортотропности [30, 43] однонаправленного слоя  $\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}$ .

Зависимость коэффициента Пуассона  $\nu_{12}$  от коэффициента армирования  $\psi$ , рассчитанная по формуле (3.7), представлена на рис. 3.6.

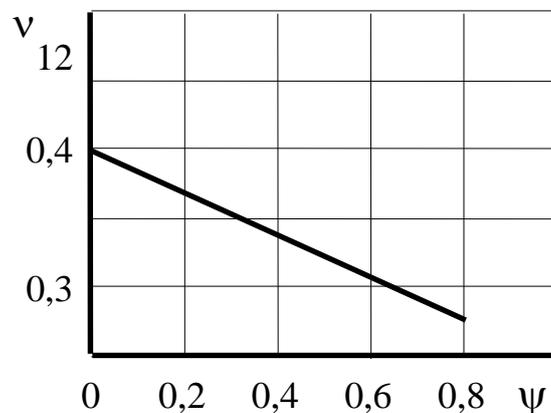


Рис. 3.6. Зависимость (качественная) коэффициента Пуассона  $\nu_{12}$

от коэффициента армирования  $\psi$  для КМ на основе полимерного связующего

**3.1.4. Определение поперечного модуля упругости и модуля внутрислойного сдвига.** Деформативные свойства однонаправленного слоя в направлении армирования в основном определяются жесткостью армирующих волокон и практически не зависят от геометрии их упаковки, формы их поперечного сечения и деформативных свойств матрицы. Деформативные свойства однонаправленного слоя в перпендикулярном армированию направлении зависят от всех перечисленных факторов. Для определения модуля упругости в поперечном направлении пользуются решением плоской задачи теории упругости, содержащим большое количество коэффициентов, практическое определение которых связано с большими трудностями. Поэтому воспользуемся выше принятой упрощенной моделью, которая, хотя и не учитывает вышеперечисленные факторы, но позволяет с допустимой для предварительного расчета погрешностью (15 – 30 %) достаточно просто определить модуль поперечной упругости.

Рассмотрим модель однонаправленного слоя под действием поперечного напряжения  $\sigma_2$  (рис. 3.7).

Деформация однонаправленного слоя в поперечном направлении складывается из деформации волокон и матрицы:

$$\varepsilon_2 \cdot a = \varepsilon_B \cdot a_B + \varepsilon_M \cdot a_M \cdot$$

Разделим левую и правую части на  $a$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_B \cdot \psi + \varepsilon_M \cdot (1 - \psi) \cdot \quad (3.8)$$

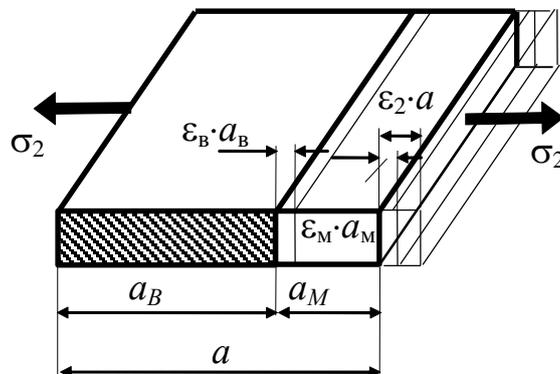


Рис. 3.7. Расчетная схема однонаправленного слоя для определения поперечного модуля упругости

Учтем, что при поперечном растяжении модели

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}; \quad \varepsilon_{\varepsilon 2} = \frac{\sigma_{\varepsilon 2}}{E_{\varepsilon}}; \quad \varepsilon_{m2} = \frac{\sigma_{m2}}{E_m} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = \sigma_{\varepsilon 2} = \sigma_{m2}. \quad (3.9)$$

Здесь  $E_2$  – модуль упругости однонаправленного слоя в поперечном направлении. Подставляя (3.9) в (3.8), получим

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\psi}{E_{\varepsilon}} + \frac{1-\psi}{E_m}. \quad (3.10)$$

Для полимерных волокнистых композитных материалов, как правило,  $E_{\varepsilon} \gg E_m$ , поэтому первым слагаемым в (3.10) можно пренебречь, и выражение (3.10) принимает вид  $E_2 \cong \frac{E_m}{1-\psi}$ . Из этого выра-

жения видно, что поперечный модуль упругости однонаправленного слоя больше модуля упругости матрицы.

Для определения модуля сдвига  $G_{12}$  в плоскости 1,2 рассмотрим модель однонаправленного слоя при действии касательных напряжений  $\tau_{12}$  (рис. 3.8).

Сдвиговые деформации модели складываются из деформации частей, занятых волокнами и матрицей:

$$\gamma_{12} \cdot a = \gamma_{\varepsilon} \cdot a_{\varepsilon} + \gamma_m \cdot a_m, \quad (3.11)$$

где

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \quad \gamma_{\varepsilon} = \frac{\tau_{12}}{G_{\varepsilon}}, \quad \gamma_m = \frac{\tau_{12}}{G_m}. \quad (3.12)$$

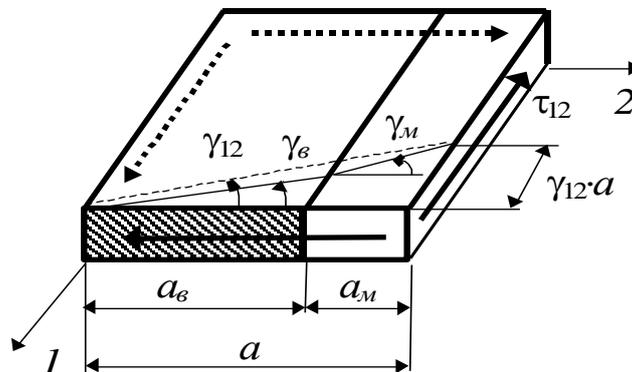


Рис. 3.8. Расчетная схема однонаправленного слоя для определения продольного модуля сдвига

Подставим (3.12) в (3.11) и разделим на  $a$ . Получим

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\psi}{G_c} + \frac{1-\psi}{G_m}. \quad (3.13)$$

## ПРИМЕР

Однонаправленный слой композита состоит из стекловолокон с коэффициентом армирования  $\psi = 0,6$  и эпоксидной матрицы. Определить упругие характеристики однонаправленного слоя: продольный модуль упругости  $E_1$ , поперечный модуль  $E_2$ , модуль сдвига  $G_{12}$ , коэффициент Пуассона  $\nu_{21}$  и  $\nu_{12}$ .

Механические характеристики стекловолокон

Модуль упругости	$E_c = 70 \cdot 10^3$ МПа
Модуль сдвига	$G_c = 40 \cdot 10^3$ МПа
Коэффициент Пуассона	$\nu_c = 0,22$
Предельные удлинения при растяжении	$\bar{\epsilon}_c^+ \approx 3$ %

Механические характеристики эпоксидной матрицы

Модуль упругости	$E_m = 4 \cdot 10^3$ МПа
Модуль сдвига	$G_m = 2,2 \cdot 10^3$ МПа
Коэффициент Пуассона	$\nu_m = 0,34$
Предельное удлинение при растяжении	$\bar{\epsilon}_m^+ \approx 4 \div 6$ %

### Решение

Модуль упругости при растяжении однонаправленного слоя вдоль волокон определяется по формуле

$$E_1 = E_c \psi + E_m (1 - \psi).$$

Подставив значения упругих свойств компонент, получим

$$E_1 = 70 \cdot 10^3 \cdot 0,6 + 4 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,6) = 43,6 \cdot 10^3 \text{ МПа}.$$

Поперечный модуль упругости

$$E_2 = \frac{E_c \cdot E_m}{E_c \cdot (1 - \psi) + E_m \cdot \psi},$$

$$E_2 = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^3}{70 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,6) + 4 \cdot 10^3 \cdot 0,6} = 9,2 \cdot 10^3 \text{ МПа.}$$

Модуль сдвига

$$G_{12} = \frac{G_c \cdot G_m}{G_c \cdot (1 - \psi) + G_m \psi},$$

$$G_{12} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,6) + 2,2 \cdot 10^3 \cdot 0,6} = 3 \cdot 10^3 \text{ МПа.}$$

Коэффициент Пуассона

$$\nu_{12} = \nu_c \psi + \nu_m (1 - \psi),$$

$$\nu_{12} = 0,22 \cdot 0,6 + 0,34 \cdot (1 - 0,6) = 0,27.$$

Коэффициент  $\nu_{12}$  Пуассона определяется из условия ортотропности (наличия трех плоскостей упругой симметрии)

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1},$$

откуда

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{E_1}, \quad \nu_{21} = \frac{0,27 \cdot 9,2 \cdot 10^3}{43,6 \cdot 10^3} = 0,06.$$

## 3.2. Прочность однонаправленного слоя

**3.2.1. Механические свойства однонаправленного слоя. Влияние поверхности раздела на структурную целостность и прочность композита.** Определение эффективных упругих характеристик однонаправленного слоя по известным упругим свойствам армирующих волокон и матрицы является необходимым условием проектирования слоистого композита с заданными упругими свойствами.

Не менее важно при проектировании композита предсказание прочности однонаправленного слоя при различных видах нагружения

по известным деформационным и прочностным свойствам компонент и адгезионной связи на границе волокно-матрица.

Идеализированный слой можно представить в виде волокон, равномерно распределенных в полимерной (металлической) матрице (рис. 3.9).

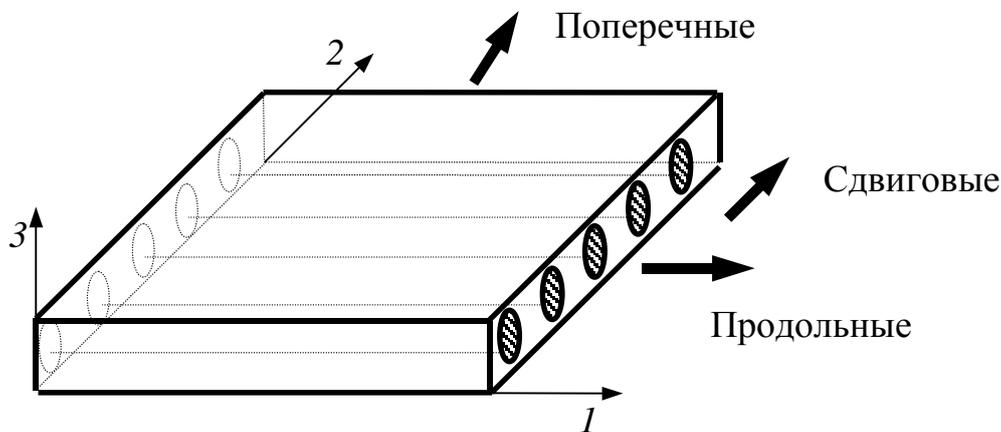


Рис. 3.9. Однонаправленный слой и направление его нагружения (1, 2, 3 – оси координат)

Представленный на рис. 3.9 однонаправленный слой имеет место для волокон большого диаметра, таких, как волокон бора, металлических волокон и др.

Для большинства композитов отдельный слой состоит из нитей, погруженных в соответствующую матрицу. В свою очередь нить состоит из десятков и сотен волокон.

На рис. 3.10 изображена микрофотография поперечного сечения слоя "углеродные волокна-смола". Наглядно видно, что по толщине слоя содержатся несколько волокон. Расположение волокон неравномерное, случайное. В дальнейшем изложении мы будем придерживаться расположения волокон, изображенных на рис. 3.9.

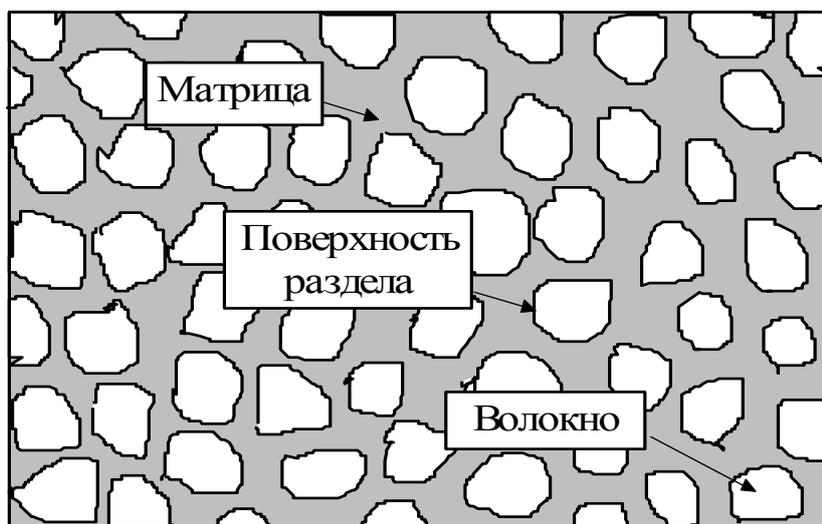


Рис. 3.10. Микрофотография поперечного сечения слоя: графитовые волокна – эпоксидная смола (увеличение  $\times 1000$ ) [15]

Однонаправленный слой обладает тремя плоскостями упругой симметрии [20, 43]. Более подробно упругая симметрия рассмотрена ниже.

Плоскости симметрии связаны с осями 1,2 и 3, как показано на рис. 3.9, которые называются главными осями материала. В дальнейшем мы будем рассматривать прочность однонаправленного слоя при растяжении, сжатии вдоль направления 1 и 2 и сдвиге в плоскости 1-2, межслойном сдвиге в плоскости 1-3.

Для прогнозирования несущей способности слоя очень важно знать характер деформирования его перед разрушением при различных видах нагружения. На рис. 3.11–3.13 представлены диаграммы деформирования некоторых волокнистых композитов. Кривые деформирования показывают, что:

- продольное растяжение линейно до разрушения;
- продольное сжатие обладает слабой нелинейностью;
- поперечное растяжение почти линейно до разрушения;
- поперечное сжатие и внутрислойный сдвиг обнаруживают существенную нелинейность и относительно большую деформацию до разрушения.

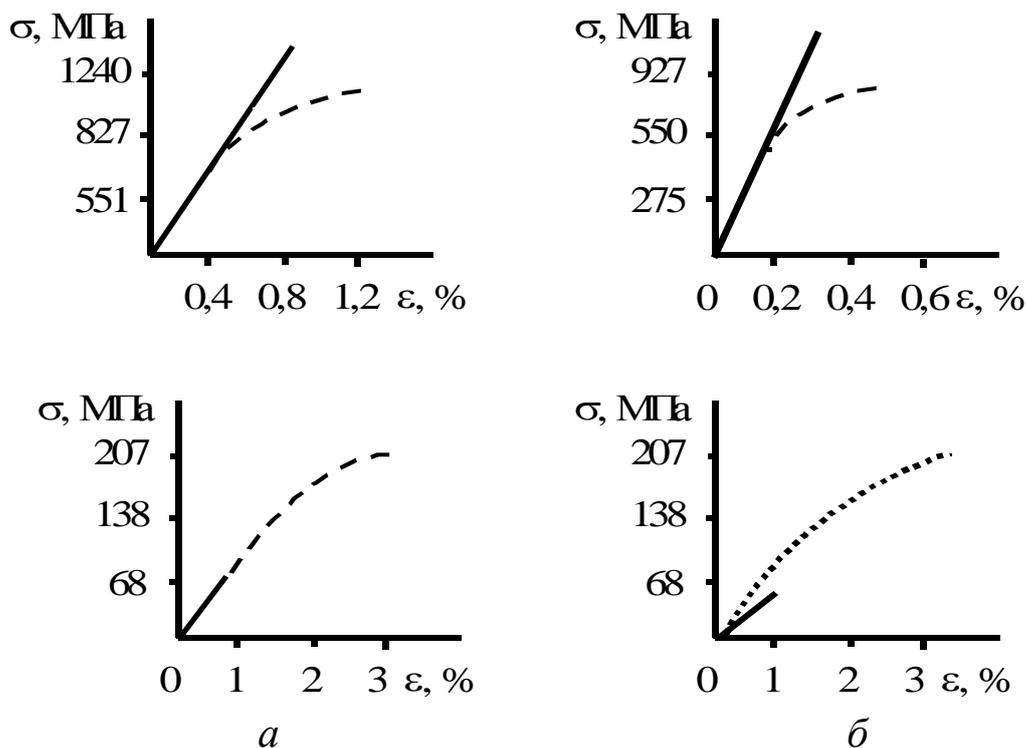


Рис. 3.11. Диаграммы деформирования однонаправленных углепластиков при нагружениях в плоскости слоя [22]:

*a* – высокопрочные углеволокна – эпоксидная смола; *б* – высокомодульные углеволокна – эпоксидная смола; сплошные линии – растяжение; пунктирные линии – сжатие [22]; верхние рисунки относятся к продольному растяжению и сжатию, а нижние – к поперечным

Необходимо отметить, что диаграмма продольного растяжения определяется практически только свойствами волокон, в то время как вид остальных диаграмм существенно зависит от матрицы.

### **Механизм передачи нагрузки через поверхность раздела. Роль влияния поверхности раздела на структурную целостность и прочность композитов**

Поверхность раздела включает в себя поверхность контакта волокна и матрицы и область матрицы, непосредственно примыкающую к границе контакта. Природа адгезии матрицы и наполнителя очень сложна и определяется тремя типами связей: химическими, электрическими и механическими. Но независимо от природы адгезии передача усилий от матрицы к волокну происходит под влиянием механических факторов.

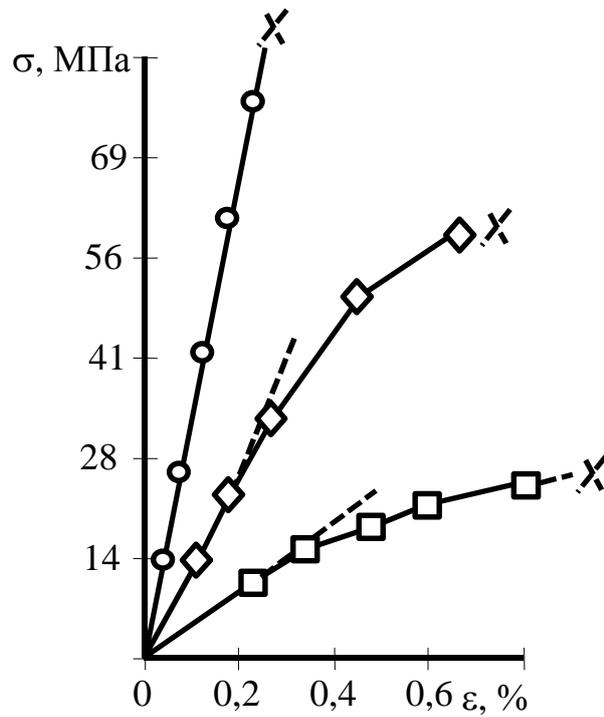


Рис. 3.12. Кривые напряжение – деформация для слоя стеклопластика ( $E$  – стекло,  $\psi \approx 0,6$ ) [22]: x – разрушение; — продольное растяжение;  $\diamond$  – поперечное растяжение;  $\square$  – сдвиг; ---- – начальный наклон диаграмм

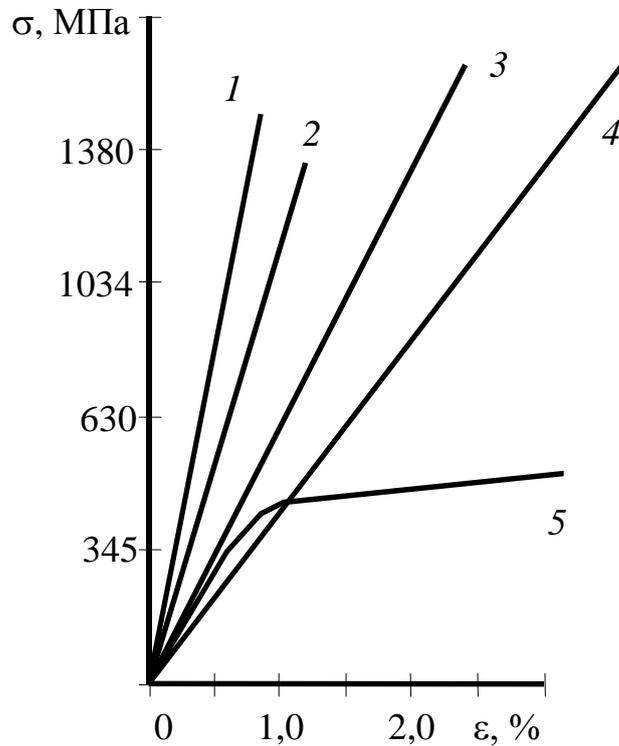


Рис. 3.13. Сравнение диаграмм деформирования при растяжении волокнистых однонаправленных композитов с эпоксидной матрицей [22]:

1 – боропластик; 2 – углепластик; 3 – органопластик;  
4 – стеклопластик; 5 – алюминиевый сплав

В [23] предлагается следующее определение поверхности разде-

ла:

*Поверхность раздела* – это область значительного изменения химического состава композита, обеспечивающая связь матрицы и упрочнителя, необходимую для передачи нагрузки между составляющими композита. Термин "значительное изменение химического состава" относится больше к композитам с металлической матрицей.

Физико-химические явления, происходящие на границе волокно-матрица для металлических и полимерных матриц, имеют существенные различия, которые определяются их физической и химической природой взаимодействия.

Поэтому особенности физико-химического и механического взаимодействия на границе волокно-матрица в композитах на металлической и полимерной матрицах желательно рассмотреть отдельно.

### **Роль поверхности раздела в композитных материалах с металлической матрицей [23]**

Специфическая природа поверхности раздела в волокнистых композитах и особые виды физико-химического и механического взаимодействия на границе волокно-матрица являются важнейшими факторами, обеспечивающими высокие свойства волокнистых композитов. Волокнистые композиты характеризуются высокой степенью направленности поверхностей раздела. Например, в композите объемом  $16,4 \text{ см}^3$ , содержащем 50 % по объему волокна диаметром 7,6 мкм, площадь поверхности раздела равна примерно  $41936 \text{ см}^2$ . Это еще раз подчеркивает особую роль поверхности раздела в структурной целостности композита.

Поверхность раздела непосредственно участвует в передаче внешней нагрузки к поверхностям композита. Внешнее нагружение передается от поверхности, к которой оно приложено, к прилежащему слою материала посредством сдвига. Этот слой материала, в свою очередь, передает таким же образом нагрузку далее вглубь композита (рис. 3.14).

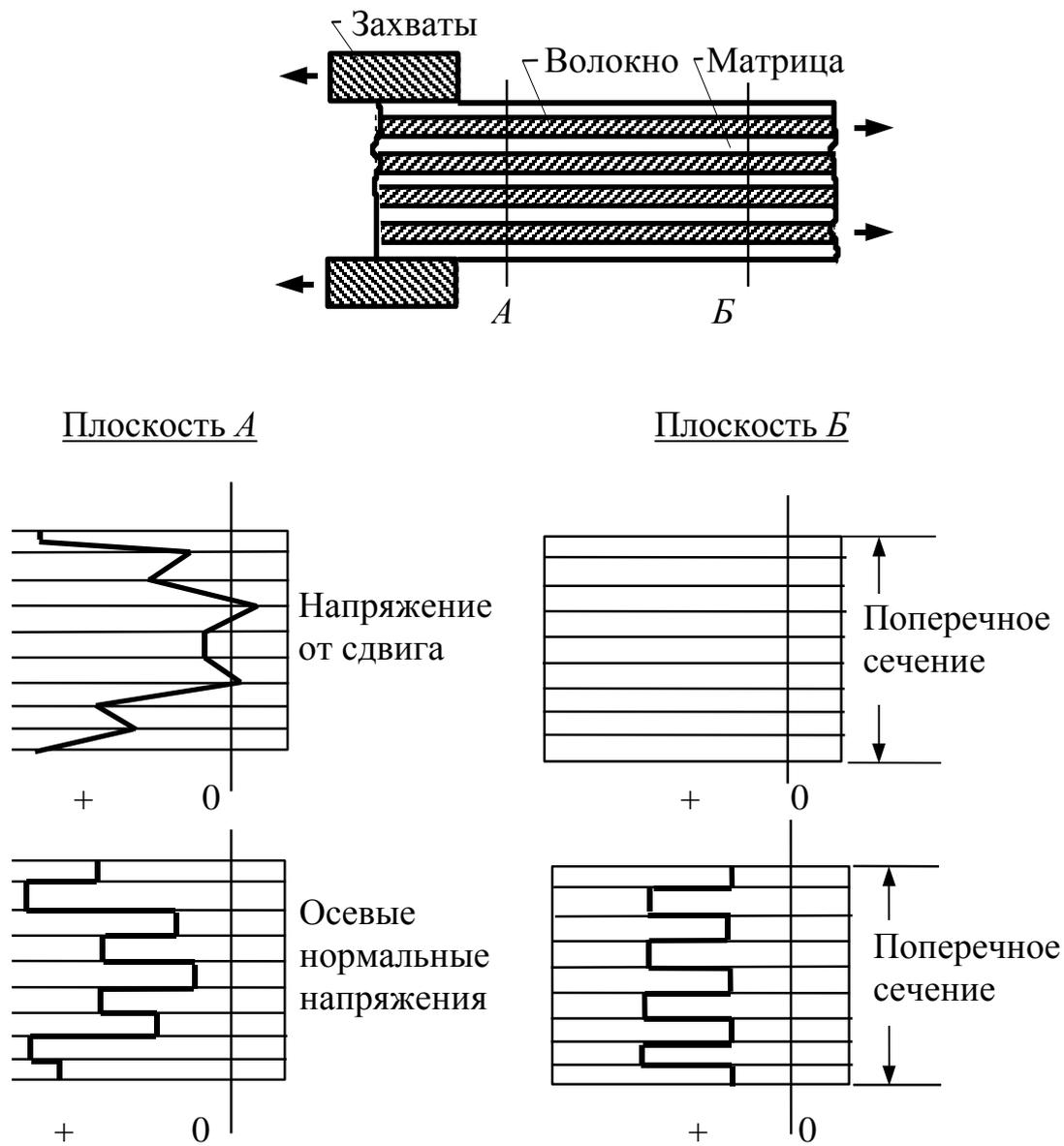


Рис. 3.14. Сдвиговой характер внешнего нагружения волокнистого композита [23]

Неравномерность сдвиговых и осевых напряжений по поперечному сечению имеет место в местах приложения внешних нагрузок и в непосредственной близости. На некотором удалении от мест приложения напряжения выравниваются. Тем не менее, из-за различия уровней напряжений в компонентах (из-за различия их упругих постоянных) появляются поперечные напряжения между компонентами. Их знак и величина зависят от свойств компонентов, объемной доли упрочнителя, величины приложенной нагрузки, геометрических

факторов. На поверхности раздела волокно-матрица и в непосредственной близости возникает сложное напряженное состояние.

На рис. 3.15 представлены схема волокнистого композита при гексагональном расположении волокон и напряженное состояние элемента матрицы, граничащего с поверхностью раздела.

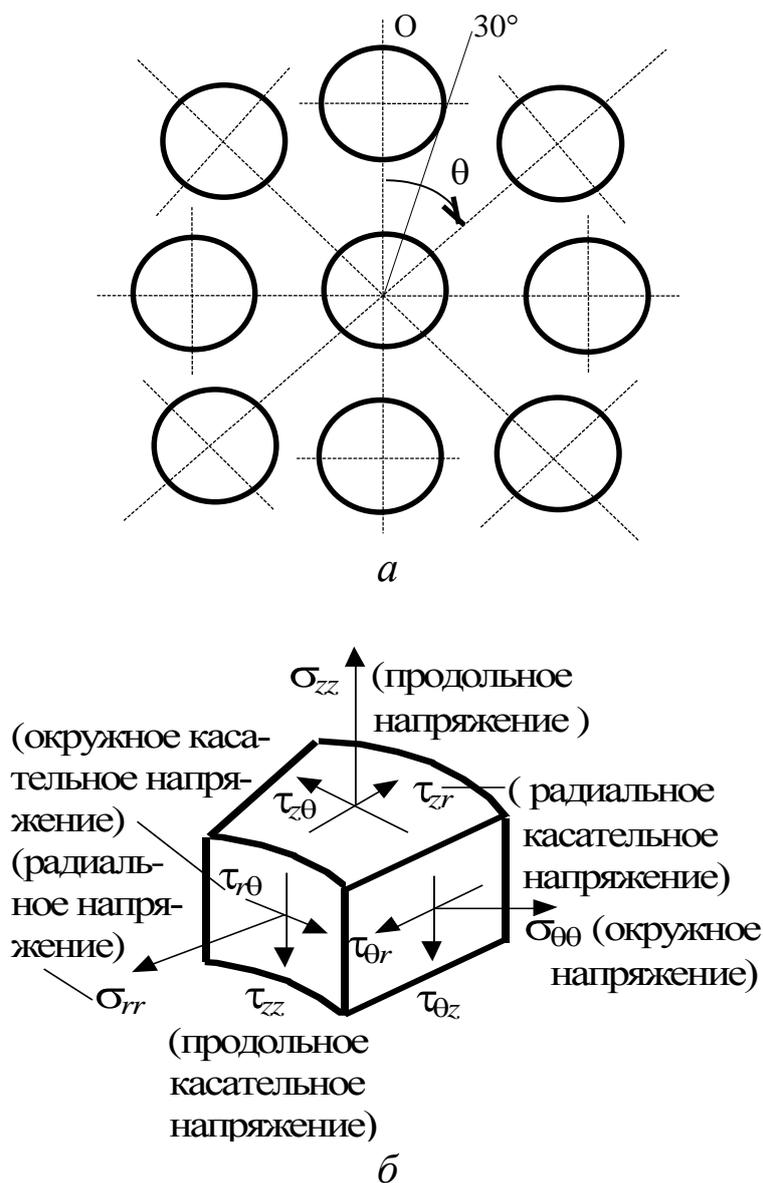


Рис. 3.15. Схема волокнистого композита [24]:

*a* – гексагональное расположение волокон; *б* – напряженное состояние элемента матрицы на поверхности раздела;  $\sigma_{rr}$  – радиальные нормальные напряжения;  $\sigma_{\theta\theta}$  – окружные нормальные напряжения;  $\sigma_{zz}$  – продольные нормальные напряжения;  $\tau_{r\theta}$  – окружные касательные напряжения;  $\tau_{zr}$  – радиальные касательные напряжения;  $\tau_{zz}$  – продольные касательные напряжения

Механические свойства композита зависят от степени совер-

шенства связи на поверхности раздела между компонентами композита. Непрерывность всех поверхностей раздела и равномерность их прочности являются важными факторами, позволяющими поверхностям раздела выполнять свою основную задачу обеспечения структурной целостности композита.

При проектировании композита стремятся к совершенной связи между компонентами композита. Но эта совершенная связь не должна приводить к образованию химических соединений на поверхностях раздела, к диффузии компонентов композита, к их взаимному растворению.

Металлическая матрица в композитах должна иметь малую плотность и высокую пластичность. Как правило, такие матрицы склонны к образованию химических соединений с волокнами бора, карбида кремния, углеродными волокнами. Образующиеся при этом химические соединения, часто интерметаллические по природе, отличаются хрупкостью и малой прочностью. Подобные химические соединения снижают адгезионную прочность поверхности раздела и существенно снижают ее способность распределять нагрузку и сопротивляться разрушению в условиях сложного напряженного состояния.

Помимо снижения адгезионной прочности поверхности раздела, химическое взаимодействие компонентов приводит к ухудшению основных свойств упрочнителя. На поверхности упрочнителя появляются неровности, нерегулярности в геометрии, которые существенно снижают первоначальную прочность упрочнителя и в целом композитного материала. Химическое взаимодействие матрицы и армирующего материала может сопровождаться их диффузией, что приводит к разупрочнению упрочнителя и уменьшению пластичности матрицы. Для уменьшения химического взаимодействия компонентов волокна упрочнителя покрывают барьерным слоем, который заметно снижает скорость реакций между волокном и матрицей. Для композиционных материалов на основе борных волокон и алюминиевой матрицы в качестве барьерных слоев используются **покрытия карбидом кремния или нитридом бора**. Тем не менее, исключить полностью химическое взаимодействие и диффузию через поверхность раздела при длительном взаимодействии умеренных температур не удается.

В волокнистых композитах с полимерными матрицами скорости химического взаимодействия компонентов несравнимо меньше, чем у

композитов с металлическими матрицами.

Компоненты композитов на основе неорганических волокон и различных смол имеют низкую реакционную и диффузионную способность. Связь между ними образуется в основном при механическом сцеплении при наличии шероховатости волокон и трения между волокнами и матрицей. Определенный вклад в адгезионную прочность на границе раздела могут вносить силы Вандер-Вальса.

**3.2.2. Особенности разрушения композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами.** Характер разрушения армированных пластиков определяется свойствами армирующей и матричной фаз и их взаимодействием на границе раздела. Предельные деформации волокон и матрицы могут отличаться в несколько раз. Компоненты армированных пластиков в связи с этим разрушаются не одновременно. Поэтому учет предельных деформаций матрицы и армирующих волокон при прогнозировании прочности композиционного материала имеет существенное значение. Очень часто причиной начала разрушения может явиться нарушение адгезионной прочности на поверхностях раздела волокон и матрицы. Это имеет место, как правило, в композиционных материалах на полимерной матрице [42]. В таких случаях прочность композиционного материала определяется адгезионной прочностью между матрицей и арматурой.

### **Расслоение**

Еще одним видом разрушения, присущим исключительно слоистым композитам, является расслоение в условиях плоского и объемного напряженного состояния. Это вид разрушения можно наблюдать и при одноосном растяжении плоских образцов со свободными кромками (рис. 3.16). Причиной такого вида разрушения плоских образцов является концентрация межслойных нормальных напряжений  $\sigma_z$  в области, расположенной вдоль свободных кромок, вызванная разли-

чием свойств смежных слоев (коэффициентов Пуассона, термического расширения и др.). Величина межслойных нормальных напряжений связана с последовательностью укладки слоев композита по толщине. Последовательность укладки определяет не только величину межслойных напряжений, но и их знак. Предсказание величины и характера распределения межслойных нормальных напряжений требует применения трехмерного анализа межслойного расслоения.

При комбинированном нагружении композитной конструкции в поперечном сечении последней могут действовать одновременно изгибающий и крутящий моменты, растягивающая (сжимающая) сила, поперечные силы. Каждый силовой фактор вызывает свой вид разрушения композитного материала.

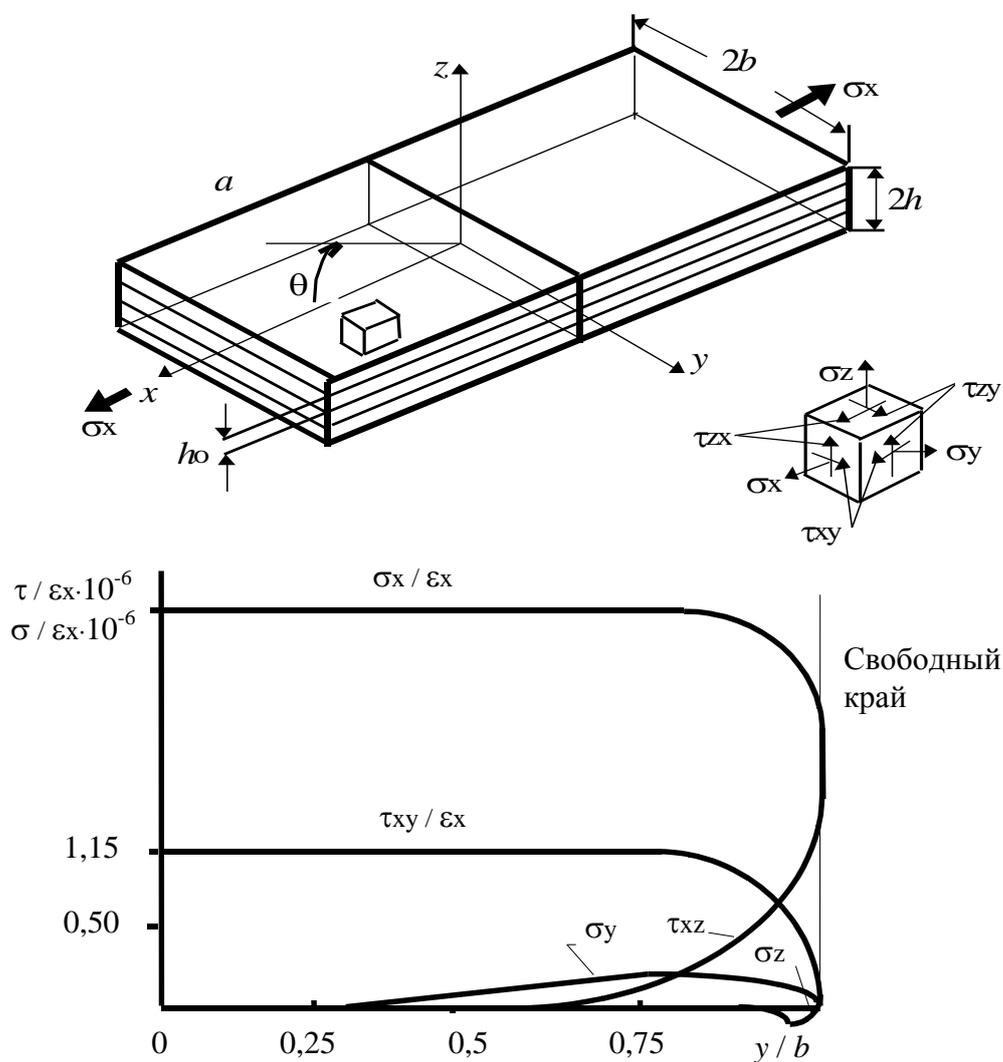


Рис. 3.16. Геометрия слоистого тела и распределение напряжений на границе раздела  $z = h_0$  при  $\theta = 45^\circ$  и  $b = 8h$ ,  $a$  – свободный край

Необходимо также иметь в виду, что вид разрушения в сильной степени зависит от структуры композита и объемного содержания

армирующих волокон. Поэтому для прогнозирования прочности слоистого композита предпочтительнее использовать критерии, которые базируются на анализе напряженного состояния каждого слоя. Данный подход позволит учесть характер разрушения слоя при действии того или иного силового фактора и проследить кинетику разрушения слоистого композита.

Особенностью критериев, которые используются для прогнозирования прочности слоистых пластиков, является то, что они базируются на средних напряжениях и не учитывают структуры материалов. В действительности фактические напряжения в компонентах существенно отличаются количественно и качественно от средних. Как правило, большинство критериев не учитывают концентрацию напряжений в компонентах композита, на межфазных границах волокно-матрица, начальные напряжения в компонентах и др. Если рассматривать простое растяжение композитного материала с точки зрения средних напряжений, то он будет находиться в линейном напряженном состоянии. Фактически при простом растяжении компоненты армированного пластика находятся в плоском или объемном напряженных состояниях, и для оценки их прочности необходимо применять критерии, учитывающие их действительное состояние.

Задача эта очень сложная и выходит за рамки данного пособия. Необходимо также учитывать, что технология изготовления изделий [7] может существенно влиять на упругие и прочностные характеристики композитного материала, поскольку структура реального материала и адгезионная прочность матрицы и волокон, как правило, далеки от тех, которые используются в расчетных моделях для определения упругих характеристик напряженного состояния в компонентах композита.

В связи с этим разработанные критерии, которые основываются на средних напряжениях, целесообразно использовать для ориентировочных оценок и качественного анализа.

Более перспективным путем прогнозирования прочности композита является учет фактической структуры материала, напряженного состояния его компонент (матрицы и волокон) и межслойного слоя.

Теория, базирующаяся на таком подходе, называется структурной теорией прочности. Под структурными напряжениями понимаются напряжения в армирующих волокнах и матрице без учета их микроструктуры. Адгезионное взаимодействие на границе волокон и матрицы считается абсолютным по всей их длине.

Наиболее полно структурная теория прочности изложена в монографии А. М. Скудры и Ф. Я. Булавса “Структурная теория армированных пластиков” [41], к которой по мере необходимости мы будем обращаться.

### 3.2.3. Характеристики прочности и виды разрушения однонаправленного слоя при простых напряженных состояниях.

Прочность однонаправленного слоя при простом напряженном состоянии представляет собой напряжение, при действии которого слой разрушается. Будем понимать под слоем пластину малой толщины по сравнению с ее размерами в плоскости. Для однонаправленного слоя (рис. 3.17) можно выделить пять значений прочности:

$\bar{\sigma}_{11}^+$  – прочность при растяжении вдоль волокон;

$\bar{\sigma}_{11}^-$  – прочность при сжатии вдоль волокон;

$\bar{\sigma}_{22}^+$  – прочность при растяжении поперек волокон;

$\bar{\sigma}_{22}^-$  – прочность при сжатии поперек волокон;

$\tau_{12}(\sigma_{12})$  – прочность при сдвиге в плоскости слоя.

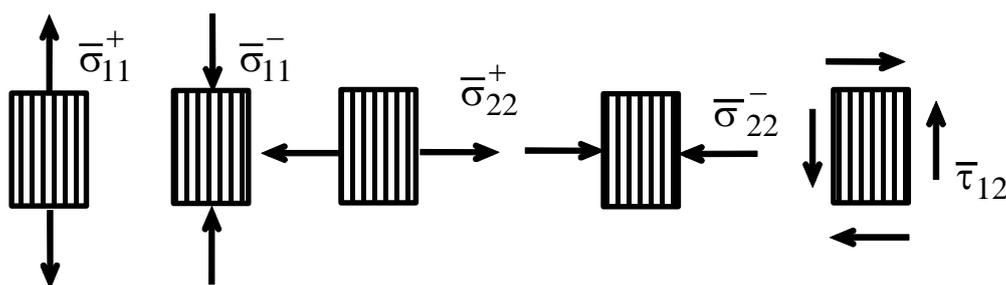


Рис. 3.17. Характеристики прочности однонаправленного слоя

## Виды разрушения слоя

### Растяжение вдоль волокон

Как показали анализы разрушения слоя под действием продольной нагрузки, возможны несколько (три и более) видов разрушения

(рис. 3.18):

а) хрупкий;

б) хрупкий с вытаскиванием волокон;

в) обусловленный сдвигом матрицы между волокнами и нарушением адгезионного взаимодействия волокно-матрица (т.е. появлением расслоения).

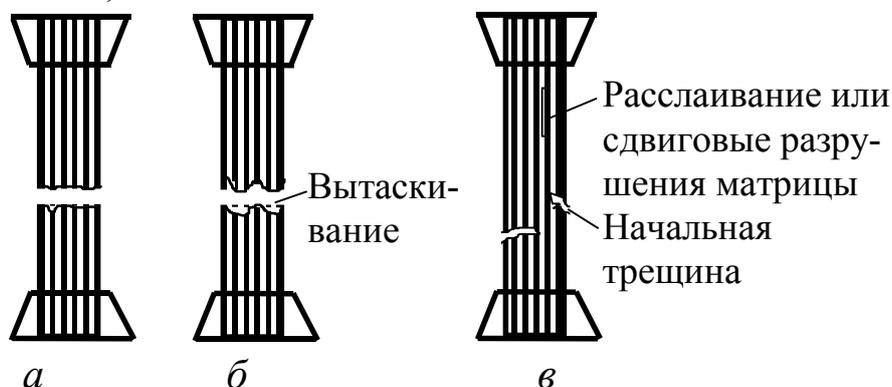


Рис. 3.18. Виды разрушения при продольном растяжении [22]:  
а – хрупкое; б – хрупкое с вытаскиванием волокон;  
в – обусловленное сдвигом матрицы и расслоением

На прочность и вид разрушения слоя влияют большое количество факторов, таких как:

- объемные доли волокон и матрицы;
- размер и число пор;
- распределение волокон;
- упругие и прочностные свойства волокон и матрицы;
- прочность адгезионного взаимодействия на границе волокно-матрица;
- напряженное состояние в слое, вызванное приложенной нагрузкой;
- технологические параметры процесса получения слоя.

При высокой адгезионной прочности между матрицей и волокнами и низком содержании волокон наблюдается хрупкое разрушение. Слои со средним объемным наполнением волокном (40 ÷ 60 %) разрушаются хрупко с вытаскиванием волокон. При высокой объемной доле волокон (более 65 %) слои разрушаются с нарушением связи между волокнами и матрицей с вытаскиванием волокон, расслаиванием. Провести четкие границы между видами разрушения невозможно из-за влияния вышеперечисленных факторов на прочность и вид разрушения.

### *Продольное сжатие*

Разрушение при продольном сжатии может происходить в различных формах, которые показаны на рис. 3.19:

- микровыпучивание волокон при упругом или пластическом состоянии матрицы;
- микровыпучивание волокон после нарушения адгезионной связи между ними и матрицей;
- расслаивание;
- выпучивание слоя;
- сдвиговое разрушение слоя;
- разделение слоев из-за поперечного растяжения в направлении толщины слоя (поперечное расслаивание от растяжения).

Микровыпучивание волокон при упругих напряжениях в матрице возникает в слоях с весьма малой объемной долей волокон. Переход матрицы в пластическое состояние и отслаивание волокон от матрицы возникает, как правило, при объемной доле волокон  $\psi \geq 0,4$ .

Экспериментальные данные по продольному сжатию показывают, что слой не может выдерживать достаточно высокую сжимающую нагрузку, чтобы достигнуть полной прочности. При разрушении слоя от сжимающей нагрузки напряжение в волокнах значительно меньше их ожидаемой прочности на сжатие.

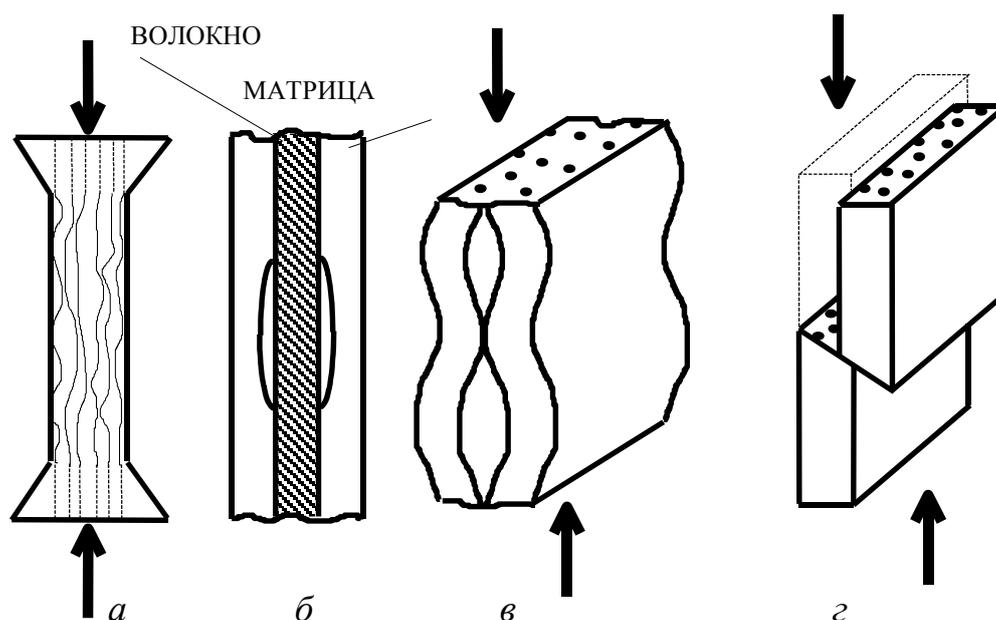


Рис. 3.19. Формы разрушения при продольном сжатии:

$a$  – микровыпучивание;  $b$  – отслаивание волокна от матрицы;  
 $c$  – выпучивание слоя;  $z$  – сдвиговые разрушения

### *Поперечное растяжение*

При поперечном растяжении наблюдаются такие виды разрушения, как разрыв матрицы (рис. 3.20), расслаивание, расщепление волокон и комбинации перечисленных видов разрушения.

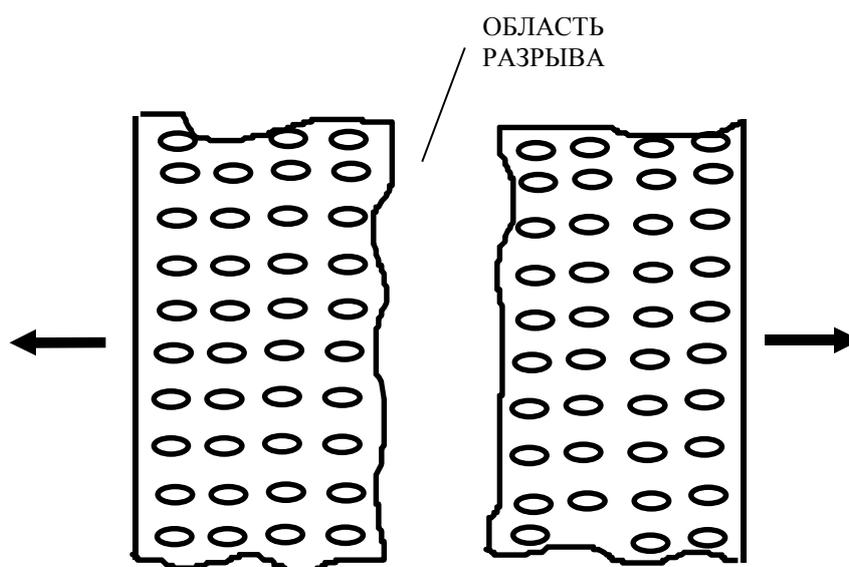


Рис. 3.20. Разрушение при поперечном растяжении

### *Поперечное сжатие*

Под действием поперечных сжимающих напряжений могут осуществляться следующие виды разрушения слоя (рис. 3.21):

- разрушение матрицы от сжатия;
- сдвиговое разрушение матрицы;
- сдвиговое разрушение матрицы, расслаивание и раздавливание волокон.

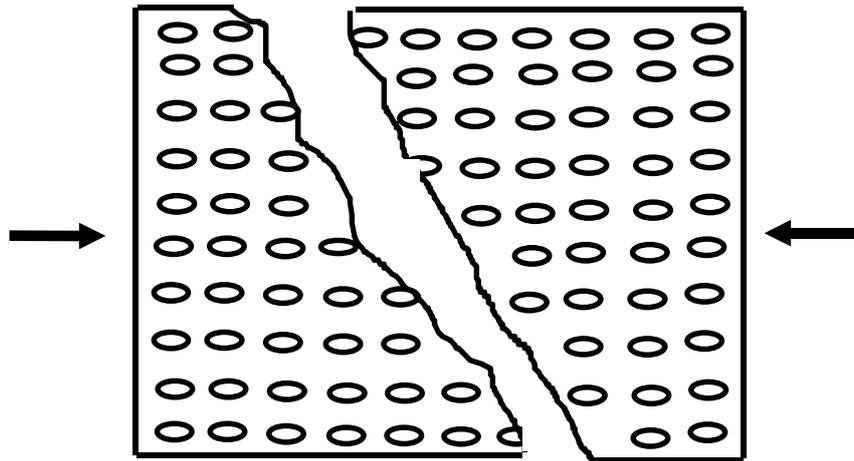


Рис. 3.21. Сдвиговое разрушение матрицы при поперечном сжатии

### *Сдвиг в плоскости слоя*

Действие касательных напряжений в плоскости слоя вызывает следующие виды разрушения слоя (рис. 3.22):

- сдвиговое разрушение матрицы;
- расслаивание;
- сдвиговое разрушение матрицы и расслаивание.

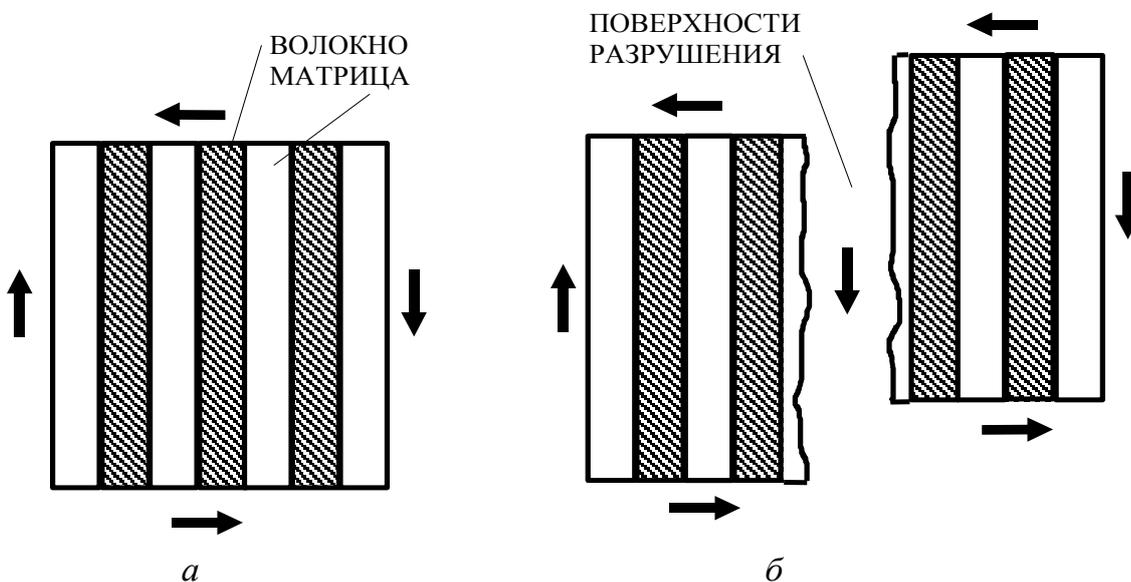


Рис. 3.22. Схема разрушения при сдвиге:  
а – неразрушенный слой; б – разрушенный слой

## **Предсказания прочности однонаправленного слоя при одноосном нагружении**

Прочность однонаправленного слоя является функцией физико-

механических характеристик компонент композита, характеристик процесса изготовления, характеристик взаимодействия армирующей и матричной компонент, а также напряженного состояния в слое, вызванного внешней нагрузкой и технологическими напряжениями, возникающими в процессе изготовления изделия.

Перечислим основные из них:

- объемная доля и распределение волокон;
- объемная доля матрицы;
- наличие, размер и распределение пор;
- упругие и прочностные характеристики волокон и матрицы во всем диапазоне температур изготовления изделий;
- характеристики процесса изготовления изделий (температура, давление при отверждении, продолжительность);
- адгезионное взаимодействие на границе волокно-матрица;
- технологические напряжения в компонентах и на границах;
- напряженное состояние от внешней нагрузки.

Конкретизировать вид функций, влияющих на прочность, задача не из простых, но реализуемых. В дальнейшем используются значительно упрощенные математические модели, которые довольно грубо аппроксимируют предсказание прочности, но позволяют проанализировать вклад основных характеристик компонент композита.

Теоретические методы определения прочности однонаправленного слоя при одноосном нагружении базируются на трех основных методах:

- инженерных методах, базирующихся на гипотезах сопротивления материалов;
- методах классической теории упругости, конечных элементов и механики разрушения;
- статистических методах, учитывающих статистический разброс прочности волокон.

В дальнейшем теоретическое определение прочности при различных видах деформаций будет базироваться на инженерных методах.

Математическая модель метода основана на допущениях, принятых для модели при определении упругих характеристик однонаправленного слоя. Считаем также, что напряженное состояние слоя при любых условиях нагружения считается ограниченным линейной областью его диаграммы напряжение - деформация, т.е. слой обнаруживает линейное поведение до разрушения.

**3.2.4. Прочность слоя при продольном растяжении (сжатии).** На рис. 3.23 представлена модель однонаправленного слоя, нагруженная растягивающим напряжением, направленным вдоль волокон.

Определяющие уравнения выводятся из условия равновесия сил в направлении волокон. Получим

$$\bar{\sigma}_1^+ \cdot A = \bar{\sigma}_\varepsilon^+ \cdot A_\varepsilon + \sigma_m \cdot A_m, \quad (3.14)$$

где  $A$  – площадь сечения однонаправленного слоя,

$A_\varepsilon, A_m$  – площади, занятые соответственно волокнами и матрицей.

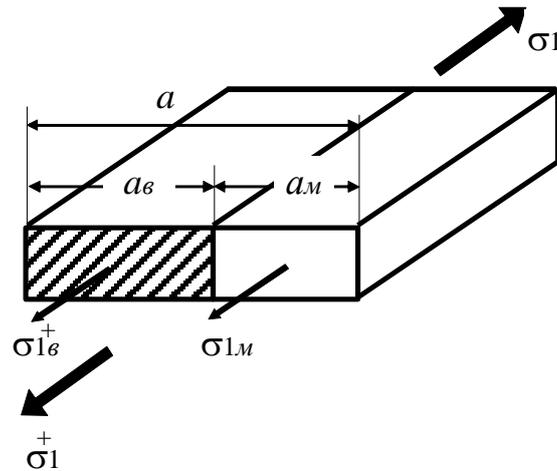


Рис. 3.23. Модель однонаправленного слоя для определения прочности при растяжении

Разделим левую и правую части на площадь сечения однонаправленного слоя  $A$ :

$$\bar{\sigma}_1^+ = \bar{\sigma}_\varepsilon^+ \cdot \psi + \sigma_m \cdot (1 - \psi). \quad (3.15)$$

Считаем, что деформации в компонентах следуют закону Гука, и слой деформируется однородно, т.е.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\varepsilon = \varepsilon_m. \quad (3.16)$$

Полагаем также, что предельное относительное удлинение матрицы больше, чем предельное удлинение волокон

$$\bar{\varepsilon}_m^+ > \bar{\varepsilon}_\varepsilon^+. \quad (3.17)$$

При разрушении однонаправленного слоя при растяжении относительная деформация матрицы равна предельному удлинению волокна  $\bar{\varepsilon}_\varepsilon^+$ .

Согласно (3.16) принимаем  $\sigma_m = E_m \cdot \bar{\varepsilon}_g^+$ .

В результате получим

$$\bar{\sigma}_1^+ = \bar{\sigma}_g^+ \cdot \psi + E_m \cdot \bar{\varepsilon}_g^+ \cdot (1 - \psi). \quad (3.18)$$

Выразим  $\bar{\varepsilon}_g^+$  через закон Гука

$$\bar{\varepsilon}_g^+ = \frac{\bar{\sigma}_g^+}{E_g}.$$

Окончательно получим

$$\bar{\sigma}_1^+ = \bar{\sigma}_g^+ \cdot \left( \psi + \frac{E_m}{E_g} \cdot (1 - \psi) \right). \quad (3.19)$$

В выражениях (3.14)–(3.19) приняты следующие обозначения:

$\bar{\sigma}_1^+$  – разрушающее напряжение в направлении армирования для однонаправленного композита;  $\bar{\sigma}_g^+$  – разрушающее напряжение для пучка волокон;  $\psi$  – объемная доля волокон (коэффициент армирования);  $E_m$ ,  $E_g$  – модули упругости матрицы и армирующего материала соответственно.

Разрушающее напряжение, вычисленное по уравнению (3.19), лишь приближенно характеризует прочность однонаправленного слоя, но оно показывает влияние характеристик компонент, объемного содержания на прочность композита. Тем не менее, уравнение (3.19) широко применяется при проектировании сосудов давления, изготавливаемых намоткой волокон.

### *Прочность слоя при продольном сжатии*

Вывод уравнения прочности слоя при сжатии подобен выводу уравнения при растяжении и имеет вид, аналогичный вышерассмотренному. Когда прочность композита на сжатие определяется волокнами, уравнение имеет вид

$$\bar{\sigma}_1^- = \bar{\sigma}_{1g}^- \cdot \left( \psi + \frac{E_m}{E_g} \cdot (1 - \psi) \right), \quad \bar{\varepsilon}_{1g}^- < \bar{\varepsilon}_{1m}^-, \quad (3.20)$$

а когда определяется прочностью матрицы,

$$\bar{\sigma}_1^- = \bar{\sigma}_{1.M}^- \cdot \left( (1 - \psi) + \frac{E_g}{E_M} \cdot \psi \right), \quad \bar{\varepsilon}_{1g}^- > \bar{\varepsilon}_{1.M}^- \quad (3.21)$$

Здесь  $\bar{\sigma}_1^-$  – прочность однонаправленного слоя при сжатии вдоль волокон;  $\bar{\sigma}_{1g}^-$ ,  $\bar{\sigma}_{1.M}^-$  – прочности волокон и матрицы при сжатии соответственно;  $\bar{\varepsilon}_{1g}^-$ ,  $\bar{\varepsilon}_{1.M}^-$  – предельные деформации разрушения при сжатии соответственно волокон и матрицы.

Уравнения (3.20) и (3.21) дают довольно грубую оценку прочности слоя при продольном сжатии. Однако некоторые экспериментальные данные на углепластиках с эпоксидной матрицей показывают, что уравнение (3.20) может предсказывать результаты в разумных пределах [22].

**3.2.5. Прочность слоя при поперечном растяжении, сжатии и внутрислойном сдвиге.** Для предсказания прочностей однонаправленного слоя при поперечном растяжении  $\bar{\sigma}_2^+$ , сжатии  $\bar{\sigma}_2^-$  и внутрислойном сдвиге  $\bar{\tau}_{12}$  предложено два метода:

1. Метод, опирающийся на допущения сопротивления материалов, в котором считается, что прочности слоя  $\bar{\sigma}_2^+$ ,  $\bar{\sigma}_2^-$  и  $\bar{\tau}_{12}$  определяются прочностью наиболее слабого звена в композите. Слабым звеном может быть матрица, когда ее прочность меньше прочности сцепления и меньше поперечной прочности. Слабым звеном может быть прочность сцепления волокна и матрицы, когда прочность сцепления меньше прочности матрицы и волокна.

Часто используется подход, в котором считается, что прочность слоя определяется соответствующими прочностями матрицы, уменьшенными с учетом коэффициентов концентрации напряжений либо коэффициентов концентрации деформаций.

2. Метод, предполагающий, что прочность слоя определяется наиболее опасным напряженно-деформированным состоянием в точке матрицы или волокна, согласно одному из критериев разрушения [55]. Наибольшие напряжения и деформации в точке матрицы или волокна находятся на основе методов теории упругости или развитых в настоящее время вычислительных методов конечных элементов.

Рассмотрим подходы, опирающиеся на модели сопротивления материалов. Эти модели основаны на следующих допущениях:

- идеальная связь между компонентами;
- равномерное упорядоченное расположение волокон;
- линейные соотношения напряжение-деформация для обоих компонентов;
- совпадение свойств компонентов в композите со свойствами, определенными на отдельных макрообразцах;
- пренебрежение остаточными напряжениями;
- равенство упругих характеристик при растяжении, сжатии.

На рис. 3.24 представлена модель поперечного нагружения периодически повторяющегося элемента равномерно распределенным напряжением  $\sigma_2$ .

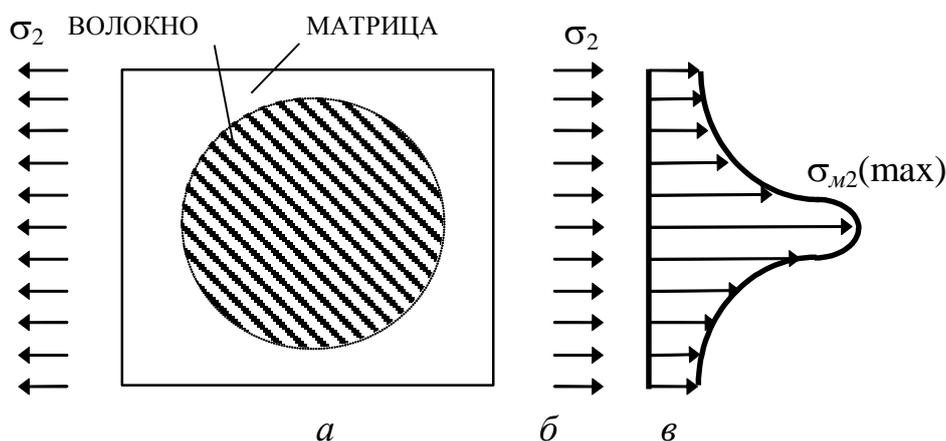


Рис. 3.24. Модель поперечного нагружения периодически повторяющегося элемента (а) равномерно распределенным напряжением (б)

На этом же рисунке показана эпюра распределения напряжений в матрице с учетом концентрации напряжений (в).

Уравнение для максимального коэффициента концентрации напряжений  $K_{22}$  в матрице имеет вид [13]

$$K_{22} = \frac{\sigma_{м2}(\max)}{\sigma_2} = \frac{1 - \psi \cdot (1 - E_m / E_{г2})}{1 - (4 \cdot \psi / \pi)^{1/2} \cdot (1 - E_m / E_{г2})} \quad (3.22)$$

На рис. 3.25 дано графическое представление уравнения (3.22) для композита с  $E_{г2} \gg E_m$ .

Прочность однонаправленного слоя при поперечном растяжении  $\bar{\sigma}_2^+$  получается из уравнения (3.22), если принять

$$\sigma_{m2(\max)} = \bar{\sigma}_m^+, \quad (3.23)$$

$$\bar{\sigma}_2^+ = \bar{\sigma}_m^+ / K_{22},$$

где  $\bar{\sigma}_m^+$  - предел прочности матрицы на растяжении, а  $K_{22}$  находится из уравнения (3.22) или по рис. (3.25).

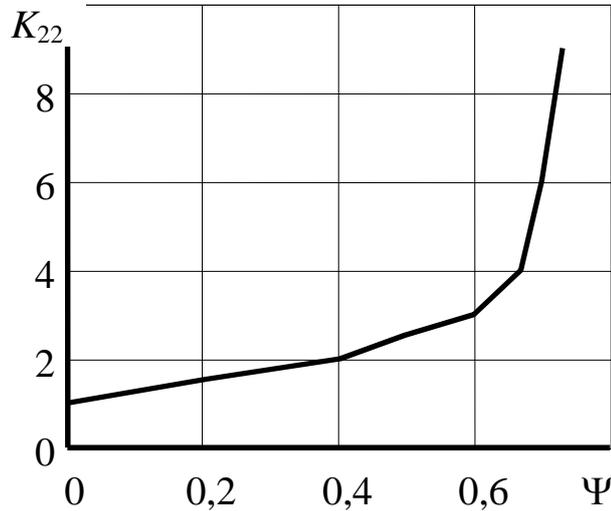


Рис. 3.25. Коэффициенты концентрации напряжений при поперечном нагружении ( $E_{\sigma 2} \gg E_M$ )

Аналогично определяется прочность слоя при поперечном сжатии  $\bar{\sigma}_2^-$ :

$$\bar{\sigma}_2^- = \bar{\sigma}_m^- / K_{22}, \quad (3.24)$$

где  $\bar{\sigma}_m^-$  - предел прочности матрицы на сжатие, а  $K_{22}$  находится из (3.22).

Выражение для коэффициента концентрации напряжений для внутрислойной сдвиговой прочности имеет вид уравнения (3.22) и получается простой заменой в (3.22) цифровых индексов 2 на 12,  $E$  на  $G$  и  $\sigma$  на  $\tau$ .

$$K_{12} = \frac{\tau_{m12(\max)}}{\tau_{12}} = \frac{1 - \psi \cdot (1 - G_{m12} / G_{\sigma 12})}{1 - (4 \cdot \psi / \pi)^{1/2} \cdot (1 - G_{m12} / G_{\sigma 12})}. \quad (3.25)$$

Прочность слоя при внутрислойном сдвиге определяется выражением

$$\bar{\tau}_{12} = \bar{\tau}_m / K_{12},$$

где  $\bar{\tau}_m$  – предел прочности на сдвиг матрицы.

Коэффициент  $K_{12}$  можно определить по рисунку, если  $G_{e12} \gg G_{m12}$ .

## ПРИМЕР

Определить прочность при растяжении и сжатии вдоль волокон однонаправленного слоя, состоящего из стеклянных волокон диаметром 15 мкм и эпоксидной матрицы.

Механические свойства волокон

Предел прочности при растяжении вдоль волокон	$\bar{\sigma}_e^+ = 2200$ МПа
Модуль упругости	$E_e = 70 \cdot 10^3$ МПа
Коэффициент армирования	$\psi = 0,6$
<b>Предельное относительное удлинение при растяжении</b>	$\bar{\epsilon}_e^+ = 2$ %
Предельное относительное удлинение при сжатии	$\bar{\epsilon}_e^- = 1,7$ %

Механические свойства матрицы

Модуль упругости	$E_m = 3,5 \cdot 10^3$ МПа
Предельное относительное удлинение	$\bar{\epsilon}_m^+ = 4,5$ %

## Решение

Из исходных данных видим, что предельное удлинение матрицы больше предельного удлинения волокна. Следовательно, прочность однонаправленного композита будет определяться прочностью волокон, так как первыми будут разрушаться волокна.

Определяющее уравнение для этого случая, выведенное из условия равновесия сил в направлении укладки волокон и из допущения однородности деформации в направлении действия нагрузки  $\epsilon_1 = \epsilon_{e1} = \epsilon_{m1}$ , имеет вид

$$\bar{\sigma}_1^+ = \bar{\sigma}_{1e}^+ \cdot \left[ \psi + \frac{E_m}{E_e} (1 - \psi) \right].$$

Подставляя исходные данные, получим

$$\bar{\sigma}_1^+ = 2200 \cdot \left[ 0,6 + \frac{3,5 \cdot 10^3}{70 \cdot 10^3} (1 - 0,6) \right] = 1364 \text{ МПа.}$$

Еще раз обращаем внимание на то, что напряжение в матрице в момент разрушения волокна определяется предельной деформацией волокна и равно  $\sigma_m = \bar{\varepsilon}_e^+ \cdot E_m$ .

Определение прочности однонаправленного слоя в направлении армирования на сжатие зависит от того, что явилось причиной разрушения: разрушение волокон, разрушение связующего, нарушение прочности сцепления волокна и матрицы либо их сочетание.

Подробно о прочности при сжатии рассмотрено в [25]. В этом пособии рассмотрим случай, когда причиной разрушения однонаправленного слоя явилось разрушение волокон на сжатие.

Используя подход, рассмотренный при определении прочности при растяжении, прочность при сжатии определяем по формуле

$$\bar{\sigma}_1^- = [E_e \cdot \psi + E_m (1 - \psi)] \cdot \bar{\varepsilon}_e^- ,$$

где  $\bar{\varepsilon}_e^-$  – предельная деформация волокон при сжатии.

В первом приближении можно принять, что  $\bar{\varepsilon}_e^-$  равняется предельной деформации однонаправленного пластика при сжатии. Предполагается также, что армированный пластик деформируется линейно вплоть до разрушения.

Подставляя исходные данные, получим

$$\bar{\sigma}_1^- = [70 \cdot 10^3 \cdot 0,6 + 3,5 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,6)] \cdot 0,017 = 0,74 \cdot 10^3 \text{ МПа.}$$

Обращаем внимание также на то, что вычисленная прочность однонаправленного слоя получена в предположении абсолютной адгезии волокон к матрице, их абсолютной прямолинейности, параллельности и равномерного распределения в матрице. Считается также, что поры в однонаправленном композите отсутствуют. Реальная прочность будет отличаться от вычисленной в связи с тем, что удовлетворить всем принятым предпосылкам на практике практически не возможно. Величина расхождения расчетной и реальной прочности будет зависеть от степени их удовлетворения.

**3.2.6. Прочность однонаправленного слоя при плоском напряженном состоянии [41, 43, 55]. Введение.** Оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) элемента конструкции из изотропных материалов при действии кратковременных нагрузок производят путем сравнения эквивалентных напряжений (определенных по выбранной гипотезе прочности) с предельными для материала конструкции. В качестве предельного напряжения используют либо предел текучести для пластичного материала, либо предел прочности для хрупкого материала, либо нагрузку, при которой происходит потеря устойчивости. Предельные напряжения для изотропных материалов одинаковы во всех направлениях.

При наступлении предельного состояния происходит потеря несущей способности элемента конструкции. Под потерей несущей способности понимается невозможность рассматриваемого элемента выполнять функции, для которых он проектировался. При таком определении потеря несущей способности может означать либо разрушение материала (как правило, хрупкого), либо появление недопускаемых деформаций (перемещений), потерю устойчивости. Для оценки опасности потери несущей способности элементов из изотропных материалов существует целый ряд критериев прочности, жесткости (появление недопускаемых деформаций), устойчивости.

Оценка прочности элементов конструкций из слоистых композиционных материалов, состоящих из совокупности однонаправленных слоев, существенно отличается от оценки прочности конструкций из изотропных материалов.

Это отличие заключается в следующем: во-первых – потеря несущей способности композитной конструкции может происходить не только от разрушения, появления недопустимых деформаций, потери устойчивости, но и от потери сплошности материала (в том числе локальной), от растрескивания матрицы, появления недопустимых видов деформаций (например, появление кручения при изгибе или растяжении) и др.

Существенной особенностью оценки несущей способности композитных конструкций является послойный анализ напряженно-деформированного состояния элемента композитной конструкции, который заключается в анализе НДС каждого слоя. Забегая вперед, можно сказать, что разрушение в наиболее нагруженном слое матрицы, либо отслоение матрицы от волокон, отслоение слоя не приводят

к потере несущей способности элемента. Напротив, нагрузка, вызвавшая разрушение волокон в каком-либо слое элемента, считается предельной для всего элемента.

Поэтому, для оценки несущей способности оставшихся неповрежденных слоев необходимо определить упругие и прочностные свойства слоистого композита с учетом разрушенного слоя и затем повторить оценку НДС каждого слоя и выявить наиболее напряженный слой. Это позволяет рассматривать кинетику разрушения и определить максимально возможную несущую способность композитной конструкции.

Таким образом, оценка НДС элемента конструкции из слоистого КМ базируется на оценке НДС однонаправленного слоя.

Упругие и прочностные характеристики однонаправленного слоя, определенные методами микромеханики, позволяют выявить их зависимость от свойств и объемного содержания компонент. Необходимо иметь в виду, что все многочисленные модели микромеханики однонаправленного слоя удовлетворительно согласуются между собой только в отношении продольного модуля упругости. Результаты определения упругих и прочностных свойств при поперечном направлении и сдвиге существенно отличаются от экспериментальных (15 ÷ 20 %). Это отличие объясняется тем, что структура реального компонента, полученного по конкретной технологии, существенно отличается от использованной в модели. Принятые допущения относительно свойств и геометрии лишь приближенно отражают реальный композит. Поэтому полученные по тем или иным микромеханическим моделям упругие и прочностные свойства целесообразно использовать для ориентировочных оценок и качественного анализа свойств однонаправленного слоя. При конкретном проектировании изделий из композиционных материалов свойства, полученные методами микромеханики, должны уточняться свойствами, полученными экспериментальными методами.

Однонаправленный слой в многослойном композите находится в условиях объемного напряженного состояния. В большинстве случаев напряжениями в направлении, перпендикулярном слоям, пренебрегают и считают, что слой находится в условиях плоского напряженного состояния и испытывает действие напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\tau_{12}$ .

Естественно, для прогнозирования прочности слоя при действии

этих напряжений необходим критерий прочности. Для инженерных расчетов наиболее распространены феноменологические критерии, не раскрывающие физику явлений разрушения, а базирующиеся на данных о разрушении при различных сочетаниях напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$ .

Феноменологический критерий прочности при плоском напряженном состоянии в координатах  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  представляет собой замкнутую поверхность (рис. 3.26), координаты точек которой характеризуют предельные напряжения, при которых наступает разрушение, либо появление недопустимо больших деформаций. Координаты, например, точки  $K$ , представляют предельные напряжения  $\sigma_1^{(K)}$ ,  $\sigma_2^{(K)}$ ,  $\tau_{12}^{(K)}$ , при которых наступает разрушение.

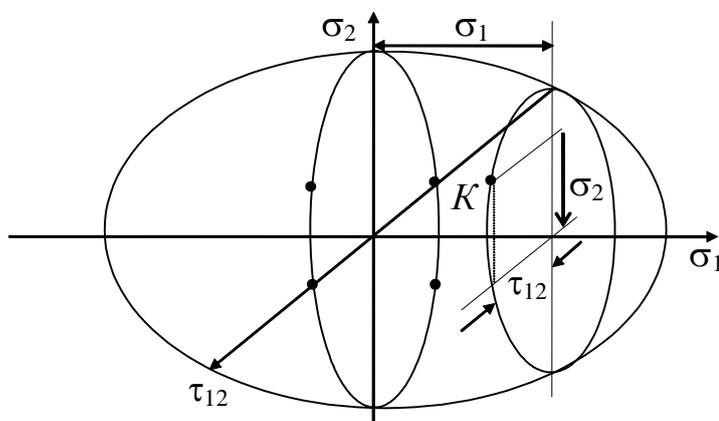


Рис. 3.26. Поверхность прочности при плоском напряженном состоянии

При наличии достаточно большого количества испытаний при различных сочетаниях  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  феноменологический критерий представляется в виде поверхности прочности. Если напряжения в опасном месте рассчитываемой конструкции характеризуют точку внутри пространства, ограниченного поверхностью прочности, то напряженное состояние безопасно.

Построение поверхности прочности требует значительного количества испытаний. Поэтому на практике поверхность прочности представляют в аналитическом виде. Для ее построения используют результаты испытаний на прочность при простых видах нагружения (растяжение, сжатие, сдвиг) вдоль направлений армирования, поперек и при сдвиге. Если необходимо, проводят ограниченные испытания при плоском напряженном состоянии и при различных сочетаниях  $\sigma_1 / \sigma_2$ . Полученная поверхность лишь с определенной степенью точности описывает реальные результаты, позволяет дать приемле-

мый прогноз прочности рассчитываемой конструкции.

Критериев прочности для композитов разработано достаточно много и каждый из них отражает те или иные особенности разрушения. В качестве примера рассмотрим критерий Цая-Хилла, который представляет собой аналитическую аппроксимацию результатов испытаний однонаправленного слоя при различных видах нагружения табл. 3.1 [55].

Таблица 3.1

Средние значения кратковременной прочности однонаправленных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы ( $\psi=0,5$ )

Материал	Продольное растяжение, МПа	Продольное сжатие, МПа	Поперечное растяжение, МПа	Поперечное сжатие, МПа	Сдвиг, МПа
Стеклопластик	650 – 950	600 – 900	20 – 25	90 – 120	45 – 60
Углепластик	850 – 1500	700 – 1200	35 – 40	130 – 190	60 – 75
Органопластик	110 – 1250	240 – 290	20 – 30	110 – 140	40 – 60

Условие прочности по Цая-Хиллу записывается в виде

$$A_{11} \cdot \sigma_1^2 + A_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + A_{22} \cdot \sigma_2^2 + B_{12} \cdot \tau_{12}^2 \leq 1. \quad (3.26)$$

Учет только квадратичных членов в критерии прочности предполагает его справедливость только для материалов с одинаковой прочностью на растяжение, сжатие. Для учета различия в прочности на растяжение, сжатие в квадратичную форму вводят члены в первой степени  $A_1 \cdot \sigma_1$  и  $A_2 \cdot \sigma_2$ .

Критерий в этом случае записывается в виде

$$A_{11} \cdot \sigma_1^2 + A_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + A_{22} \cdot \sigma_2^2 + B_{12} \cdot \tau_{12}^2 + A_1 \cdot \sigma_1 + A_2 \cdot \sigma_2 \leq 1. \quad (3.27)$$

Коэффициенты  $A_i$  и  $A_{ij}$  определяются из опытов на растяжение, сжатие вдоль армирования, поперек армирования, сдвиг в плоскости 1,2 и испытания при плоском напряженном состоянии под действием напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  ( $\tau_{12} = 0$ ).

Для анализа критерия прочности вернемся к более простой его записи (3.27).

Нагружая образцы из однонаправленного композита вдоль армирования ( $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$ ) предельным напряжением  $\bar{\sigma}_1^+$ , получим

$$A_{11} = \frac{1}{\bar{\sigma}_1^2}. \text{ Аналогично, при нагружении поперек волокон } (\sigma_1 = \tau_{12} = 0)$$

получаем  $A_{22} = \frac{1}{\bar{\sigma}_2^2}$ . При сдвиге ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ) коэффициент  $B_{12}$  нахо-

дится из выражения  $B_{12} = \frac{1}{2 \tau_{12}}$ .

Для определения коэффициента  $A_{12}$  образец (как правило, трубчатый) нагружается одновременно напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  таким образом, чтобы они достигли в момент разрушения образца предельных значений  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_2$ , и выражение критерия при этом нагружении принимает вид

$$A_{11} \cdot \bar{\sigma}_1^2 + A_{12} \cdot \bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2 + A_{22} \cdot \bar{\sigma}_2^2 = 1. \quad (3.28)$$

Учитывая ранее найденные коэффициенты  $A_{11}$  и  $A_{22}$ , получим  $A_{12} = \frac{1}{\bar{\sigma}_1^2 \cdot \bar{\sigma}_2^2}$ .

С учетом найденных коэффициентов критерий прочности имеет вид

$$\left( \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2} + \left( \frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 \leq 1. \quad (3.29)$$

Для однонаправленного слоя наибольшая несущая способность реализуется в направлении волокон, т.е.  $\bar{\sigma}_1 \gg \bar{\sigma}_2$  и  $\bar{\sigma}_1 \gg \bar{\tau}_{12}$ . При этом условии первые два слагаемых в выражении (3.29) оказываются малыми, и критерий можно записывать в виде

$$\left( \frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 \leq 1. \quad (3.30)$$

Критерий прочности в форме (3.30) предполагает, что разрушение однонаправленного слоя связано с разрушением связующего и нарушением сцепления между волокнами и матрицей. Оба вида разрушения приводят к нарушению монолитности слоя. Нарушение монолитности слоя, как будет показано ниже, еще не означает разрушения многослойного композита в целом, так как волокна продолжают воспринимать нагрузку вдоль направления армирования.

Разрушения волокон определяются первым слагаемым. Условие прочности имеет вид

$$\left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1}\right)^2 \leq 1. \quad (3.31)$$

Как показывают экспериментальные исследования, разрушение однонаправленного композита носит поэтапный характер. Как правило, в первую очередь разрушается связующее, либо происходит отслоение матрицы волокна в результате действий напряжений  $\sigma_2$  и  $\tau_{12}$ .

Для прогнозирования прочности однонаправленного слоя при инженерных расчетах используют более простые оценки, состоящие из пяти критериев, соответствующих пределам прочности при основных видах нагружения (см. 3.2.3). В литературе эти критерии часто называют критерием максимального напряжения по аналогии с критерием для изотропных материалов. Эти критерии означают, что прочность материала будет обеспечена, если будут выполнены следующие неравенства:

$$\begin{aligned} \sigma_1^+ &\leq \bar{\sigma}_1^+; \\ \left|\sigma_1^-\right| &\leq \left|\bar{\sigma}_1^-\right|; \\ \sigma_2^+ &\leq \bar{\sigma}_2^+; \\ \left|\sigma_2^-\right| &\leq \left|\bar{\sigma}_2^-\right|; \\ \left|\tau_{12}\right| &\leq \bar{\tau}_{12}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Если хотя бы одна из компонент напряжения в главных осях материала превышает соответствующее значение предела прочности, материал разрушается по механизму, который вызывается этой компонентой.

Данные критерии дают хорошее согласие с экспериментом, если угол  $\theta$  близок к  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . При промежуточных значениях  $\theta$  значительны все три компоненты напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$ . Их взаимное влияние, неучитываемое критериями (3.32), приводит к снижению разрушающего напряжения.

Критерий вида (3.32) иногда записывается через деформации:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1^+ &\leq \bar{\varepsilon}_1^+; \\
|\varepsilon_1^-| &\leq |\bar{\varepsilon}_1^-|; \\
\varepsilon_2^+ &\leq \bar{\varepsilon}_2^+; \\
|\varepsilon_2^-| &\leq |\bar{\varepsilon}_2^-|; \\
|\gamma_{12}| &\leq \bar{\gamma}_{12}.
\end{aligned}
\tag{3.33}$$

Графический вид критериев (3.29), (3.30), (3.32) в пространстве напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  изображен на рис. 3.27.

Критерий *a* имеет вид замкнутой поверхности в виде эллипсоида вращения (рис. 3.27), критерий в форме *b* имеет вид незамкнутой цилиндрической поверхности и критерий *в* – в форме параллелепипеда.

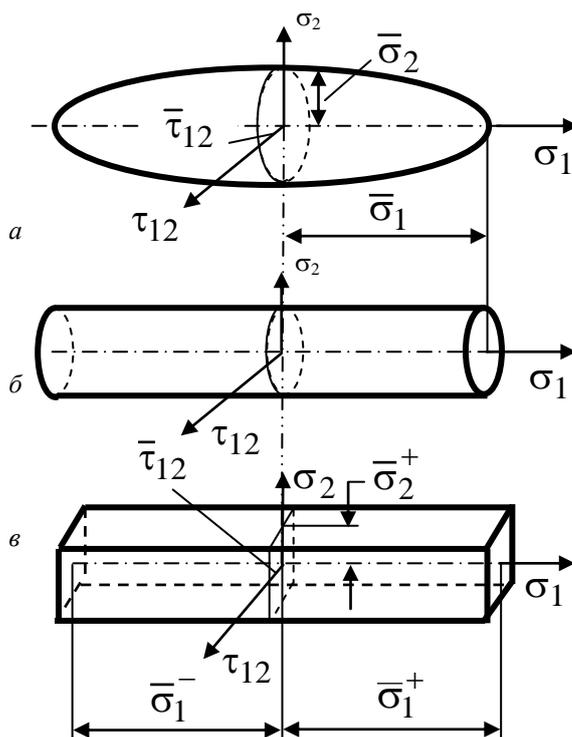


Рис. 3.27. Предельные поверхности прочности для однонаправленного композита, построенные по формулам: *a* – (5.59); *b* – (5.60); *в* – (5.62) [19]

Анализ критериев прочности показывает, что при использовании критерия Цая-Хилла достаточно рассматривать только одно не-

равенство, в то время как в критерии наибольшего напряжения необходимо рассматривать пять критериев.

## ПРИМЕР

Рассмотрим применение критериев (3.32) и критерия Цая-Хилла к определению разрушающего напряжения однонаправленного углепластика, нагруженного растягивающим усилием под углом  $\theta = 45^\circ$  к оси волокон (рис. 3.28). Свойства углепластика:

Предел прочности при растяжении вдоль волокон  $\bar{\sigma}_1^+ = 1100$  МПа

Предел прочности при растяжении поперек волокон  $\bar{\sigma}_2^+ = 40$  МПа

Предел прочности при сдвиге  $\bar{\tau}_{12} = 60$  МПа

Предел прочности при сжатии вдоль волокон  $\bar{\sigma}_1^- = 1000$  МПа

Предел прочности при сжатии поперек волокон  $\bar{\sigma}_2^- = 100$  МПа

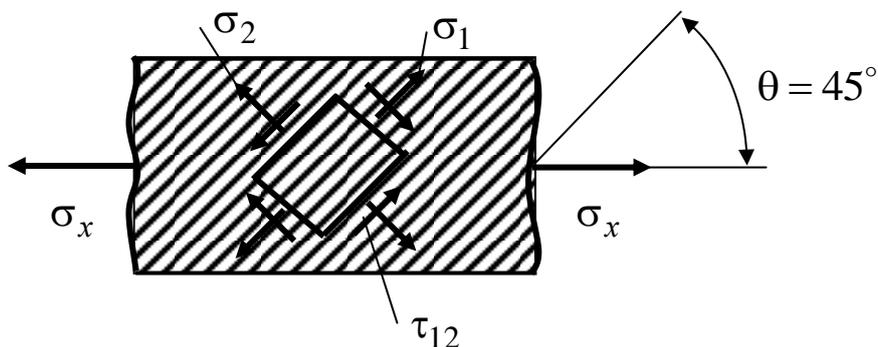


Рис. 3.28

Выделим элемент вдоль и поперек армирования и определим напряжения в главных осях материала. Используя уравнения

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha ,$$

$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha ,$$

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha ,$$

найдем  $\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta$ ,  $\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta$ ,  $\tau_{12} = \sigma_x \sin \theta \cdot \cos \theta$ .

Применим критерий наибольшего напряжения (3.32) и выясним, при каком наименьшем  $\sigma_x$  наступит разрушение и по какому меха-

низму оно произойдет.

Из первого условия

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 45 \leq \bar{\sigma}_1^+, \text{ отсюда } \sigma_x \leq \frac{\bar{\sigma}_1^+}{\cos^2 45} \leq 2200 \text{ МПа.}$$

Из второго условия

$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 45 \leq \bar{\sigma}_2^+, \text{ отсюда } \sigma_x \leq \frac{\bar{\sigma}_2^+}{\sin^2 45} \leq 80 \text{ МПа.}$$

Из третьего условия

$$\tau_{12} = \sigma_x \sin 45 \cdot \cos 45 \leq \bar{\tau}_{12}, \text{ отсюда } \sigma_x \leq \frac{\bar{\tau}_{12}}{\sin 45 \cdot \cos 45} \leq 120 \text{ МПа.}$$

Таким образом, материал разрушится при напряжении  $\sigma_x \approx 80$  МПа, вследствие разрушения матрицы от напряжения  $\sigma_2$ .

Применим к этой же задаче критерий Цая-Хилла.

Подставим значения  $\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 45$ ,  $\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 45$ ,  $\tau_{12} = \sigma_x \sin 45 \cdot \cos 45$  в критерий (3.29)

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2} + \left( \frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 = 1, \\ & \left( \frac{\sigma_x \cos^2 45}{\bar{\sigma}_1} \right)^2 - \frac{\sigma_x^2 \cos^2 45 \cdot \sin^2 45}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2} + \\ & + \left( \frac{\sigma_x \sin^2 45}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_x \sin 45 \cdot \cos 45}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 = 1, \end{aligned}$$

Подставляя значения  $\bar{\sigma}_1$ ,  $\bar{\sigma}_2$ ,  $\bar{\tau}_{12}$ , получим  $\sigma_x = 52$  МПа, что значительно ниже значения 80 МПа, полученного по критерию максимального напряжения. Это объясняется учетом совместного влияния действующих напряжений при плоском напряженном состоянии.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое микромеханика однонаправленного слоя?

2. Какие физико-механические свойства характеризуют однонаправленный слой?
3. Какие предпосылки вводятся при определении упругих свойств однонаправленного слоя?
4. Какие существуют физические модели при определении упругих свойств однонаправленного слоя?
5. Чем отличается инженерная модель однонаправленного слоя от других моделей?
6. Почему модуль продольной упругости однонаправленного слоя, определенный по инженерной модели, практически не отличается от модуля, определенного по более совершенной модели?
7. Какая компонента однонаправленного слоя является определяющей в модуле упругости вдоль армирования?
8. Почему модуль поперечной упругости однонаправленного слоя, определенный по инженерной модели, существенно отличается от модуля, определенного экспериментально?
9. Для чего нам нужны упругие характеристики однонаправленного слоя?
10. Какому условию должны удовлетворять предельные относительные деформации при растяжении армирующей и матричной компонентов?
11. Какими прочностными характеристиками характеризуется однонаправленный слой?
12. Какие феноменологические критерии прочности используются для однонаправленного слоя?

## **4. МИКРОМЕХАНИКА ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

### **4.1. Упругие характеристики гибридного композита**

Гибридными называют композиционные материалы, содержащие более одного вида армирующего материала в одной матрице. Включение более одного вида армирующего материала имеет целью повышение тех или иных свойств композита. Так, включение в лонжерон лопасти вертолета из стеклопластика ровницы из углеволокон повышает модуль упругости, усталостную долговечность. Считают, что сочетание непрерывного и рубленого волокна в одной матрице

также приводит к получению КМ, который можно отнести к гибриднему.

Надлежащим образом сконструированные гибридные КМ позволяют получать конструкции, имеющие оптимальным образом сбалансированные свойства, такие, как прочность и жесткость, масса и стоимость, высокая термическая стабильность, повышенная трещиностойкость и ударная прочность.

К настоящему времени не сложилось какой-либо общепринятой классификации ГКМ. Однако независимо от выбранных для классификации признаков, которые могут быть самыми различными, ГКМ можно разделить на следующие виды:

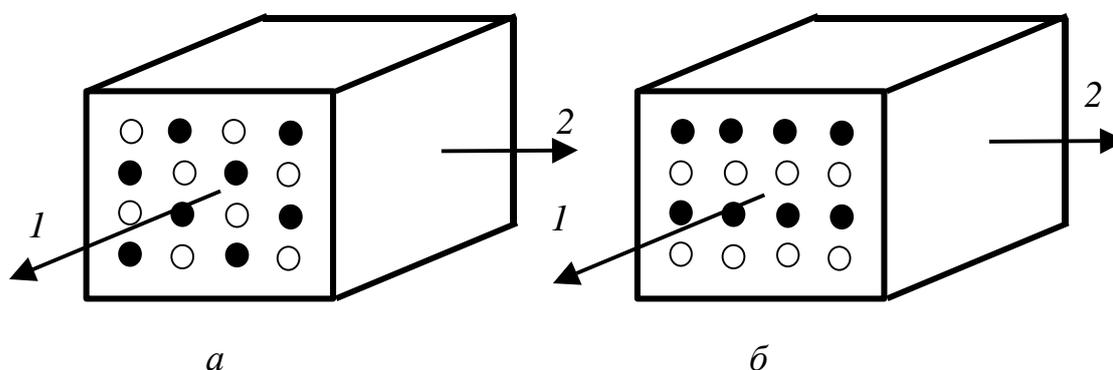
1. Внутрислойные – различные волокна в каждом слое гибридного композита регулярно чередуются.
2. Межслойные – каждый слой композита состоит из одного вида волокон (например, углестеклопластиковая пластина с наружными слоями из углеволокон) (рис. 4.1).

Перечисленные виды композитов, как правило, имеют одну матрицу. В качестве традиционной матрицы используют терморезистивные полимерные материалы. Для получения высокопрочных КМ, использующихся при невысоких температурах, главной матрицей остаются эпоксидные смолы. Для применения при высоких рабочих температурах (до 573 К) более перспективной считают матрицу на основе полиимидного связующего. Использование термопластичных материалов в качестве матрицы КМ является относительно новым. Для этой цели пригодны полипропилен, полиамиды (капрон), полисульфон, полифениленсульфид, полибутилентерефталат (термопластичный полиэфир). Полисульфон хотя и дорог, но обладает высокими прочностью и жесткостью и пригоден для переработки высокопроизводительными методами. Допускает длительное воздействие температур до 171 °С. Полифениленсульфид имеет температуру плавления 288 °С, высокие химическую стойкость и термическую стабильность. Он невоспламеняем, нерастворим в любом из известных растворителей. Его высокие механические свойства сохраняются до температуры 120 °С. Стеклопластики на основе термопластичных полиэфиров по механическим и электрическим свойствам, размерной стабильности и скорости ползучести близки к КМ на основе терморезистивных полимерных связующих. Используя различные сочетания матрицы и волокон, можно получить большое количество гибридных компози-

тов. Однако не любое сочетание матрицы и волокон позволяет получать гибридные композиты с желаемыми свойствами. Сочетание в одной матрице графитовых волокон, обладающих высокими прочностью и жесткостью, но низким сопротивлением удару, с органо-волокнами, обладающими высоким сопротивлением ударному нагружению, но пониженным модулем упругости по сравнению с графитовыми волокнами, приведет к получению гибридного композита, в котором каждый вид волокна вносит свои лучшие свойства.

Рис. 4.1. Виды гибридности: направления вдоль (1) и поперек (2) волокон;  
*a* – внутрислойная гибридность; *б* – межслойная гибридность:  
 ○ – стекловолокна; ● – углеволокна

Повышение ударной вязкости углепластиков достигается включением в них некоторого количества прочных волокон с более высокой деформацией разрушения по сравнению с углеродными волокнами. Такими волокнами, например, могут служить стекловолокна, органо-волокна и др. Ударная вязкость углепластика на эпоксидной матрице увеличивается до 5 раз при введении в него 50 % стекловолокна. Установлено, что модуль упругости композита на основе стекло-



волокна и эпоксидной смолы увеличивается при незначительном добавлении в него углеродных волокон. Добавление 5 % углеродного волокна вызывает увеличение модуля упругости при сжатии почти в 2 раза. Низкая прочность при сжатии – основной недостаток композитов на основе органо-волокон. Этот недостаток может быть ликвидирован введением 50 % по объему углеволокон. Усталостные свойства стеклопластиков могут быть повышены введением углеволокон.

Разрушение гибридных композитов при сжатии и растяжении не носит катастрофического характера вследствие последовательного включения в работу различных видов волокон. Диаграмма деформирования углестеклопластика при растяжении показана на рис. 4.2.

Начальный участок диаграммы соответствует линейному поведению материала, а второй участок показывает постепенное снижение модуля упругости по мере разрушения углеродных волокон. Установлено, что модуль упругости при изгибе изменяется по правилу аддитивности во всем диапазоне содержания углеродных и стеклянных волокон. При этом было замечено, что модуль упругости при изгибе зависит от вида армирующих волокон верхнего слоя.

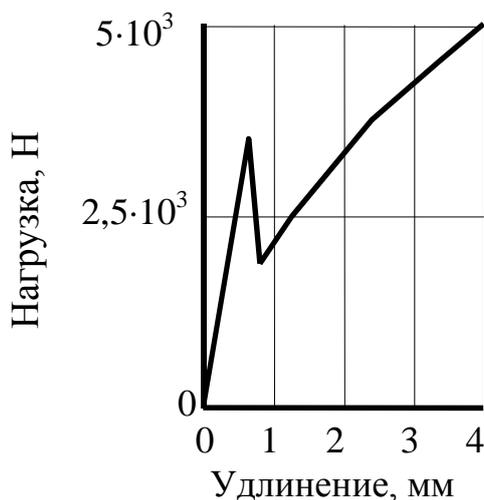


Рис. 4.2. Диаграмма растяжения углепластикового образца, содержащего 40 об. % углеродного волокна в эпоксидной матрице при  $\Delta U < 0$

## 4.2. Прогнозирование упругих свойств гибридных композитов (ГКМ)

Прогнозирование упругих свойств ГКМ, как правило, производится по так называемому правилу смесей, согласно которому вклад в величину модуля упругости ГКМ от каждого содержащего в нем компонента пропорционален объемной доле этого компонента в ГКМ и величине модуля упругости этого компонента. При определении некоторых упругих характеристик необходимо учитывать вид гибридности (внутрислоевая или межслоевая), который представлен на рис. 4.1.

Введем понятие относительного объемного содержания компонент гибридного материала:

$$\psi_B = \frac{V_B}{V_M + V_B + V_C},$$

где  $V_M, V_B, V_C$  – объемы, занимаемые матрицей, волокнами типа  $B$  и  $C$  соответственно. Суммарное относительное объемное содержание волокон определяется по формуле

$$\Psi = \frac{V_B + V_C}{V_M + V_B + V_C} = \Psi_B + \Psi_C,$$

где  $\Psi_B, \Psi_C$  – относительные объемные содержания волокон типа  $B$  и  $C$  соответственно.

Введем коэффициент, характеризующий отношение объемного содержания волокон типа  $C$  к общему содержанию волокон, и обозначим его через  $\mu_C$ :

$$\mu_C = \frac{\Psi_C}{\Psi_B + \Psi_C} = \frac{\Psi_C}{\Psi}.$$

Перейдем к определению упругих характеристик гибридных композитов. Вначале рассмотрим внутрислойный гибридный композит. Упругие характеристики однонаправленного слоя таких композитов определяются по рассмотренной в разделе 3 методике для двухкомпонентных систем

$$E_1 = E_B \Psi_B + E_C \Psi_C + E_M \Psi_M.$$

Здесь  $E_B, \Psi_B$  – соответственно модуль упругости и объемное содержание волокон типа  $B$ ;  $E_C, \Psi_C$  – то же самое для волокон типа  $C$ ;  $E_M, \Psi_M$  – то же самое для матрицы.

Коэффициент Пуассона также практически не зависит от вида гибридности и определяется по закону смеси

$$\nu_{21} = \nu_B \Psi_B + \nu_C \Psi_C + \nu_M \Psi_M.$$

Поперечный модуль упругости  $E_2$  для внутрислойной гибридности определяется по формуле

$$E_2 = \frac{E_2^B E_2^C}{E_2^C \cdot (1 - \mu_C) + E_2^B \mu_C}.$$

Здесь  $E_2^B, E_2^C$  – поперечные модули упругости однонаправленных слоев, армированных волокнами типа  $B$  и  $C$  соответственно. Модуль сдвига определяется по аналогичной зависимости

$$G_{12} = \frac{G_{12}^B \cdot G_{12}^C}{G_{12}^C \cdot (1 - \mu_C) + G_{12}^B \cdot \mu_C}.$$

В случае межслойной гибридности поперечный модуль упругости  $E_2$  определяется по формуле

$$E_2 = E_2^B \cdot (1 - \mu_C) + E_2^C \cdot \mu_C.$$

Выражение для модуля сдвига имеет вид

$$G_{12} = G_{12}^B \cdot (1 - \mu_C) + G_{12}^C \cdot \mu_C.$$

### 4.3. Прогнозирование прочности однонаправленного

#### гибридного композита в направлении армирования

Определение прочности гибридного композита базируется на законе смесей и принятых ранее предпосылках о подчинении компонент ГКМ закону Гука, о наличии абсолютной адгезии между волокном и матрицей, т.е. деформации волокон равны деформациям гибридного композита  $\varepsilon_B = \varepsilon_C = \varepsilon_M = \langle \varepsilon_1 \rangle$ .

Запишем закон деформирования однонаправленного ГКМ в направлении армирования

$$\langle \sigma_1 \rangle = (E_B \psi_B + E_C \psi_C + E_M \psi_M) \langle \varepsilon_1 \rangle. \quad (4.1)$$

Из физико-механических свойств волокон и матрицы определяем, что между предельными деформациями компонент при растяжении существует следующая зависимость:

$$\bar{\varepsilon}_C^+ \langle \bar{\varepsilon}_B^+ \langle \bar{\varepsilon}_M^+ \rangle. \quad (4.2)$$

В начале нагружения, когда  $\langle \varepsilon_1 \rangle < \bar{\varepsilon}_C^+$ , гибридный композит деформируется согласно закону (4.1). Этот этап заканчивается при достижении волокнами типа  $C$  предельного значения  $\bar{\varepsilon}_C^+$ .

Среднее напряжение гибридного композита в этот момент определяется по формуле

$$\langle \sigma_1^* \rangle = (E_B \psi_B + E_C \psi_C + E_M \psi_M) \bar{\varepsilon}_C^+. \quad (4.3)$$

После разрушения волокон типа  $C$  скачкообразно меняется

напряженно-деформированное состояние гибридного композита. В зависимости от режима нагружения потенциальная энергия системы в момент разрушения волокон типа  $C$  может увеличиваться ( $\Delta U > 0$ ), не изменяться ( $\Delta U = 0$ ) или уменьшаться ( $\Delta U < 0$ ) [41].

Диаграмма деформирования углепластика при  $\Delta U < 0$  представлена на рис. 4.2, а при  $\Delta U > 0$  – на рис. 4.3.

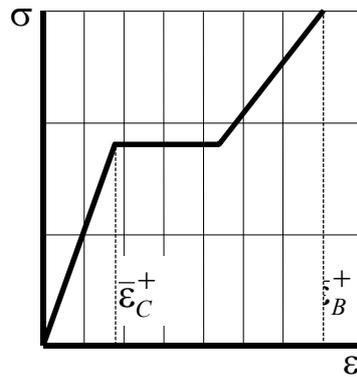


Рис. 4.3. Диаграмма деформирования углепластика при  $\Delta U > 0$

При  $\Delta U > 0$  после разрушения волокон типа  $C$  всю нагрузку практически воспринимают волокна типа  $B$ . Приложенное среднее  $\langle \sigma'_1 \rangle$  напряжение в момент разрушения не меняется, а деформация  $\langle \varepsilon_1 \rangle$  увеличивается в связи с тем, что после разрушения волокон типа  $C$  модуль упругости определяется волокнами типа  $B$  и матрицей

$$\langle \varepsilon_1^* \rangle = \frac{(E_B \psi_B + E_C \psi_C + E_M \psi_M) \cdot \bar{\varepsilon}_C^+}{(E_B \psi_B + E_M \psi_M)}. \quad (4.4)$$

Введем коэффициент, характеризующий относительное содержание волокон типа  $B$  по отношению к общему коэффициенту армирования

$$\mu_B = \frac{\psi_B}{\psi}. \quad (4.5)$$

Тогда формулу (4.4) перепишем в виде

$$\langle \varepsilon_1' \rangle = \frac{[\mu_B \psi E_B + (1 - \mu_B) \psi E_C + (1 - \psi) E_M] \cdot \bar{\varepsilon}_C^+}{[\mu_B \psi E_B + (1 - \psi) E_M]}. \quad (4.6)$$

Как показали экспериментальные исследования, механизм раз-

рушения трехкомпонентных ГKM изменяется, когда содержание низко модульного волокна является критическим:

$$\mu_{B \text{ крит}} = \frac{V_B}{V_B + V_C} = \frac{\psi_B}{\psi}. \quad (4.7)$$

Если содержание волокон с высоким модулем упругости  $E_C$  низкое, предельная деформация ГKM равна предельной деформации волокон типа  $B$  (с низким модулем упругости)  $\bar{\varepsilon}_B^+$ , и его прочность вычисляется по формуле

$$\langle \bar{\sigma}' \rangle = (E_B \psi_B + E_M \psi_M) \cdot \bar{\varepsilon}_B^+. \quad (4.8)$$

При высоком содержании волокон типа  $C$  с высоким модулем упругости предельная деформация ГKM равна предельной деформации волокон  $\bar{\varepsilon}_C^+$ , и его прочность вычисляется по формуле

$$\langle \bar{\sigma} \rangle = (E_B \psi_B + E_C \psi_C + E_M \psi_M) \cdot \bar{\varepsilon}_C^+. \quad (4.9)$$

При критическом содержании волокон с различным предельным удлинением разрушение волокон с высоким и низким модулем упругости равновероятно, т.е. сразу после разрушения волокон типа  $C$  в результате скачкообразного перераспределения напряжений разрушаются и волокна типа  $B$ . В этом случае выражение (4.6) принимает вид

$$\langle \bar{\varepsilon}_B^+ \rangle = \frac{\mu_{B \text{ крит}} \psi E_B + (1 - \mu_{B \text{ крит}}) \psi E_C + (1 - \psi) E_M}{[\mu_{B \text{ крит}} \psi E_B + (1 - \psi) E_M]}. \quad (4.10)$$

При постоянном общем относительном объемном содержании волокон  $\psi$  из формулы (4.10) определяется критическое содержание волокон типа  $B$

$$\mu_{B \text{ крит}} = \frac{\psi E_C \bar{\varepsilon}_C^+ + (1 - \psi) (\bar{\varepsilon}_C^+ - \bar{\varepsilon}_B^+) E_M}{(\bar{\varepsilon}_B^+ - \bar{\varepsilon}_C^+) E_B \psi + \psi E_C \bar{\varepsilon}_C^+}. \quad (4.11)$$

Учитывая, что  $E_M \ll E_C$ , выражение (4.11) можно записать в виде

$$\mu_{B \text{ крит}} = \frac{E_C \bar{\varepsilon}_C^+}{\bar{\varepsilon}_C^+ (E_C - E_B) + E_B \bar{\varepsilon}_B^+}. \quad (4.12)$$

Таким образом, если  $\mu_B < \mu_{B \text{ крит}}$ , прочность трехкомпонентного ГКМ определяется по формуле

$$\langle \bar{\sigma}_1^+ \rangle = [\mu_B E_B \psi + (1 - \mu_B) E_C \psi + E_M (1 - \psi)] \bar{\epsilon}_C^+, \quad (4.13)$$

при  $\mu_B > \mu_{B \text{ крит}}$  – по формуле

$$\langle \bar{\sigma}_1^+ \rangle = [\mu_B E_B \psi + E_M (1 - \psi)] \bar{\epsilon}_B^+. \quad (4.14)$$

На рис. 4.4 представлена зависимость прочности угле-стеклопластика на растяжение от относительного содержания стеклянных волокон  $\mu_B$  при постоянном объемном содержании волокон  $\psi = 0,62$ . Экспериментальные результаты, представленные на этих рисунках, взяты из работы [57].

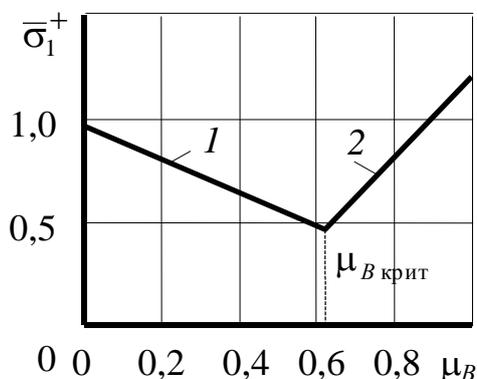


Рис. 4.4. Зависимость прочности угле-стеклопластика на растяжение от относительного содержания волокон  $\mu_B$  при  $\Delta U > 0$ .

Теоретические прямые построены по формулам:

1 – по (4.8); 2 – по (4.9) – при следующих исходных данных:

$$\psi = 0,62; \quad \bar{\epsilon}_C^+ = 0,003; \quad \bar{\epsilon}_B^+ = 0,036; \quad E_C = 5,02 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E_B = 8,3 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \quad E_M = 3,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

Диаграммы деформирования ГКМ, значения  $\mu_{B \text{ крит}}$  для режимов нагружения, при которых  $\Delta U = 0$  и  $\Delta U < 0$ , подробно рассмотрены в работе [41].

**Краткие выводы:** Модули упругости при растяжении, сжатии и изгибе трехкомпонентных ГКМ линейно возрастают с увеличением содержания высокомодульных волокон. Коэффициент Пуассона в этом случае линейно уменьшается от величины, характерной для КМ, содержащего низко модульные волокна, до величины, характерной для КМ с высоко модульными волокнами.

Прочность при растяжении, сжатии и изгибе трехкомпонентных ГКМ, содержащих волокна с различными модулями упругости, линейно уменьшается до некоторой критической величины  $\mu_{B \text{ крит}}$ , после чего прочность увеличивается, достигая величины, характерной для КМ с низко модульными волокнами.

Критическое содержание волокон с низким модулем упругости в ГКМ увеличивается с уменьшением разности отношения прочности низко- и высоко модульных волокон и отношения их модулей упругости

$$\mu_{B \text{ крит}} = \left[ 1 + \left( \frac{\bar{\sigma}_B^+}{\bar{\sigma}_C^+} - \frac{E_B^+}{E_C^+} \right) \right]^{-1}.$$

Минимальная прочность трехкомпонентного ГКМ обратно пропорциональна критическому содержанию низко модульного волокна.

Характер распределения высоко модульных волокон по поперечному сечению КМ оказывает влияние на его упругие свойства, особенно когда действуют изгибные напряжения.

Если высоко модульные волокна расположены во внешних слоях, максимальная величина модуля упругости может быть выше по сравнению с вычисленной по уравнению (см. начало). Подобный композит следует рассматривать как трехкомпонентную структуру, имеющую оболочку из высоко модульного КМ с наполнителем между ними.

Последовательное чередование слоев пластика, армированного органическим и углеродными волокнами, также обеспечивает получение повышенной прочности при сжатии по сравнению с величинами, вычисленными по уравнениям (4.8) и (4.9). Это происходит вследствие эффекта ужесточения матрицы, находящейся между армирующими волокнами.

## ПРИМЕР

Определить модуль продольной упругости  $E_1$ , поперечный модуль  $E_2$ , модуль сдвига  $G_{12}$ , коэффициент Пуассона  $\nu_{12}$  и прочность в направлении армирования гибридного композита, состоящего из углеродных, стеклянных волокон и эпоксидного связующего.

Механические характеристики компонент  
гибридного материала

*Углеродное волокно*

<b>Модуль продольной упругости</b>	$E_{1y} = 300 \text{ ГПа}$
Модуль поперечной упругости	$E_{2y} = 9 \text{ ГПа}$
Модуль сдвига	$G_{12y} = 12 \text{ ГПа}$
Коэффициент Пуассона	$\nu_y = 0,15$
<b>Прочность при растяжении вдоль волокон</b>	$\bar{\sigma}_y^+ = 2,8 \text{ ГПа}$
<b>Предельное удлинение при растяжении вдоль волокон</b>	$\bar{\epsilon}_y^+ = 1 \%$
Объемное содержание	$\psi_y = 0,4$

*Стекловолокно (изотропное)*

<b>Модуль упругости</b>	$E_c = 74 \text{ ГПа}$
Модуль сдвига	$G_c = 24 \text{ ГПа}$
Коэффициент Пуассона	$\nu_c = 0,22$
<b>Прочность при растяжении</b>	$\bar{\sigma}_c^+ = 2,5 \text{ ГПа}$
Предельное удлинение при растяжении	$\bar{\epsilon}_c^+ = 3 \%$
Объемное содержание	$\psi_c = 0,3$

*Матрица*

Модуль упругости	$E_m = 4 \text{ ГПа}$
Модуль сдвига	$G_m = 2 \text{ ГПа}$
Коэффициент Пуассона	$\nu_m = 0,34$
<b>Предельное удлинение</b>	$\bar{\epsilon}_m^+ = 5 \%$
Объемное содержание	$\psi_m = 0,3$

Вид гибридности – дисперсный (рис. 4.5)

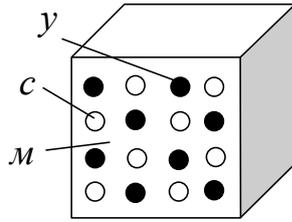


Рис. 4.5. Модель внутрислойного гибридного материала:

$y$  – углеродное волокно;  $c$  – стеклянное волокно;  $m$  – матрица

Объемное содержание

$$\psi_i = \frac{V_i}{V},$$

где  $\psi_i$  – коэффициент объемного содержания компоненты в гибридном композите;  $V_i$  – объем, занимаемый  $i$ -й компонентой;  $V$  – общий объем композита.

Например: 
$$\psi_c = \frac{V_c}{V} = \frac{V_c}{V_y + V_c + V_m}.$$

### Решение

Модуль продольной упругости однонаправленного гибридного композита в направлении армирования определяется по методологии, рассмотренной в разделе 4:

$$E_1 = E_y \cdot \psi_y + E_c \cdot \psi_c + E_m \cdot \psi_m,$$

$$E_1 = 300 \cdot 0,4 + 74 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,3 = 143,4 \text{ ГПа.}$$

Поперечный модуль упругости  $E_2$  в случае внутрислойной гибридности имеет вид

$$E_2 = \frac{E_{2y} \cdot E_c}{E_{2y} \cdot (1 - \mu_y) + E_c \cdot \mu_y},$$

где  $E_{2y}$  – поперечный модуль упругости углеродного волокна;

$$\mu_y = \frac{\psi_y}{\psi_y + \psi_c} = \frac{\psi_y}{\psi} \text{ – отношение объемного содержания углеволо-$$

кон к общему объемному содержанию волокон.

Подставляя полученные данные, получим

$$E_2 = \frac{300 \cdot 74}{300 \cdot \left(1 - \frac{0,4}{0,7}\right) + 70 \cdot \frac{0,4}{0,7}} = 131,6 \text{ ГПа.}$$

Модуль сдвига гибридного композита определяется по аналогичной зависимости

$$G_{12} = \frac{G_{12y} \cdot G_c}{G_{12y} \cdot \left(1 - \frac{\Psi_y}{\Psi}\right) + G_c \cdot \frac{\Psi_y}{\Psi}},$$

$$G_{12} = \frac{12 \cdot 24}{12 \cdot \left(1 - \frac{0,4}{0,7}\right) + 24 \cdot \frac{0,4}{0,7}} = 15,28 \text{ ГПа.}$$

Коэффициент Пуассона

$$\nu_{21} = \nu_y \cdot \Psi_y + \nu_c \cdot \Psi_c + \nu_m \cdot \Psi_m,$$

$$\nu_{21} = 0,15 \cdot 0,4 + 0,22 \cdot 0,3 + 0,34 \cdot 0,3 = 0,23.$$

## 5. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 5.1. Соотношение между напряжениями и деформациями (обобщенный закон Гука)

Главной задачей при проектировании элементов конструкции из слоистых композиционных материалов, подверженных в процессе эксплуатации действию различных нагрузок, является обеспечение необходимой прочности и жесткости. Это означает, что при действии

эксплуатационных нагрузок они не должны разрушаться, а удлинение не должно превышать некоторого допустимого предела.

Для определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из слоистых композитов необходимо рассмотреть соотношение между напряжениями и деформациями анизотропных тел, к которым относятся слоистые композиты.

При установлении связи между напряжениями и деформациями удобно моделировать поведение реальной структуры некоторым идеализированным элементом.

В большинстве случаев элементы конструкций из слоистых композитов нагружаются в плоскости, т.е. испытывают плоское напряженное состояние. Поэтому в дальнейшем, установление связи между напряжениями и деформациями будем рассматривать для плоского напряженного состояния.

Так как мы рассматриваем малые деформации, то в дальнейшем будут рассматриваться только независимые от времени линейные зависимости между компонентами деформаций и напряжений. Иначе говоря, мы будем рассматривать только такие среды и тела, в которых составляющие деформаций являются линейными функциями составляющих напряжений.

Предполагается, что при отсутствии напряжений составляющие деформации также равны нулю, и наоборот.

В отношении упругих свойств все тела можно разделить, с одной стороны, на однородные и неоднородные, и с другой стороны, на изотропные и анизотропные.

Под однородным телом будем подразумевать тело, у которого упругие свойства в разных его точках по одинаковым направлениям совпадают. Неоднородным назовем тело с упругими свойствами, различными в разных точках. Если упругие свойства меняются от точки к точке непрерывно, то "неоднородность" называется "непрерывной"; если упругие свойства при переходе от точки к точке меняются скачками, то неоднородность считается дискретной. Дискретное изменение имеет место в телах, составленных из материалов с различными упругими свойствами.

Тело называется изотропным в отношении упругих свойств, когда упругие свойства одинаковы для всех направлений, проведенных через данную точку. Направления, для которых упругие свойства одинаковы, называют упругоэквивалентными. У изотропного тела все направления являются упругоэквивалентными.

Обобщенный закон Гука для изотропного тела при плоском напряженном состоянии имеет следующий вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x), \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y), \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}.\end{aligned}\tag{5.1}$$

Для изотропного тела линейные деформации являются функциями только нормальных напряжений, сдвиговые – только касательных напряжений.

Анизотропным называют тело с упругими свойствами, различ-

ными для разных направлений, проведенных через данную точку. В разных средах можно различать два основных типа анизотропии: 1) прямолинейную и 2) криволинейную.

В зависимости от структуры тело может быть анизотропным и одновременно однородным или неоднородным.

В подавляющем своем большинстве структура анизотропных композиционных материалов обладает определенной симметрией, которая отражается в симметрии упругих свойств, т.е. в каждой точке обнаруживаются симметричные направления, эквивалентные в отношении упругих свойств.

Анизотропные однородные тела, в которых все параллельные направления, проведенные через разные точки, являются эквивалентными в отношении физико-механических свойств, называются телами с прямолинейной анизотропией. В этом случае все одинаковые и одинаково направленные элементы в виде прямоугольных параллелепипедов, выделенные в разных местах тела (рис. 5.1), являются идентичными – обладают одинаковыми свойствами.

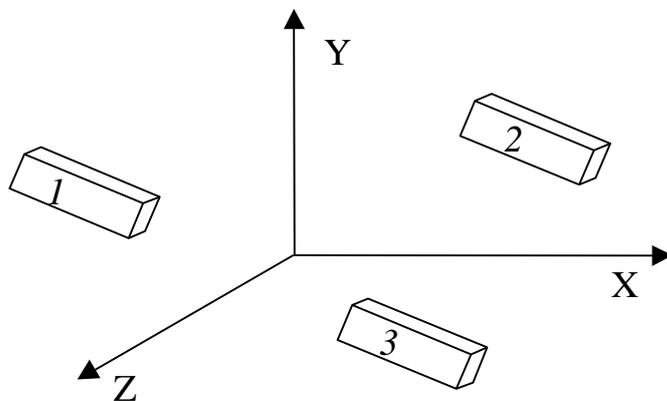


Рис. 5.1. Тело с прямолинейной анизотропией:  
1, 2, 3 – одинаково направленные элементы

Анизотропные тела, в которых эквивалентными с точки зрения физико-механических свойств являются направления, совпадающие с направлением криволинейных координат, называются криволинейно-анизотропными (рис. 5.2).

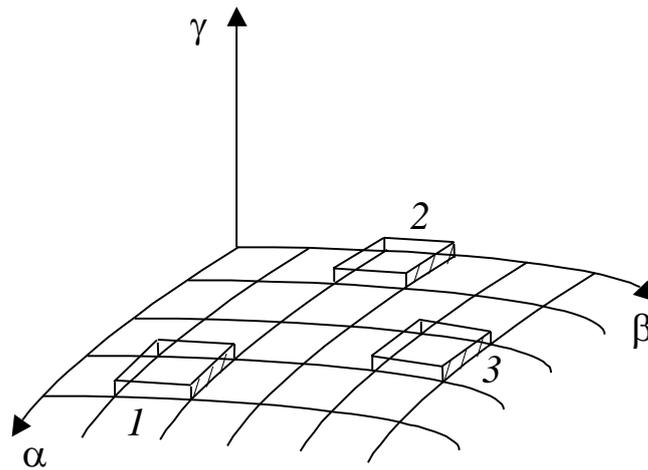


Рис. 5.2. Тело с криволинейной анизотропией

Рассмотрим наиболее важный случай упругой симметрии.

### ***Три плоскости упругой симметрии***

Если композит в каждой точке имеет три взаимно-ортогональные плоскости упругой симметрии и одноименные плоскости упругой симметрии параллельны во всех точках, то такой композит называется ортотропным (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Тело, имеющее три плоскости упругой симметрии (а), ортотропный элемент при плоском напряженном состоянии (б)

Если направить оси координат нормально к плоскостям упругой симметрии (по главным направлениям), то обобщенный закон Гука при плоском напряженном состоянии в этих осях принимает следу-

ющий вид (напряжения  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  лежат в плоскости  $XY$ ):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y, \\ \varepsilon_y &= a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y, \\ \varepsilon_z &= a_{31}\sigma_x + a_{32}\sigma_y, \\ \gamma_{xy} &= a_{66}\tau_{xy}.\end{aligned}\tag{5.2}$$

Мы видим, тела с ортотропной структурой при плоском напряженном состоянии имеют 7 упругих постоянных, из которых только 6 являются независимыми, в виду имеющихся соотношений [26, 28]:

$$a_{ij} = a_{ji}.\tag{5.3}$$

Выразим коэффициенты податливости  $a_{ij}$  уравнений (5.2) через технические упругие постоянные – модули упругости вдоль главных осей упругости  $E_x, E_y, E_z$ ; модули сдвига  $G_{xy}$  (в плоскости  $XY$ ),  $G_{xz}$  (в плоскости  $XZ$ ),  $G_{yz}$  (в плоскости  $YZ$ ); коэффициенты Пуассона  $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}, \nu_{zx}, \nu_{yz}, \nu_{zy}$ , характеризующие сокращение в направлении второго индекса при растяжении в направлении первого индекса.

Тогда уравнения (5.2) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{yx}\sigma_y}{E_y}, \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu_{xy}\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y}, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{xz}\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{yz}\sigma_y}{E_y}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}.\end{aligned}\tag{5.4}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{1}{E_x}, a_{12} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}, \\
a_{21} &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x}, a_{22} = \frac{1}{E_y}, \\
a_{31} &= -\frac{\nu_{xz}}{E_x}, a_{32} = -\frac{\nu_{yz}}{E_y}, \\
a_{66} &= \frac{1}{G_{xy}}.
\end{aligned}$$

Из соотношений (5.3) следует

$$E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy}, \quad E_y \nu_{zy} = E_z \nu_{yz}. \quad (5.5)$$

Оси координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , нормальные к плоскостям упругой симметрии, называются главными осями координат. Уравнения (5.4) записаны именно для главных осей координат. Уравнения для неглавных осей координат будут рассмотрены ниже.

Необходимо отметить, что дальнейшего сокращения числа упругих постоянных для ортотропного анизотропного тела уже не будет, так как  $a_{ij}$  в главных осях координат являются главными константами.

Частным случаем ортотропного тела является тело цилиндрической формы, имеющее ось анизотропии, которая проходит внутри тела. Если в каждой точке такого тела имеются три плоскости упругой симметрии, из которых одна нормальная к оси анизотропии, другая проходит через эту ось, третья ортогональна к первым двум, то такое тело называется ортотропным с цилиндрической анизотропией.

## **5.2. Зависимость между напряжениями и деформациями для ортотропного тела при несовпадении осей нагружения с осями упругой симметрии**

Элементы конструкций из композиционных волокнистых материалов обычно состоят из слоев, армированных тканью или из однонаправленных слоев. Считается, что слой является однородным и ортотропным. В большинстве элементов конструкций армированные пластики нагружены в плоскости армирования  $XU$ . В этом случае принимают, что  $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ . Обозначим главные оси упругой симметрии через 1, 2, 3. Если оси нагружения совпадают с главными осями упругой симметрии ортотропного материала 1 и 2, то для случая плоского напряженного состояния зависимости между напряжениями и деформациями (5.2) существенно упрощаются:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_2 ; \\ \sigma_2 &= \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_2 ; \\ \tau_{12} &= G_{12} \cdot \gamma_{12} .\end{aligned}\tag{5.6}$$

Учитывая, что  $\frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} = \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}$ , тогда уравнения (5.6) за-

пишутся в следующем виде

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_2 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} (\varepsilon_1 + \nu_{21} \varepsilon_2) ; \\ \sigma_2 &= \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \varepsilon_2 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} (\varepsilon_2 + \nu_{12} \varepsilon_1) ; \\ \tau_{12} &= G_{12} \cdot \gamma_{12} .\end{aligned}\tag{5.7}$$

В матричной форме закон деформирования (5.6) имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix},\tag{5.8}$$

где

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}; \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} = \frac{\nu_{21} E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}};$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}; \quad Q_{66} = G_{12}.$$

Еще раз напомним, что приведенные зависимости относятся к частному случаю, когда оси упругой симметрии совпадают с направлением осей нагружения.

Если оси нагружения не совпадают с осями упругой симметрии элементарного слоя, то необходимо рассмотреть уравнения состояния отдельного слоя в произвольных осях, повернутых относительно осей упругой симметрии (рис. 5.4) [45].

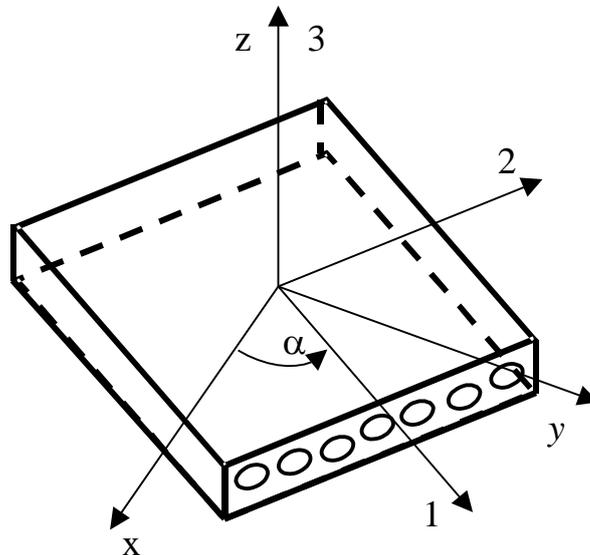


Рис. 5.4. Оси упругой симметрии (1, 2, 3) и произвольные ортогональные оси x, y, z

Выразим напряжения, действующие по площадкам, перпендикулярным осям 1 и 2 (оси упругой симметрии), через напряжения, действующие по площадкам, перпендикулярным осям x и y:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \tau_{12} &= \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Обозначим  $\cos \alpha = m$ ,  $\sin \alpha = n$ . Представим уравнения (5.9) в виде

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x m^2 + \sigma_y n^2 + \tau_{xy} 2mn, \\ \sigma_2 &= \sigma_x n^2 + \sigma_y m^2 - \tau_{xy} 2mn, \\ \tau_{12} &= \sigma_x(-mn) + \sigma_y \cdot mn + \tau_{xy}(m^2 - n^2).\end{aligned}\tag{5.10}$$

Запишем уравнения (5.10) в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix},\tag{5.11}$$

где матрица трансформации имеет вид

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}.\tag{5.12}$$

Совершенно аналогично можно записать уравнения, выражающие связь деформаций в осях 1, 2 с деформациями в осях  $x, y$ :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}.\tag{5.13}$$

Подставим (5.11), (5.13) в уравнения (5.8)

$$[T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [Q][T] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}.\tag{5.14}$$

Умножим левую и правую части (5.14) на  $[T]^{-1}$  и, учитывая, что  $[T]^{-1}[T] = 1$ , получим:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][T] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

В выражениях (5.15) перемножаются три матрицы. Сначала умножим матрицу  $[T]^{-1}$  на  $[Q]$ . Обратная матрица  $[T]^{-1}$  может быть получена из  $[T]$  заменой положительного угла  $\alpha$  на отрицательный  $[T]^{-1} = [T(-\alpha)]$ .

$$\begin{aligned} [T]^{-1}[Q] &= \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} Q_{11}m^2 + Q_{12}n^2 & Q_{12}m^2 + Q_{22}n^2 & -4Q_{66}mn \\ Q_{11}n^2 + Q_{12}m^2 & Q_{12}n^2 + Q_{22}m^2 & 4Q_{66}mn \\ (Q_{11} - Q_{12})mn & (Q_{12} - Q_{22})mn & 2Q_{66}(m^2 - n^2) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Полученная матрица еще должна быть умножена на матрицу  $[T]$ .

После умножения матриц  $[T]^{-1}[Q][T]$  выражение (5.15) будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}, \quad (5.16)$$

где компоненты матрицы упругости  $[\bar{Q}]$  в произвольных осях имеют вид:

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \alpha + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + Q_{22} \sin^4 \alpha, \\
\bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \alpha + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + Q_{22} \cos^4 \alpha, \\
\bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + Q_{12} (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha), \\
\bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \\
&\quad + Q_{66} (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha), \\
\bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \alpha \cos^3 \alpha + \\
&\quad + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \cos \alpha \sin^3 \alpha, \\
\bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \alpha \sin^3 \alpha + \\
&\quad + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \alpha \cos^3 \alpha.
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Графические зависимости  $\bar{Q}_{ij}$  от угла поворота  $\alpha$  осей координат представлены на рис. 5.5.

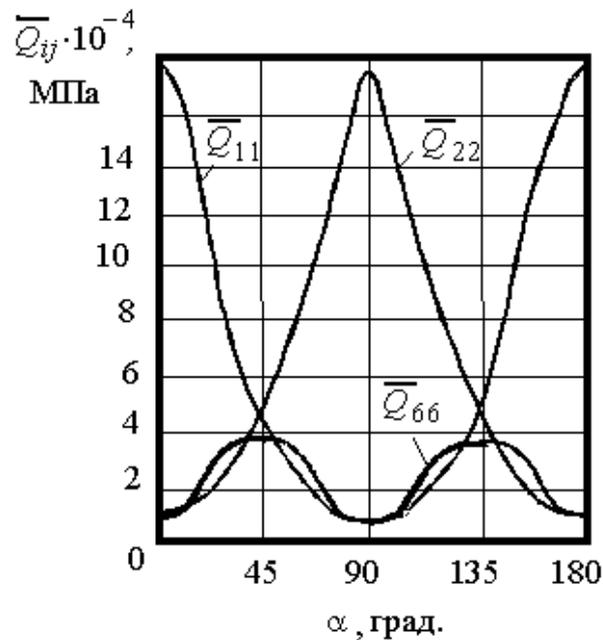


Рис. 5.5. Изменение  $\bar{Q}_{11}$ ,  $\bar{Q}_{22}$ ,  $\bar{Q}_{66}$  при повороте осей координат для однонаправленного углепластика

Уравнения (5.16), представляющие закон деформирования ортотропного слоя в произвольных осях  $x$  и  $y$ , в случае плоского напряженного состояния могут быть записаны в обобщенном виде

$$[\sigma] = [\bar{Q}] \cdot [\varepsilon]. \tag{5.18}$$

Выразим закон деформирования (5.18) через напряжения (обратная форма)

$$[\varepsilon] = [\bar{Q}]^{-1} \cdot [\sigma], \quad (5.19)$$

где

$$[\bar{Q}]^{-1} = [\bar{a}_{ij}] = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{16} \\ \bar{a}_{12} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{26} \\ \bar{a}_{16} & \bar{a}_{26} & \bar{a}_{66} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Компоненты матрицы податливости  $[\bar{a}_{ij}]$  выражаются через коэффициенты податливости ортотропного слоя в произвольных осях  $x$  и  $y$  и могут быть выражены через коэффициенты податливости в осях упругой симметрии

$$\begin{aligned} \bar{a}_{11} &= \frac{1}{E_x} = a_{11} \cos^4 \alpha + (2a_{12} + a_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + a_{22} \sin^4 \alpha, \\ \bar{a}_{12} &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} = a_{12} (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha) + (a_{11} + a_{22} - \\ &\quad - a_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha, \\ \bar{a}_{22} &= \frac{1}{E_y} = a_{11} \sin^4 \alpha + (2a_{12} + a_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + a_{22} \cos^4 \alpha, \\ \bar{a}_{16} &= \frac{\eta_{x,xy}}{E_x} = (2a_{11} - 2a_{12} - a_{66}) \sin \alpha \cos^3 \alpha - \\ &\quad - (2a_{22} - 2a_{12} - a_{66}) \sin^3 \alpha \cos \alpha, \\ \bar{a}_{26} &= \frac{\eta_{y,xy}}{E_y} = (2a_{11} - 2a_{12} - a_{66}) \sin^3 \alpha \cos \alpha - \\ &\quad - (2a_{22} - 2a_{12} - a_{66}) \sin \alpha \cos^3 \alpha, \\ \bar{a}_{66} &= \frac{1}{G_{xy}} = 2(2a_{11} + 2a_{22} - 4a_{12} - a_{66}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \\ &\quad + a_{66} (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha). \end{aligned} \quad (5.21)$$

В этих формулах  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  – модули упругости в направлении  $x$  и  $y$  и модуль сдвига в плоскости  $XY$  соответственно;  $\nu_{xy}$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечную деформацию в направлении  $y$  от напряжений, действующих в направлении оси  $x$ ;

$\eta_{x,xy}, \eta_{y,xy}$  – коэффициенты взаимного влияния второго рода [17], характеризующие сдвиги в координатных плоскостях под действием нормальных к этим плоскостям напряжений.

Коэффициенты  $a_{11}, a_{12}, a_{22}, a_{66}$  выражаются через технические упругие характеристики элементарного ортотропного слоя

$$a_{11} = \frac{1}{E_1}; \quad a_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}; \quad a_{22} = \frac{1}{E_2}; \quad a_{66} = \frac{1}{G_{12}}. \quad (5.22)$$

Подставив выражения  $a_{ij}$  в (5.21), получим зависимости для определения технических упругих характеристик ортотропного элементарного слоя в направлениях произвольных осей  $x$  и  $y$  от угла поворота этих осей относительно осей упругой симметрии 1 и 2 и упругих характеристик в направлениях осей 1 и 2:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_x} &= \frac{1}{E_1} \cos^4 \alpha + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \cdot \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{1}{E_2} \sin^4 \alpha, \\ \frac{1}{E_y} &= \frac{1}{E_1} \sin^4 \alpha + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \cdot \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{1}{E_2} \cos^4 \alpha, \\ \nu_{xy} &= E_x \cdot \left[ \frac{\nu_{12}}{E_1} - (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha) - \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right\} \cdot \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right], \\ \frac{1}{G_{xy}} &= \left( \frac{1 + \nu_{12}}{E_1} + \frac{1 + \nu_{21}}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) \cdot \sin^2 2\alpha + \frac{1}{G_{12}}, \\ \eta_{x,xy} &= E_x \cdot \left[ \left( \frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin \alpha \cos^3 \alpha - \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{2}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^3 \alpha \cos \alpha \right], \\ \eta_{y,xy} &= E_y \cdot \left[ \left( \frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^3 \alpha \cos \alpha - \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{2}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin \alpha \cos^3 \alpha \right]. \end{aligned} \quad (5.23)$$

### 5.3. Деформирование ортотропного слоя

#### при неоднородном напряженном состоянии

Прежде чем перейти к рассмотрению деформационного поведения ортотропного слоя из КМ при неоднородном напряженном состоянии, рассмотрим некоторые предпосылки и допущения, которые помогут во многих частных случаях упростить математическую модель поведения композиционного материала.

Элементы конструкций из армированных волокнистых КМ обычно состоят из большого количества тонких ортотропных слоев. Если элемент конструкции подвержен одновременному воздействию силовых факторов, показанных на рис. 5.6, то выделенный малый объем из этой конструкции будет находиться в объемном напряженном состоянии. Анализировать деформированное состояние этого элемента в этих условиях с учетом анизотропии упругих, прочностных, вязкоупругих и тепловых свойств представляет сложную задачу. Это является предметом специальных дисциплин, таких как «Теория упругости анизотропных тел» [26].

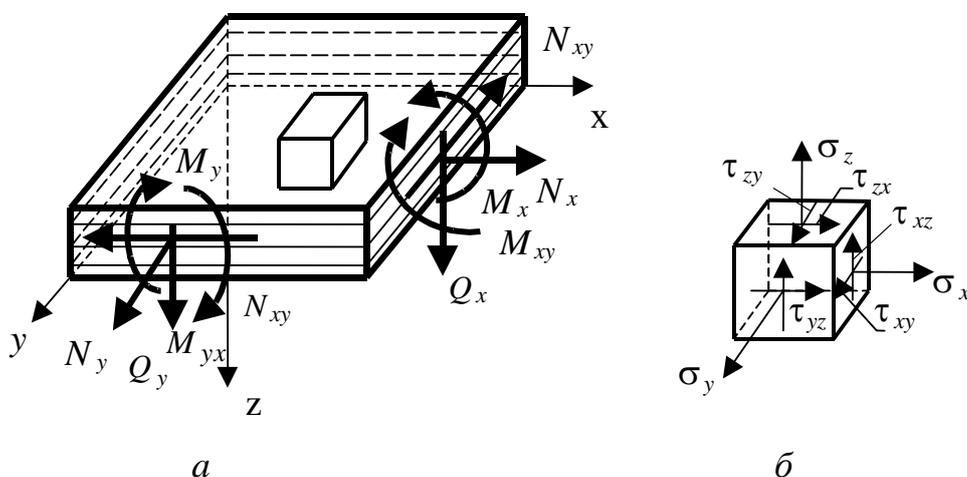


Рис. 5.6. Расчетная схема слоистого композиционного материала (а) и напряженное состояние выделенного объема (б):

$M_x, M_y$  – изгибающие моменты;  $N_x, N_y$  – нормальные силы;

$N_{xy}$  – сдвиговые силы;  $Q_x, Q_y$  – поперечные силы;  $M_{xy}$  – крутящий момент

В данном учебном пособии мы рассматриваем лишь частные случаи нагружения с введением определенных допущений, подтвержденных практикой проектирования и эксплуатации изделий из КМ.

Одним из допущений является пренебрежение напряжением  $\sigma_z$ , действующим перпендикулярно срединной поверхности, в силу малости по сравнению с  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Учитывая также, что конструкции из КМ в большинстве своем представляют относительно тонкостенные конструкции, влиянием напряжений  $\tau_{zx}$  и  $\tau_{zy}$  (соответственно и деформациями сдвига  $\gamma_{zx}$  и  $\gamma_{zy}$ ) также будем пренебрегать. Но нужно, конечно, понимать, что в некоторых случаях пренебрегать этими напряжениями, которые могут оказать существенное влияние на деформированное состояние, нельзя. В подобных случаях мы будем это подчеркивать.

Допущения, которые позволяют существенно упростить рассмотрение деформированного состояния элементов конструкций при изгибе, обычно называют гипотезами Киргофа, суть которых заключается в том, что в процессе изгиба нормали к срединной поверхности не деформируются, а только поворачиваются и остаются перпендикулярными к срединной поверхности балок и пластин как до, так и после изгиба. Принятые допущения упрощают математическую модель деформационного поведения волокнистого композиционного материала при различных напряженных состояниях, что позволяет выявить закономерности проектирования структуры композиционного материала с заданными свойствами.

Для составления закона деформирования при названных допущениях, рассмотрим расчетную схему, представленную на рис. 5.7.

Рассмотрим геометрию изгиба выделенного ортотропного слоя в плоскости  $XZ$ , показанного на рис. 5.8.

Выразим деформации в направлении оси  $x$  в произвольной точке  $B$  слоя, находящейся на расстоянии  $z$  от срединной плоскости, через перемещение срединной плоскости  $U_0$  и прогиба  $W_0$  в направлении оси  $z$

$$U_B = U_0 - z\theta . \quad (5.24)$$

Угол поворота  $\theta$  сечения  $AC$  является функцией от прогиба  $W_0$

$$\theta = \frac{\partial W_0}{\partial x} . \quad (5.25)$$

Подставив выражение для  $\theta$  в формулу (5.24), получим

$$U = U_0 - Z \frac{\partial W_0}{\partial x}. \quad (5.26)$$

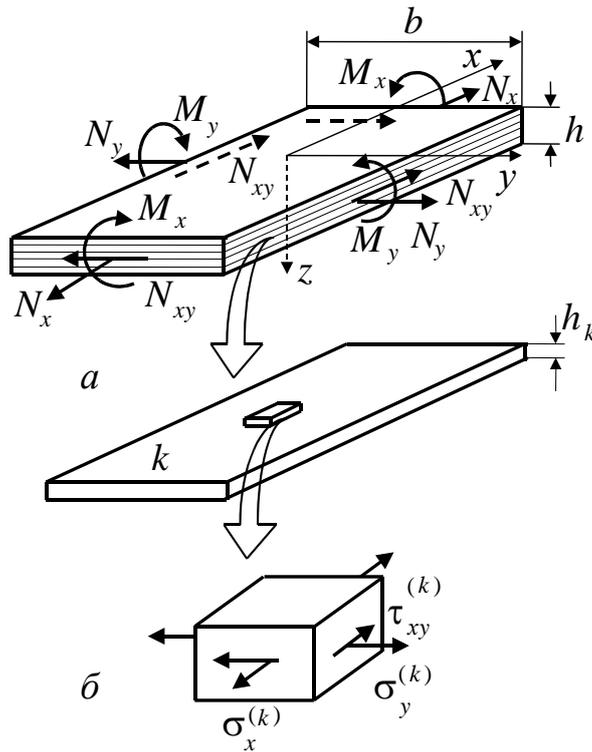


Рис. 5.7. Частный случай расчетной схемы, представленной на рис. 5.6:  
 $a - M_x, M_y$  – изгибающие моменты,  $N_{xy}$  – сдвигающие силы,  
 $N_x, N_y$  – нормальные силы;  $b$  – отдельный слой с выделенным элементом

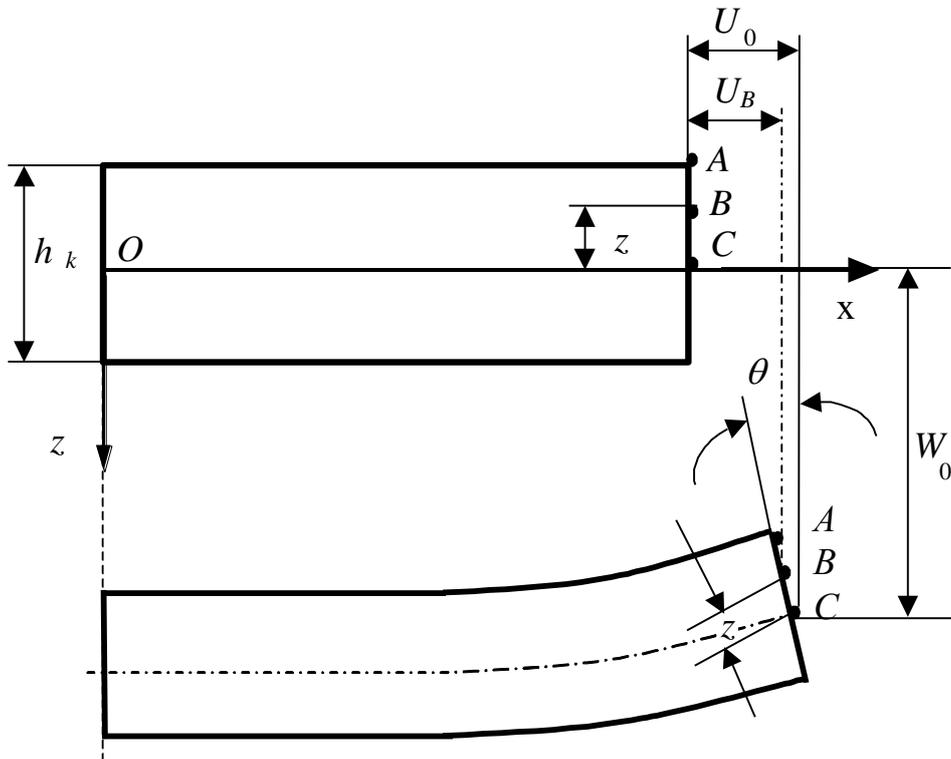


Рис. 5.8. Геометрия изгиба расчетной схемы в плоскости XZ

Зависимость (5.26) определяет перемещение произвольной точки  $B$ , находящейся на расстоянии  $z$  от срединной поверхности.

Таким же путем определяется перемещение  $V$  в направлении оси  $y$

$$V = V_0 - z \frac{\partial W_0}{\partial y}. \quad (5.27)$$

Между малыми деформациями и малыми перемещениями как известно существуют следующие зависимости:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}.$$

Подставим в эти соотношения выражения для  $U$  и  $V$ , получим

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 W_0}{\partial y^2};$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x \partial y}$$

или

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x^0 \\ K_y^0 \\ K_{xy}^0 \end{bmatrix}. \quad (5.28)$$

Деформации срединной плоскости  $\varepsilon^0$  и значения кривизны  $K^0$  определяются по уравнениям

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_0}{\partial x} \\ \frac{\partial V_0}{\partial y} \\ \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad (5.29)$$

$$\begin{bmatrix} K_x^0 \\ K_y^0 \\ K_{xy}^0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 W_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 W_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 W_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}.$$

Подставив закон изменения деформаций по толщине слоя (5.28) в уравнение деформирования (5.18), получим выражения для определения напряжений в слое  $K$  как функции от линейных, сдвиговых деформаций и кривизны срединной плоскости

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_K = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_K \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x^0 \\ K_y^0 \\ K_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

или 
$$[\sigma]_K = [\bar{Q}]_K \left[ [\varepsilon^0] + z[K^0] \right]. \quad (5.31)$$

#### 5.4. Закон деформирования многослойного композиционного материала

Перейдем к установлению закона деформирования многослойного композита.

Представим его в виде параллелепипеда, состоящего из  $n$  ортотропных слоев, уложенных произвольным образом (рис. 5.9, 5.10).

Напряженное состояние в каждом слое в общем случае неоднородное. Соответственно, в многослойном композите оно также будет неоднородным. Эпюры напряжений нормальных и касательных напряжений по толщине параллелепипеда заменим эквивалентными силами и моментами.

На параллелепипед действует система сил и моментов, отнесенных на единицу длины:  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$ ,  $S_{xz}$ ,  $S_{yz}$  – нормальные, сдвиговые и поперечные силы, действующие на уровне срединной плоскости;  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_{xy}$  – изгибающие и крутящие моменты, приложенные к срединной плоскости. Указанные силы и моменты есть равнодействующие

нормальных и касательных напряжений, действующих по граням параллелепипеда.

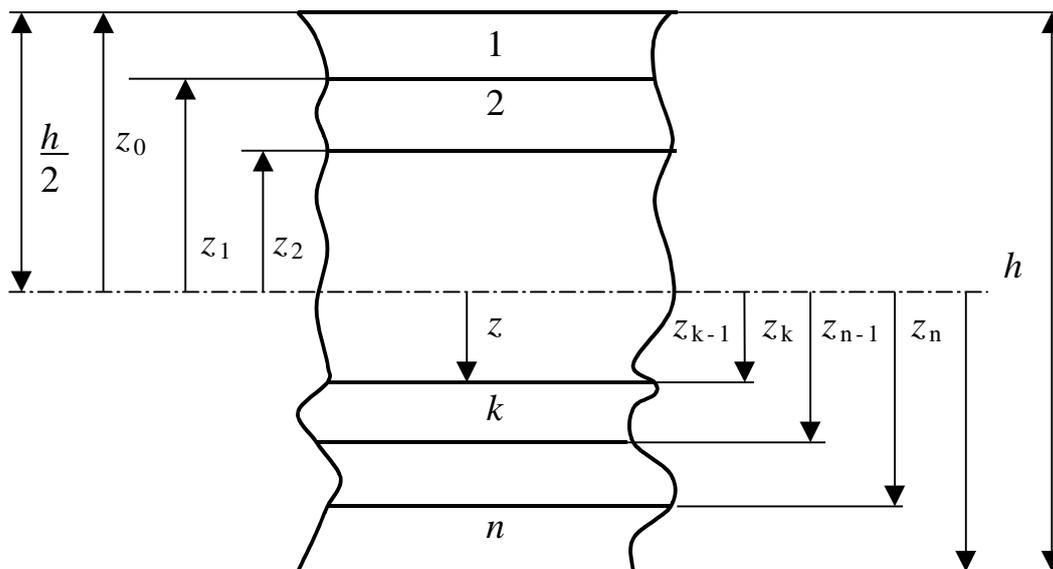


Рис. 5.9. Схема обозначения слоев в многослойном композите

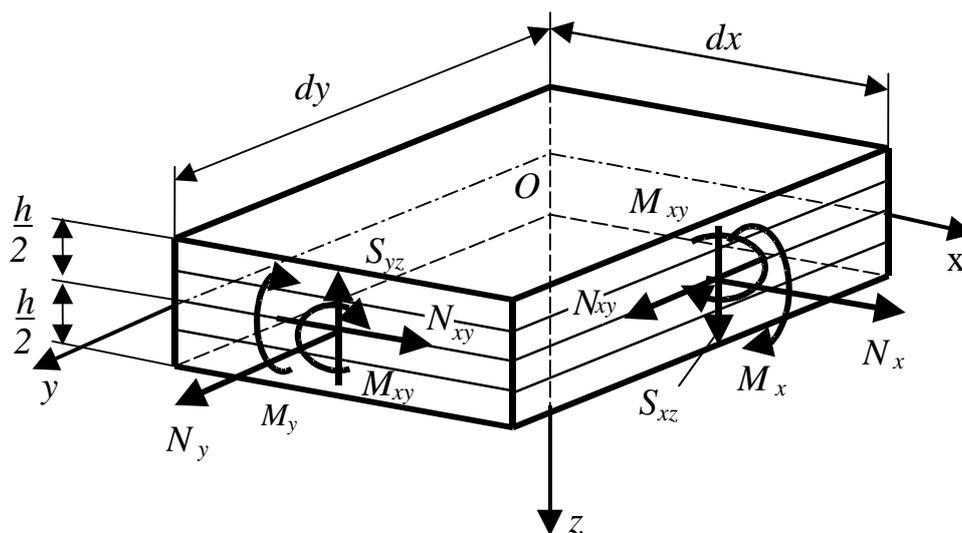


Рис. 5.10. Схема сил и моментов, действующих на параллелепипед из слоистого композита

Считаем, что слои по границам имеют прочную адгезионную связь (скольжение слоев отсутствует). В этом случае деформации по границам двух слоев будут одинаковыми. Модули же упругости этих слоев в направлении выбранных глобальных осей могут быть различными. Соответственно, и напряжения в слоях будут различными.

На рис. 5.11 представлена эпюра нормальных напряжений при растяжении композитного стержня силой, приложенной вдоль оси срединной плоскости.

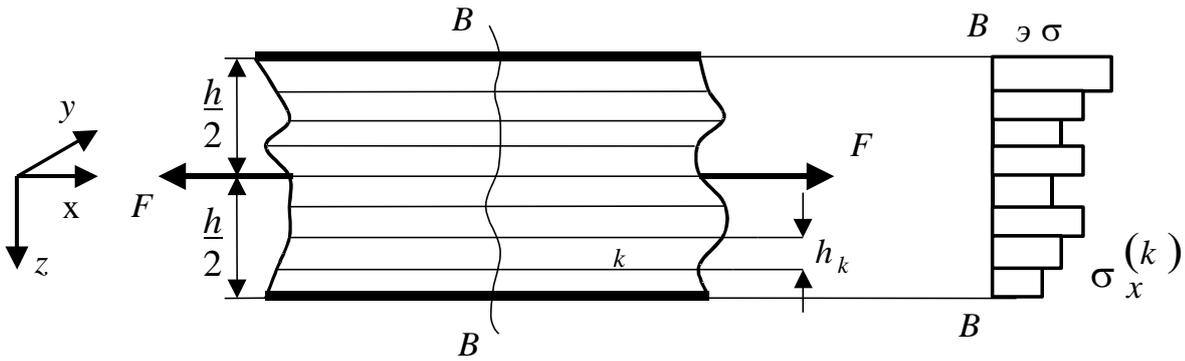


Рис. 5.11. Растяжение композитного стержня силой, приложенной вдоль оси срединной плоскости

Если слои располагаются по толщине балки произвольным образом (срединная поверхность не является плоскостью упругой симметрии), то в поперечном сечении возникает изгибающий момент  $M$ . Нормальные напряжения будут складываться из напряжений от силы  $F$  и момента  $M$ . Эквивалентные силы в этом случае будут равны

$$N_x = \sum_{k=1}^n \sigma_x^{(k)} h; \quad M_x = \sum_{k=1}^n \sigma_x^{(k)} h_k z_k. \quad (5.32)$$

Если число слоев достаточно велико, то ступенчатое распределение можно заменить сглаживающей непрерывной функцией  $\sigma_x(z)$ . Эквивалентные силы в этом случае можно выразить через интегралы

$$N_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x(z) dz; \quad M_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x(z) \cdot z dz. \quad (5.33)$$

Обобщим сказанное на эквивалентные силы и моменты, изображенные выше на рис. 5.10:

$$N_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x(z) dz; \quad N_y = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_y(z) dz; \quad N_{xy} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{xy}(z) dz; \quad (5.34)$$

$$M_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x(z) \cdot z dz; \quad M_y = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_y(z) \cdot z dz; \quad M_{xy} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{xy}(z) \cdot z dz.$$

Напомним, что  $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}$  имеют размерности силы и момента на единицу длины и действуют на уровне срединной поверхности. Принимая во внимание, что композит состоит из слоев,

толщина каждого из которых  $z_k - z_{k-1}$ , и, подставляя закон изменения напряжений в слое  $k$  как функции от деформаций и кривизны срединной плоскости (5.18) в (5.34), получим выражения для сил и моментов:

$$\begin{aligned}
 N_x &= \sum_{k=1}^n \left[ \bar{Q}_{11} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_x^{(0)} + K_x^{(0)} \cdot z) dz \right) + \bar{Q}_{12} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_y^{(0)} + K_y^{(0)} \cdot z) dz \right) + \bar{Q}_{16} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\gamma_{xy}^{(0)} + K_{xy}^{(0)} \cdot z) dz \right) \right]; \\
 N_y &= \sum_{k=1}^n \left[ \bar{Q}_{12} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_x^{(0)} + K_x^{(0)} \cdot z) dz \right) + \bar{Q}_{22} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_y^{(0)} + K_y^{(0)} \cdot z) dz \right) + \bar{Q}_{26} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\gamma_{xy}^{(0)} + K_{xy}^{(0)} \cdot z) dz \right) \right];
 \end{aligned} \tag{5.35}$$

$$\begin{aligned}
 N_{xy} &= \sum_{k=1}^n \left[ \bar{Q}_{16} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_x^{(0)} + K_x^{(0)} \cdot z) dz \right) + \bar{Q}_{26} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_y^{(0)} + K_y^{(0)} \cdot z) dz \right) + \bar{Q}_{66} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\gamma_{xy}^{(0)} + K_{xy}^{(0)} \cdot z) dz \right) \right]; \\
 M_x &= \sum_{k=1}^n \left[ \bar{Q}_{11} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_x^{(0)} + K_x^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) + \bar{Q}_{12} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_y^{(0)} + K_y^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) + \bar{Q}_{16} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\gamma_{xy}^{(0)} + K_{xy}^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) \right];
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

$$\begin{aligned}
 M_y &= \sum_{k=1}^n \left[ \bar{Q}_{12} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_x^{(0)} + K_x^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) + \bar{Q}_{22} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_y^{(0)} + K_y^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) + \bar{Q}_{26} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\gamma_{xy}^{(0)} + K_{xy}^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) \right];
 \end{aligned}$$

$$M_{xy} = \sum_{k=1}^n \left[ \bar{Q}_{16} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_x^{(0)} + K_x^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) + \bar{Q}_{26} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\varepsilon_y^{(0)} + K_y^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) + \bar{Q}_{66} \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\gamma_{xy}^{(0)} + K_{xy}^{(0)} \cdot z) \cdot z dz \right) \right];$$

Выразим (5.35) и (5.36) в матричном виде

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \varepsilon_x^{(0)} \\ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \varepsilon_y^{(0)} \\ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \gamma_{xy}^{(0)} \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x^{(0)} \\ K_y^{(0)} \\ K_{xy}^{(0)} \end{bmatrix} z dz, \quad (5.37)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \varepsilon_x^{(0)} \\ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \varepsilon_y^{(0)} \\ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \gamma_{xy}^{(0)} \end{bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x^{(0)} \\ K_y^{(0)} \\ K_{xy}^{(0)} \end{bmatrix} z^2 dz. \quad (5.38)$$

В выражениях (5.35), (7.36)  $\varepsilon_x^{(0)}$ ,  $\varepsilon_y^{(0)}$ ,  $\gamma_{xy}^{(0)}$ ,  $K_x^{(0)}$ ,  $K_y^{(0)}$ ,  $K_{xy}^{(0)}$  не являются функциями от  $z$ .

После интегрирования выражения (5.37), (5.38) принимают вид

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^{(0)} \\ \varepsilon_y^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x^{(0)} \\ K_y^{(0)} \\ K_{xy}^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^{(0)} \\ \varepsilon_y^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x^{(0)} \\ K_y^{(0)} \\ K_{xy}^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (5.40)
\end{aligned}$$

где

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}), \quad (5.41)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2), \quad (5.42)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (5.43)$$

Проанализируем влияние компонентов матриц  $[A]$ ,  $[B]$  на деформацию при одноосном растяжении. Из уравнения (5.39) видно, что взаимное влияние сил  $N$  и моментов  $M$  определяется матрицей  $[B]$ .

На рис. 5.12 показано влияние матрицы  $[B]$  и компонентов  $A_{16}$  и  $A_{26}$  матрицы  $[A]$  на деформации при одноосном растяжении.

Если компоненты  $B_{ij} = 0$ , то зависимости (5.39) и (5.40) существенно упрощаются. В этом случае силы  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$  и моменты  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_{xy}$  действуют независимо:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^{(0)} \\ \varepsilon_y^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (5.44)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x^{(0)} \\ K_y^{(0)} \\ K_{xy}^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (5.45)$$

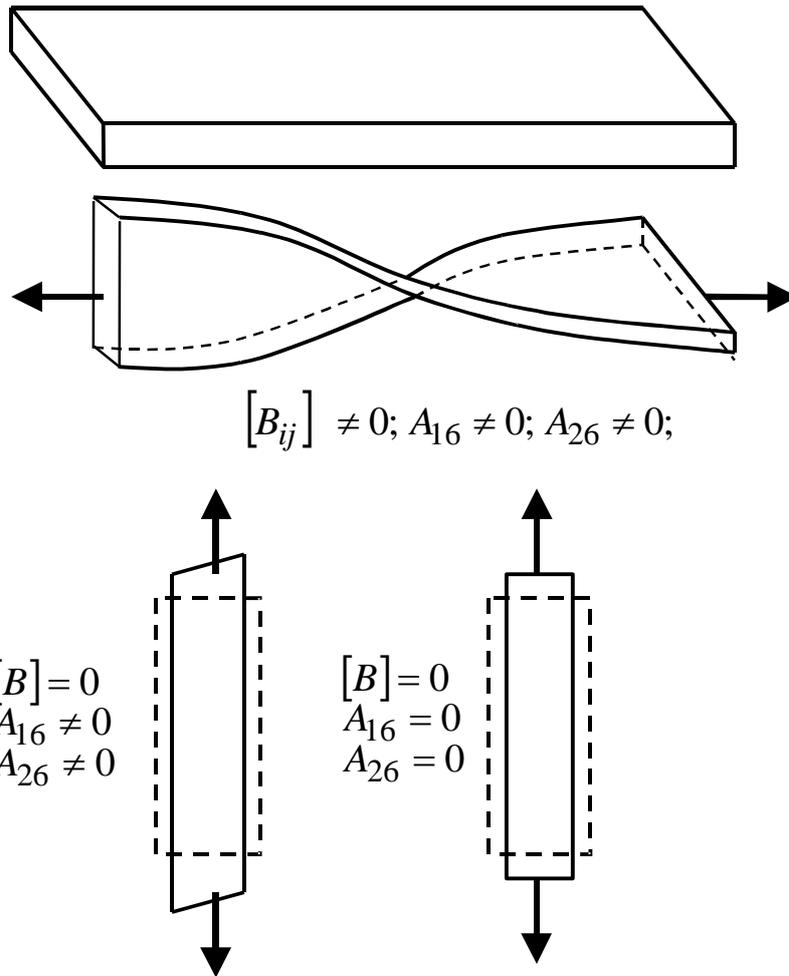


Рис. 5.12. Влияние матрицы  $[B]$  и компонентов  $A_{16}$  и  $A_{26}$  матрицы  $[A]$  на деформацию при одноосном растяжении

Выясним, как должны размещаться ортотропные слои по толщине стержня, чтобы матрица  $[B] = 0$ . Обратимся к компонентам матрицы  $[B]$ . Члены матрицы  $B_{ij}$  согласно (5.42) определяются путем суммирования произведений компонент  $(\bar{Q}_{ij})_k$  матрицы  $[\bar{Q}]$  на разность квадратов координат  $z_k$  и  $z_{k-1}$ . Компоненты  $B_{ij}$  являются четными функциями координат  $z_k$  верха и низа каждого слоя. Они будут равны нулю, если структура слоистого композита будет симметричной относительно срединной плоскости. Все компоненты  $B_{ij}$  обращаются в ноль, если каждому слою над срединной плоскостью соответствует идентичный по свойствам и ориентации слой, расположенный на таком же расстоянии ниже срединной плоскости. При симметричной структуре слоистого композита при действии растягивающих или сжимающих сил в плоскости материала отсутствуют нежелательные эффекты изгиба и кручения стержня.

Рассмотрим влияние компонент  $A_{16}$  и  $A_{26}$  на распределение деформаций при одноосном растяжении. Из рис. 5.12 видно, что отличие  $A_{16}$  и  $A_{26}$  от нуля является причиной неравномерного распределения деформаций в направлении растяжения, вызванного сдвиговыми деформациями в координатной плоскости. При  $A_{16} = A_{26} = 0$  мы имеем дело с обычным растяжением ортотропного материала. Из зависимостей (5.41) следует, что  $A_{16}$ ,  $A_{26}$  могут быть равными нулю в двух случаях.

Во-первых, когда слои ориентированы в направлениях  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ .

Во втором случае, поскольку  $\bar{Q}_{16}$  и  $\bar{Q}_{26}$  содержат  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$  в нечетной степени, они могут быть как положительными, так и отрицательными и при одинаковых углах  $\pm \alpha$  они имеют одинаковые абсолютные значения, но противоположные знаки. Следовательно, если в структуре слоистого материала каждому ортотропному слою с ориентацией  $+\alpha$  соответствует такой же ортотропный слой с одинаковой толщиной и ориентацией  $-\alpha$ , то такая структура является ортотропной по отношению к силам и деформациям, приложенным в плоскости армирования и, соответственно,  $A_{16} = A_{26} = 0$ .

Следующим шагом в анализе закона деформирования является установление влияния  $D_{16}$  и  $D_{26}$  на деформацию стержня при изгибе.  $D_{ij}$  определяется как сумма произведений  $\bar{Q}_{ij}$  на разность третьих степеней координат  $z$  верха и низа отдельного слоя:

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3).$$

Множители  $(z_k^3 - z_{k-1}^3)$  всегда положительны. Члены  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{66}$  также всегда положительны. Члены  $D_{16}$ ,  $D_{26}$  могут равняться нулю в двух случаях. Во-первых, когда все слои ориентированы в направлениях  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ . Во-вторых,  $D_{16} = D_{26} = 0$ , когда каждому слою, ориентированному под углом  $+\alpha$  и расположенному на заданном расстоянии над срединной поверхностью, соответствует аналогичный слой на таком же расстоянии ниже срединной плоскости, но ориентированный под углом  $-\alpha$ . Для таких слоев  $\bar{Q}_{16}(+\alpha) = -\bar{Q}_{16}(-\alpha)$ ,  $\bar{Q}_{26}(+\alpha) = -\bar{Q}_{26}(-\alpha)$  и  $(z_k^3 - z_{k-1}^3)$  одинаковы.

Но следует отметить, что у такого слоистого композита структура будет несимметричной относительно срединной плоскости и  $B_{ij} \neq 0$ .

Таким образом,  $D_{16} = D_{26} = 0$  только в следующих случаях:

- все слои ориентированы под углом  $\alpha = 0^\circ$  или  $\alpha = 90^\circ$ ;
- часть слоев ориентирована под углом  $\alpha = 0^\circ$ , а часть – под углом  $\alpha = 90^\circ$ ;
- когда каждому слою, ориентированному под углом  $+\alpha$  и расположенному на заданном расстоянии над срединной плоскостью, соответствует идентичный слой на таком расстоянии ниже срединной плоскости, ориентированный под углом  $-\alpha$ .

Однако необходимо отметить, что для слоистых пластиков, структура которых симметрична относительно срединной плоскости, члены  $D_{16}$  и  $D_{26}$  не равны нулю. В случаях многослойного материала, состоящего из большого числа слоев, ориентированных в направлениях  $\pm \alpha$ , но расположенных на неравных расстояниях от срединной плоскости (из-за невозможности удовлетворить одновременно условиям симметрии и условиям укладки слоев под углом  $\pm \alpha$ ),  $D_{16}$  и  $D_{26}$  становятся весьма малыми.

## 5.5. Определение упругих характеристик слоистых пластиков

Рассмотрим возможность прогнозирования упругих свойств слоистых армированных пластиков, состоящих из  $n$  произвольно ориентированных слоев при плоском напряженном состоянии.

При определении упругих характеристик слоистых композитов обычно используются следующие исходные предпосылки:

- 1) элемент композита находится в однородном напряженном состоянии (рис. 5.13);
- 2) деформации в направлениях  $x$  и  $y$ , а также деформации сдвига в плоскости армирования одинаковы для всех слоев и равны средним деформациям слоистого элемента

$$\langle \varepsilon_x \rangle = \langle \varepsilon_x \rangle_k; \quad \langle \varepsilon_y \rangle = \langle \varepsilon_y \rangle_k; \quad \langle \gamma_{xy} \rangle = \langle \gamma_{xy} \rangle_k;$$

3) слоистый композит состоит из регулярно чередующихся тонких слоев, уложенных под различными углами по отношению к направлению нагружения. Структуру композита по толщине считаем симметричной относительно срединной плоскости.

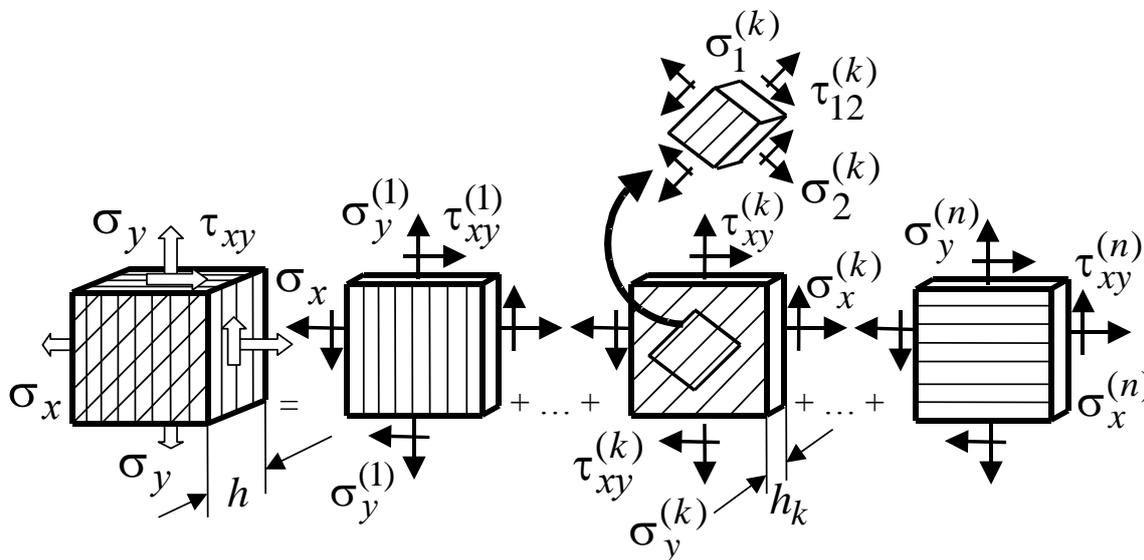


Рис. 5.13. Расчетная схема элемента слоистого композита при плоском напряженном состоянии

В этом случае напряженно-деформированное состояние описывается уравнениями:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix}, \quad (5.46)$$

где  $A_{ij} = \sum (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$ .

Напомним, что:  $(\bar{Q}_{ij})_k$  являются компонентами матрицы упругости  $[\bar{Q}]$  для ортотропного слоя в произвольных координатах  $x, y$  (см. формулы (5.15), (5.16));  $z_k - z_{k-1} = h_k$  – толщина  $k$ -го ортотропного слоя слоистого композита, которая определяется по расчетной схеме, приведенной на рис. 5.9.

Примем ширину и высоту расчетного элемента (рис. 5.13) равными единице. Тогда площадь каждой из граней, на которых действуют напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ , будет равна  $1 \cdot h$ . Соответственно

площадь грани  $k$ -го слоя равна  $1 \cdot h_k$ . Составим уравнения равновесия расчетного элемента, состоящего из  $n$  ортотропных слоев

$$\begin{aligned} N_x &= \sigma_x h = \sum_{k=1}^n \sigma_x^{(k)} h_k; \\ N_y &= \sigma_y h = \sum_{k=1}^n \sigma_y^{(k)} h_k; \\ N_{xy} &= \tau_{xy} h = \sum_{k=1}^n \tau_{xy}^{(k)} h_k. \end{aligned} \quad (5.47)$$

Еще раз заметим, что  $N_x, N_y, N_{xy}$  имеют размерность силы на единицу длины расчетного элемента и действуют на уровне срединной плоскости.

Выразим компоненты матрицы  $[A]$  через компоненты матрицы  $[\bar{Q}]$  и толщины ортотропных слоев:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{11})_k h_k; & A_{12} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{12})_k h_k; & A_{22} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{22})_k h_k; \\ A_{16} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{16})_k h_k; & A_{26} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{26})_k h_k; & A_{66} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{66})_k h_k; \end{aligned} \quad (5.48)$$

Запишем выражение (5.47) в виде

$$\begin{aligned} N_x &= h \sigma_x = A_{11} \varepsilon_x^\circ + A_{12} \varepsilon_y^\circ + A_{16} \gamma_{xy}^\circ, \\ N_y &= h \sigma_y = A_{12} \varepsilon_x^\circ + A_{22} \varepsilon_y^\circ + A_{26} \gamma_{xy}^\circ, \\ N_{xy} &= h \tau_{xy} = A_{16} \varepsilon_x^\circ + A_{26} \varepsilon_y^\circ + A_{66} \gamma_{xy}^\circ. \end{aligned} \quad (5.49)$$

Введем соотношение  $\frac{h_k}{h} = \bar{h}_k$ , тогда из уравнения (5.49) выражения для  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  примут вид

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{11})_k \varepsilon_x^\circ + \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{12})_k \varepsilon_y^\circ + \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{16})_k \gamma_{xy}^\circ, \\ \sigma_y &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{12})_k \varepsilon_x^\circ + \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{22})_k \varepsilon_y^\circ + \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{26})_k \gamma_{xy}^\circ, \\ \tau_{xy} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{16})_k \varepsilon_x^\circ + \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{26})_k \varepsilon_y^\circ + \sum_{k=1}^n \bar{h}_k (\bar{Q}_{66})_k \gamma_{xy}^\circ. \end{aligned} \quad (5.50)$$

Раскрывая  $\bar{Q}_{11}, \bar{Q}_{12}, \bar{Q}_{22}, \bar{Q}_{16}, \bar{Q}_{26}, \bar{Q}_{66}$  из (5.16) и обозначая

$$\frac{E_1^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}} = \bar{E}_1^{(k)}, \quad \frac{E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}} = \bar{E}_2^{(k)}, \quad \text{получим}$$

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \bar{A}_{11} \varepsilon_x^\circ + \bar{A}_{12} \varepsilon_y^\circ + \bar{A}_{16} \gamma_{xy}^\circ, \\ \sigma_y &= \bar{A}_{12} \varepsilon_x^\circ + \bar{A}_{22} \varepsilon_y^\circ + \bar{A}_{26} \gamma_{xy}^\circ, \\ \tau_{xy} &= \bar{A}_{16} \varepsilon_x^\circ + \bar{A}_{26} \varepsilon_y^\circ + \bar{A}_{66} \gamma_{xy}^\circ. \end{aligned} \quad (5.51)$$

Значения  $\bar{A}_{ij}$  имеют вид

$$\begin{aligned} \bar{A}_{11} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k \cdot \left( \bar{E}_1^{(k)} \cos^4 \varphi_k + 2\nu_{21}^{(k)} \cdot \bar{E}_1^{(k)} \sin^2 \varphi_k \cdot \cos^2 \varphi_k + \right. \\ &\quad \left. + \bar{E}_2^{(k)} \sin^4 \varphi_k + G_{12}^{(k)} \sin^2 2\varphi_k \right); \\ \bar{A}_{12} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k \cdot \left[ \left( \bar{E}_1^{(k)} + \bar{E}_2^{(k)} \right) \cdot \sin^2 \varphi_k \cdot \cos^2 \varphi_k + \right. \\ &\quad \left. + \nu_{21}^{(k)} \cdot \bar{E}_1^{(k)} \left( \sin^4 \varphi_k + \cos^4 \varphi_k \right) - G_{12}^{(k)} \sin^2 2\varphi_k \right]; \\ \bar{A}_{22} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k \cdot \left( \bar{E}_1^{(k)} \sin^4 \varphi_k + 2\nu_{21}^{(k)} \cdot \bar{E}_1^{(k)} \sin^2 \varphi_k \cdot \cos^2 \varphi_k + \right. \\ &\quad \left. + \bar{E}_2^{(k)} \cos^4 \varphi_k + G_{12}^{(k)} \sin^2 2\varphi_k \right); \\ \bar{A}_{16} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k \cdot \left[ \bar{E}_1^{(k)} \left( 1 - \nu_{21}^{(k)} \right) \cos^2 \varphi_k + \bar{E}_2^{(k)} \left( \nu_{12}^{(k)} - 1 \right) \sin^2 \varphi_k - \right. \\ &\quad \left. - 2G_{12}^{(k)} \cos 2\varphi_k \right] \cdot \sin \varphi_k \cdot \cos \varphi_k; \\ \bar{A}_{26} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k \cdot \left[ \bar{E}_1^{(k)} \left( 1 - \nu_{21}^{(k)} \right) \sin^2 \varphi_k + \bar{E}_2^{(k)} \left( \nu_{12}^{(k)} - 1 \right) \cos^2 \varphi_k + \right. \\ &\quad \left. + 2G_{12}^{(k)} \cos 2\varphi_k \right] \cdot \sin \varphi_k \cdot \cos \varphi_k; \\ \bar{A}_{66} &= \sum_{k=1}^n \bar{h}_k \cdot \left[ \left( \bar{E}_2^{(k)} + \bar{E}_1^{(k)} \left( 1 - 2\nu_{21}^{(k)} \right) \right) \sin^2 \varphi_k \cdot \cos^2 \varphi_k + \right. \\ &\quad \left. + G_{12}^{(k)} \cos^2 2\varphi_k \right]; \end{aligned} \quad (5.52)$$

Разрешая соотношения (5.51) относительно деформаций, получим

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}} \tau_{xy}, \\
\varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\eta_{y,xy}}{G_{xy}} \tau_{xy}, \\
\gamma_{xy} &= \frac{\eta_{yx,x}}{G_{xy}} \sigma_x + \frac{\eta_{xy,y}}{G_{xy}} \sigma_y + \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}},
\end{aligned} \tag{5.53}$$

где

$$E_x = \frac{\bar{A}}{\bar{A}_{22}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{26}^2}; \quad E_y = \frac{\bar{A}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{16}^2}; \quad G_{xy} = \frac{\bar{A}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2}$$

- эффективные модули упругости слоистого пакета в целом;

$$\nu_{xy} = \frac{\bar{A}_{12}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{16}\bar{A}_{26}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{16}^2}; \quad \nu_{yx} = \frac{\bar{A}_{12}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{16}\bar{A}_{26}}{\bar{A}_{22}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{26}^2}$$

- эффективные коэффициенты Пуассона;

$$\bar{A} = \bar{A}_{66}(\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2) + 2\bar{A}_{12}\bar{A}_{16}\bar{A}_{26} - \bar{A}_{11}\bar{A}_{26}^2 - \bar{A}_{22}\bar{A}_{16}^2,$$

$$\eta_{x,xy} = \eta_{xy,x} = \frac{\bar{A}_{12}\bar{A}_{26} - \bar{A}_{22}\bar{A}_{16}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2}, \quad \eta_{y,xy} = \eta_{xy,y} = \frac{\bar{A}_{12}\bar{A}_{16} - \bar{A}_{11}\bar{A}_{26}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2}$$

- коэффициенты влияния, характеризующие сдвиги в плоскости армирования от действия нормальных напряжений и линейные деформации от действия касательных напряжений.

Обобщенный закон Гука для плоского напряженного состояния (5.53) соответствует случаю, когда слои уложены по толщине слоистого пакета симметрично относительно срединной плоскости, но произвольно по углу укладки слоев.

Наибольший практический интерес представляет такая схема армирования, когда слои по высоте пакета уложены симметрично относительно срединной плоскости и в то же время удовлетворяют условию: каждому слою, уложенному под углом  $+\varphi_k$ , соответствует такой же толщины слой с углом армирования  $-\varphi_k$  и расположенный на таком же расстоянии от срединной плоскости. В этом случае

$$\bar{A}_{16} = \bar{A}_{26} = 0,$$

$$\eta_{x,xy} = \eta_{xy,x} = \eta_{y,xy} = \eta_{xy,y} = 0.$$

Обобщенный закон Гука для слоистого пластика при плоском напряженном состоянии в этом случае принимает вид

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \bar{A}_{11}\varepsilon_x + \bar{A}_{12}\varepsilon_y, \\ \sigma_y &= \bar{A}_{12}\varepsilon_x + \bar{A}_{22}\varepsilon_y, \\ \tau_{xy} &= \bar{A}_{66}\gamma_{xy}\end{aligned}\quad \text{или}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{yx}\sigma_y}{E_y}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{xy}\sigma_x}{E_x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}. \quad (5.54)$$

Эффективные упругие постоянные пакета имеют вид

$$\begin{aligned}E_x &= \bar{A}_{11} - \frac{\bar{A}_{12}^2}{\bar{A}_{22}}, \quad E_y = \bar{A}_{22} - \frac{\bar{A}_{12}^2}{\bar{A}_{11}}, \quad G_{xy} = \bar{A}_{66}, \\ \nu_{xy} &= \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{22}}, \quad \nu_{yx} = \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}}.\end{aligned} \quad (5.55)$$

## ПРИМЕР

Пятислойный композит, каждый слой которого состоит из стеклонитей и эпоксидной матрицы с коэффициентом армирования  $\psi = 0,7$ . Толщины и углы укладки слоев по отношению к оси  $X$ :

$$\begin{aligned}h_1 &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \varphi_1 = \pi/4 \text{ рад}, \\ h_2 &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \varphi_2 = -\pi/4 \text{ рад}, \\ h_3 &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \varphi_3 = 0 \text{ рад}, \\ h_4 &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \varphi_4 = -\pi/4 \text{ рад}, \\ h_5 &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \varphi_5 = \pi/4 \text{ рад}.\end{aligned}$$

Определить упругие характеристики пятислойного композита: модуль упругости в направлении оси  $X$  –  $E_x$ , в направлении оси  $Y$  –  $E_y$ , модуль сдвига в плоскости  $XY$  –  $G_{xy}$ , коэффициент Пуассона –  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$ .

### Механические характеристики стеклонитей

Модуль упругости, МПа	$E_B = 70 \cdot 10^3$
Модуль сдвига, МПа	$G_B = 30 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона	$\nu_B = 0,22$
Предельное удлинение при растяжении, %	$\bar{\varepsilon}_B^+ = 2,5$

### Механические характеристики эпоксидной матрицы

Модуль упругости, МПа	$E_M = 4 \cdot 10^3$
Модуль сдвига, МПа	$G_M = 1,5 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона	$\nu_M = 0,34$
Предельное удлинение при растяжении, %	$\bar{\varepsilon}_M^+ = 4 \div 6$

### Решение

Алгоритм вычисления упругих характеристик пятислойного композита.

Определение упругих характеристик однонаправленного слоя.

Определение  $E_1$ :

$$E_1 = E_B \cdot \psi + E_M \cdot (1 - \psi) = 70 \cdot 10^9 \cdot 0,7 + 4 \cdot 10^9 \cdot (1 - 0,7) = 5,02 \cdot 10^{10} \text{ Па,}$$

Определение  $E_2$ :

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\psi}{E_B} + \frac{1 - \psi}{E_M} = \frac{E_M \cdot \psi + E_B \cdot (1 - \psi)}{E_B \cdot E_M},$$

$$E_2 = \frac{E_B \cdot E_M}{E_M \cdot \psi + E_B \cdot (1 - \psi)} = \frac{70 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^9}{4 \cdot 10^9 \cdot 0,7 + 70 \cdot 10^9 \cdot (1 - 0,7)} = 1,1765 \cdot 10^{10} \text{ Па.}$$

Определение  $G_{12}$ :

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\psi}{G_B} + \frac{1 - \psi}{G_M} = \frac{G_M \cdot \psi + G_B \cdot (1 - \psi)}{G_B \cdot G_M},$$

$$G_{12} = \frac{G_B \cdot G_M}{G_M \cdot \psi + G_B \cdot (1 - \psi)} = \frac{30 \cdot 10^9 \cdot 1,5 \cdot 10^9}{1,5 \cdot 10^9 \cdot 0,7 + 30 \cdot 10^9 \cdot (1 - 0,7)} = 4,48 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

Определение  $v_{12}$ :

$$v_{12} = v_B \cdot \psi + v_M \cdot (1 - \psi) = 0,22 \cdot 0,7 + 0,34 \cdot (1 - 0,7) = 0,256.$$

Определение  $v_{21}$ :

$$\frac{v_{21}}{E_2} = \frac{v_{12}}{E_1} \Rightarrow v_{21} = \frac{v_{12} \cdot E_2}{E_1} = \frac{0,256 \cdot 11,8 \cdot 10^9}{50,2 \cdot 10^9} = 0,06.$$

Вычислим параметр  $\bar{h}_i$ :

$$\text{для первого слоя } \bar{h}_1 = \frac{h_1}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot (0,25 \cdot 10^{-3})} = 0,2.$$

Аналогично для других слоев.

Определение коэффициентов  $A_{ij}$ :

$$A_{11} = \sum_{i=1}^5 \bar{h}_i \left( \frac{E_1^{(i)}}{1 - v_{12}^{(i)} \cdot v_{21}^{(i)}} \cdot \cos^4 \varphi_i + 2 \cdot \frac{E_1^{(i)}}{1 - v_{12}^{(i)} \cdot v_{21}^{(i)}} \cdot v_{21}^{(i)} \cdot \sin^2 \varphi_i \cdot \cos^2 \varphi_i + \right. \\ \left. + \frac{E_2^{(i)}}{1 - v_{12}^{(i)} \cdot v_{21}^{(i)}} \cdot \sin^4 \varphi_i + G_{12}^{(i)} \cdot \sin^2 2\varphi_i \right),$$

где  $E_1^{(i)}$ ,  $E_2^{(i)}$ ,  $G_{12}^{(i)}$ ,  $v_{12}^{(i)}$ ,  $v_{21}^{(i)}$  – упругие характеристики  $i$ -го слоя в главных направлениях упругой симметрии  $i$ -го слоя. В нашем примере упругие характеристики каждого слоя в главных направлениях одинаковы:

$$E_1^{(1)} = E_1^{(2)} = E_1^{(3)} = E_1^{(4)} = E_1^{(5)} = E_1;$$

$$E_2^{(1)} = E_2^{(2)} = E_2^{(3)} = E_2^{(4)} = E_2^{(5)} = E_2;$$

$$G_{12}^{(1)} = G_{12}^{(2)} = G_{12}^{(3)} = G_{12}^{(4)} = G_{12}^{(5)} = G_{12};$$

$$v_{12}^{(1)} = v_{12}^{(2)} = v_{12}^{(3)} = v_{12}^{(4)} = v_{12}^{(5)} = v_{12};$$

$$v_{21}^{(1)} = v_{21}^{(2)} = v_{21}^{(3)} = v_{21}^{(4)} = v_{21}^{(5)} = v_{21}.$$

$$\begin{aligned}
A_{11} = & 0,2 \cdot 2 \cdot \left( \frac{5,02 \cdot \cos^4\left(\frac{\pi}{4}\right)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + 2 \cdot \frac{5,02 \cdot 0,06 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right) \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + \right. \\
& \left. + \frac{1,1765 \cdot \sin^4\left(\frac{\pi}{4}\right)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + 0,44776 \cdot \sin^2\left(2 \cdot \frac{\pi}{4}\right) \right) \cdot 10^{10} + 0,2 \cdot \left( \frac{5,02 \cdot \cos^4(0)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + \right. \\
& \left. + 2 \cdot \frac{5,02 \cdot 0,06 \cdot \sin^2(0) \cos^2(0)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + \frac{1,1765 \cdot \sin^4(0)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + 0,44776 \cdot \sin^2(2 \cdot 0) \right) \cdot 10^{10} + \\
& + 0,2 \cdot 2 \cdot \left( \frac{5,02 \cdot \cos^4\left(-\frac{\pi}{4}\right)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + 2 \cdot \frac{5,02 \cdot 0,06 \cdot \sin^2\left(-\frac{\pi}{4}\right) \cos^2\left(-\frac{\pi}{4}\right)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + \right. \\
& \left. + \frac{1,1765 \cdot \sin^4\left(-\frac{\pi}{4}\right)}{1 - 0,256 \cdot 0,06} + 0,44776 \cdot \sin^2\left(2 \cdot -\frac{\pi}{4}\right) \right) \cdot 10^{10} = 2,7588 \cdot 10^{10} \text{ Па.}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{12} = & \sum_{i=1}^5 \bar{h}_i \cdot \left( \frac{E_1^{(i)} + E_2^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}} \cdot \sin^2 \varphi_i \cdot \cos^2 \varphi_i + \frac{E_1^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}} \cdot (\sin^4 \varphi_i + \cos^4 \varphi_i) - \right. \\
& \left. - G_{12}^{(i)} \cdot \sin^2 2\varphi_i \right) = 1,0839 \cdot 10^{10} \text{ Па;}
\end{aligned}$$

$$A_{21} = A_{12};$$

$$\begin{aligned}
A_{22} = & \sum_{i=1}^5 \bar{h}_i \cdot \left( \frac{E_1^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}} \cdot \sin^4 \varphi_i + 2 \cdot \frac{E_1^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}} \cdot \sin^2 \varphi_i \cdot \cos^2 \varphi_i + \right. \\
& \left. + \frac{E_2^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}} \cdot \cos^4 \varphi_i + G_{12}^{(i)} \cdot \sin^2 2\varphi_i \right) = 1,9781 \cdot 10^{10} \text{ Па;}
\end{aligned}$$

$$A_{66} = \sum_{i=1}^5 \bar{h}_i \cdot \left( \frac{E_1^{(i)} + E_2^{(i)} - 2 \cdot E_1^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}}{1 - \nu_{12}^{(i)} \cdot \nu_{21}^{(i)}} \cdot \sin^2 \varphi_i \cdot \cos^2 \varphi_i + G_{12}^{(i)} \cdot \cos^2 2\varphi_i \right) = 1,2258 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

Определение упругих и прочностных характеристик пятислой-ного композита.

Находим модули упругости  $E_x$  и  $E_y$ :

$$E_x = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} = 2,1649 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

$$E_y = A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} = 1,5523 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

Находим модуль сдвига  $G_{xy}$ :

$$G_{xy} = A_{66} = 1,2258 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

Находим коэффициенты Пуассона  $\nu_{xy}$  и  $\nu_{yx}$ :

$$\nu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}} = 0,5480;$$

$$\nu_{yx} = \frac{A_{12}}{A_{11}} = 0,3929;$$

Проводим проверку по условию ортотропности:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}; \quad \frac{0,5480}{2,1649} \cdot 10^{-10} = \frac{0,3929}{1,5523} \cdot 10^{-10}; \quad 2,5311 \approx 2,5311.$$

Вывод: проведя расчет пятислойного композита, выяснили, что данный композит имеет модули упругости:

$$E_x = 2,1649 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \quad E_y = 1,5523 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

модуль сдвига:

$$G_{xy} = 1,2258 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

коэффициенты Пуассона:

$$\nu_{xy} = 0,5480; \quad \nu_{yx} = 0,3929.$$

## 5.6. Определение напряжений в слоях армированного слоистого материала при плоском напряженном состоянии

Рассмотрим элемент слоистого пластика, состоящего из чередующихся и симметрично расположенных относительно срединной плоскости слоев (рис. 5.13). Слои ориентированы под различными углами по отношению к направлению нагружения. Элемент находится в условиях плоского напряженного состояния.

Усредненные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , действующие по граням выделенного элемента, считаем известными из расчета конкретной композитной конструкции.

Предполагаем, что скольжение слоев в композитной конструкции отсутствует. Поэтому деформации композитного материала в целом и его отдельных слоев в направлениях  $x$ ,  $y$  считаем одинаковыми:  $\varepsilon_x^\circ = (\varepsilon_x^\circ)_k$ ,  $\varepsilon_y^\circ = (\varepsilon_y^\circ)_k$ ,  $\gamma_{xy}^\circ = (\gamma_{xy}^\circ)_k$ , где  $\varepsilon_x^\circ$ ,  $\varepsilon_y^\circ$  – относительные деформации слоистого элемента в направлении  $x, y$  соответственно;  $\gamma_{xy}^\circ$  – сдвиговая деформация (угол сдвига) в плоскости  $XU$ ;  $(\varepsilon_x^\circ)_k$ ,  $(\varepsilon_y^\circ)_k$ ,  $(\gamma_{xy}^\circ)_k$  – то же самое для элемента  $k$ .

Напряженное и деформированное состояние выделенного элемента с учетом выше принятых предпосылок описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} N_x &= A_{11}\varepsilon_x^\circ + A_{12}\varepsilon_y^\circ + A_{16}\gamma_{xy}^\circ, \\ N_y &= A_{12}\varepsilon_x^\circ + A_{22}\varepsilon_y^\circ + A_{26}\gamma_{xy}^\circ, \\ N_{xy} &= A_{16}\varepsilon_x^\circ + A_{26}\varepsilon_y^\circ + A_{66}\gamma_{xy}^\circ. \end{aligned} \quad (5.56)$$

В свою очередь  $N_x = \sigma_x \cdot A$ ,  $N_y = \sigma_y \cdot A$ ,  $N_{xy} = \tau_{xy} \cdot A$ .

Разделив левую и правую часть уравнения (5.56) на  $A$ , получим

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix}. \quad (5.57)$$

Напряженно-деформированное состояние произвольного слоя  $k$  (где  $k = 1, 2, \dots, n$ ), согласно (5.16), описывается следующей системой уравнений

$$\begin{aligned}\langle \sigma_x \rangle_k &= (\bar{Q}_{11})_k \varepsilon_x^\circ + (\bar{Q}_{12})_k \varepsilon_y^\circ + \frac{1}{2} (\bar{Q}_{16})_k \gamma_{xy}^\circ, \\ \langle \sigma_y \rangle_k &= (\bar{Q}_{12})_k \varepsilon_x^\circ + (\bar{Q}_{22})_k \varepsilon_y^\circ + \frac{1}{2} (\bar{Q}_{26})_k \gamma_{xy}^\circ, \\ \langle \tau_{xy} \rangle_k &= (\bar{Q}_{16})_k \varepsilon_x^\circ + (\bar{Q}_{26})_k \varepsilon_y^\circ + \frac{1}{2} (\bar{Q}_{66})_k \gamma_{xy}^\circ,\end{aligned}\tag{5.58}$$

где  $(\bar{Q}_{ij})_k$  определяется из уравнений (5.17).

Для оценки опасности напряженного состояния слоя под действием  $\langle \sigma_x \rangle_k, \langle \sigma_y \rangle_k, \langle \tau_{xy} \rangle_k$  нам необходимо определить средние напряжения в слое вдоль ориентации волокон, перпендикулярном направлении и касательные напряжения  $\langle \sigma_1 \rangle_k, \langle \sigma_2 \rangle_k$  и  $\langle \tau_{12} \rangle_k$ . Эти напряжения определяются из уравнений

$$\begin{bmatrix} \langle \sigma_1 \rangle_k \\ \langle \sigma_2 \rangle_k \\ \langle \gamma_{12} \rangle_k \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix},\tag{5.59}$$

где матрица трансформации  $[T]$  имеет вид

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix},\tag{5.60}$$

где  $m = \cos \alpha, n = \sin \alpha$ .

Для определения напряжений в слое  $k$   $\langle \sigma_x \rangle_k, \langle \sigma_y \rangle_k, \langle \tau_{xy} \rangle_k$  нам необходимо определить  $\varepsilon_x^\circ, \varepsilon_y^\circ, \gamma_{xy}^\circ$ , которые находим из уравнений

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^\circ &= \frac{A}{\Delta} \left[ \sigma_x (A_{22}A_{66} - A_{26}^2) + \sigma_y (A_{16}A_{26} - A_{12}A_{66}) + \right. \\
&\quad \left. + \tau_{xy} (A_{12}A_{26} - A_{22}A_{16}) \right], \\
\varepsilon_y^\circ &= \frac{A}{\Delta} \left[ \sigma_x (A_{16}A_{26} - A_{12}A_{66}) + \sigma_y (A_{11}A_{66} - A_{16}^2) + \right. \\
&\quad \left. + \tau_{xy} (A_{12}A_{16} - A_{11}A_{26}) \right], \\
\gamma_{xy}^\circ &= \frac{A}{\Delta} \left[ \sigma_x (A_{12}A_{26} - A_{16}A_{22}) + \sigma_y (A_{12}A_{16} - A_{26}A_{11}) + \right. \\
&\quad \left. + \tau_{xy} (A_{11}A_{22} - A_{12}^2) \right],
\end{aligned} \tag{5.61}$$

здесь

$$\begin{aligned}
\Delta &= A_{11}(A_{22}A_{66} - A_{26}^2) - A_{12}(A_{66}A_{12} - A_{16}A_{26}) + \\
&\quad + A_{16}(A_{12}A_{26} - A_{22}A_{16}).
\end{aligned} \tag{5.62}$$

### *Частный случай*

В дальнейшем рассматриваются слоистые композиты с симметричной структурой относительно срединной плоскости. Для этих структур в формуле  $A_{ij}$  множитель  $(z_k - z_{k-1})$  можно заменить суммарной площадью одинаково ориентированных слоев  $A_k$ . Тогда вместо (5.41) можно записать

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k A_k = A_1 (\bar{Q}_{ij})_1 + A_2 (\bar{Q}_{ij})_2 + \dots + A_n (\bar{Q}_{ij})_n. \tag{5.63}$$

Разделим левую и правую часть уравнения (5.63) на полную площадь поперечного сечения  $A$ :

$$\frac{A_{ij}}{A} = \frac{A_1}{A} (\bar{Q}_{ij})_1 + \frac{A_2}{A} (\bar{Q}_{ij})_2 + \dots + \frac{A_n}{A} (\bar{Q}_{ij})_n. \tag{5.64}$$

Введем обозначения:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{A}, \quad \frac{A_1}{A} = m_1, \quad \frac{A_2}{A} = m_2, \dots, \quad \frac{A_n}{A} = m_n. \tag{5.65}$$

Выражение (5.64) запишется в виде

$$\bar{A}_{ij} = m_1 (\bar{Q}_{ij})_1 + m_2 (\bar{Q}_{ij})_2 + \dots + m_n (\bar{Q}_{ij})_n. \tag{5.66}$$

## Одноосное нагружение.

Рассмотрим элемент композита, армированного в различных направлениях, при одноосном нагружении (рис. 5.14).

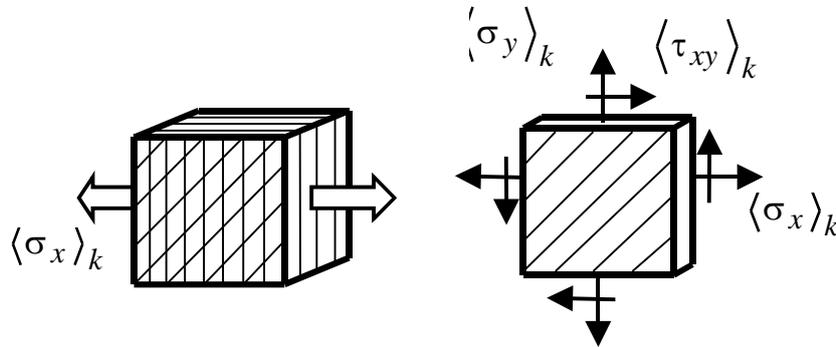


Рис. 5.14. Схема одноосного растяжения многонаправленно-армированного элемента и напряженное состояние произвольного слоя.

Знак  $\langle \rangle$  означает осредненные напряжения

Для одноосного растяжения напряжения  $\langle \sigma_x \rangle_k$ ,  $\langle \sigma_y \rangle_k$ ,  $\langle \tau_{xy} \rangle_k$  определяются формулами (5.58), а деформации  $\langle \varepsilon_x^\circ \rangle$ ,  $\langle \varepsilon_y^\circ \rangle$ ,  $\langle \gamma_{xy}^\circ \rangle$  – формулами (5.61) – (5.62) с учетом того, что  $\sigma_y = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$ .

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_x^\circ \rangle &= \frac{A}{\Delta} [\langle \sigma_x \rangle (A_{22}A_{66} - A_{26}^2)], \\ \langle \varepsilon_y^\circ \rangle &= \frac{A}{\Delta} [\langle \sigma_x \rangle (A_{16}A_{26} - A_{12}A_{66})], \\ \langle \gamma_{xy}^\circ \rangle &= \frac{A}{\Delta} [\langle \sigma_x \rangle (A_{12}A_{26} - A_{16}A_{22})]. \end{aligned} \quad (5.67)$$

Подставив (5.67) в (5.58) и разделив числитель и знаменатель на  $A$ , получим

$$\begin{aligned} \langle \sigma_x \rangle_k &= \langle \sigma_x \rangle \frac{1}{\Delta} [(\bar{Q}_{11})_k (\bar{A}_{22}\bar{A}_{66} - \bar{A}_{26}^2) + \\ &+ (\bar{Q}_{12})_k (\bar{A}_{16}\bar{A}_{26} - \bar{A}_{12}\bar{A}_{66}) + \\ &+ (\bar{Q}_{16})_k (\bar{A}_{12}\bar{A}_{26} - \bar{A}_{16}\bar{A}_{22})], \end{aligned} \quad (5.68)$$

$$\begin{aligned} \langle \sigma_y \rangle_k = \langle \sigma_x \rangle \frac{1}{\Delta} [ & (\bar{Q}_{12})_k (\bar{A}_{22} \bar{A}_{66} - \bar{A}_{26}^2) + \\ & + (\bar{Q}_{22})_k (\bar{A}_{16} \bar{A}_{26} - \bar{A}_{12} \bar{A}_{66}) + \\ & + (\bar{Q}_{26})_k (\bar{A}_{12} \bar{A}_{26} - \bar{A}_{16} \bar{A}_{22}) ] , \end{aligned} \quad (5.69)$$

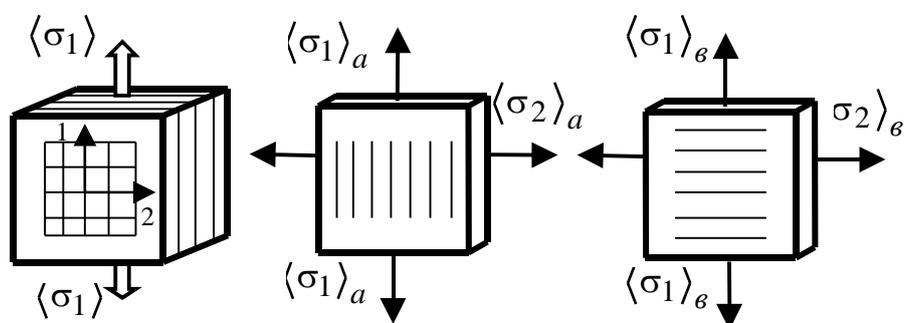
$$\begin{aligned} \langle \tau_{xy} \rangle_k = \langle \sigma_x \rangle \frac{1}{\Delta} [ & (\bar{Q}_{16})_k (\bar{A}_{22} \bar{A}_{66} - \bar{A}_{26}^2) + \\ & + (\bar{Q}_{26})_k (\bar{A}_{16} \bar{A}_{26} - \bar{A}_{12} \bar{A}_{66}) + \\ & + (\bar{Q}_{66})_k (\bar{A}_{12} \bar{A}_{26} - \bar{A}_{16} \bar{A}_{22}) ] . \end{aligned} \quad (5.70)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{\Delta} = \bar{A}_{11} (\bar{A}_{22} \bar{A}_{66} - \bar{A}_{26}^2) - \bar{A}_{12} (\bar{A}_{12} \bar{A}_{66} - \bar{A}_{16} \bar{A}_{26}) + \\ + \bar{A}_{16} (\bar{A}_{12} \bar{A}_{26} - \bar{A}_{22} \bar{A}_{16}) . \end{aligned} \quad (5.71)$$

Схематически напряженное состояние однонаправленно-армированного слоя  $k$  показано на рис. 5.14.

Рассмотрим напряженное состояние ортогонально-армированного пластика, состоящего из однонаправленно-армированных слоев и нагруженного в направлении армирования 1, как показано на рис. 5.15.



**Рис. 5.15. Расчетная схема ортогонально-армированного пластика при растяжении в направлении армирования 1**

Слои, армированные в направлении 1, обозначим  $a$ , в направлении 2 –  $b$ .

Для ортогонально-армированного пластика, нагруженного в направлении армирования 1, коэффициенты  $A_{16} = A_{26} = 0$ . Зависимости (5.68) и (5.69) принимают вид:

1) для слоя  $a$  (угол  $\alpha_a$  между направлением нагружения и армирования равен 0)

$$\langle \sigma_1 \rangle_a = \langle \sigma_1 \rangle \left( Q_{12} \frac{\bar{A}_{22}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} - Q_{11} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} \right), \quad (5.72)$$

$$\langle \sigma_2 \rangle_a = \langle \sigma_1 \rangle \left( Q_{12} \frac{\bar{A}_{22}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} - Q_{22} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} \right); \quad (5.73)$$

2) для слоя  $\epsilon$ , армированного перпендикулярно направлению нагружения ( $\alpha_\epsilon = 90^\circ$ )

$$\langle \sigma_1 \rangle_\epsilon = \langle \sigma_1 \rangle \left( Q_{22} \frac{\bar{A}_{22}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} - Q_{12} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} \right), \quad (5.74)$$

$$\langle \sigma_2 \rangle_\epsilon = \langle \sigma_1 \rangle \left( Q_{12} \frac{\bar{A}_{22}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} - Q_{11} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}\bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2} \right). \quad (5.75)$$

Коэффициенты  $\bar{A}_{ij}$  для ортогонально-армированного пластика определяются по следующим формулам

$$\begin{aligned} \bar{A}_{11} &= m_1 Q_{11} + (1 - m_1) Q_{22}, \\ \bar{A}_{22} &= m_1 Q_{22} + (1 - m_1) Q_{11}, \\ \bar{A}_{12} &= Q_{12}. \end{aligned} \quad (5.76)$$

Подставив в эти зависимости  $Q_{ij}$ , согласно (5.16), получим:

1) для слоя  $a$  ( $\alpha_a = 0$ )

$$\langle \sigma_1 \rangle_a = \langle \sigma_1 \rangle \frac{E_1 [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21}^2 E_2^2}{[m_1 E_1 + (1 - m_1) E_2] [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21}^2 E_2^2}, \quad (5.77)$$

$$\langle \sigma_2 \rangle_a = \langle \sigma_1 \rangle \frac{\nu_{21} E_2 [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21} E_2^2}{[m_1 E_1 + (1 - m_1) E_2] [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21}^2 E_2^2}; \quad (5.78)$$

2) для слоя  $\epsilon$ , армированного перпендикулярно нагружению ( $\alpha_\epsilon = 90^\circ$ )

$$\langle \sigma_1 \rangle_\epsilon = \langle \sigma_1 \rangle \frac{E_2 [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21}^2 E_2^2}{[m_1 E_2 + (1 - m_1) E_2] [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21}^2 E_1^2}, \quad (5.79)$$

$$\langle \sigma_2 \rangle_\epsilon = \langle \sigma_1 \rangle \frac{\nu_{21} E_2 [m_1 E_1 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21} E_2 E_1}{[m_1 E_1 + (1 - m_1) E_2] [m_1 E_2 + (1 - m_1) E_1] - \nu_{21}^2 E_2^2}. \quad (5.80)$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходим закон Гука в механике сплошных тел?
2. В чем принципиальное отличие закона Гука для изотропного тела от закона Гука для анизотропного?
3. Что такое «потенциал» твердого тела?
4. Какими свойствами обладает удельная потенциальная энергия деформаций твердого сплошного тела?
5. Что такое ортотропное тело?
6. Что такое плоскость упругой симметрии?
7. Какими свойствами характеризуется однородное анизотропное тело?
8. В чем отличие закона Гука для ортотропного тела и для анизотропного в главных осях анизотропии?
9. Что такое главные оси анизотропии?
10. Изменится ли выражение закона Гука ортотропного тела вдоль главных осей анизотропии, если направление нагружения не совпадает с направлением главных осей анизотропии? Если изменится, то в чем это изменение?
11. Роль однонаправленного слоя в структуре слоистого композиционного материала?
12. Что такое макромеханика слоистого КМ?
13. Какие предпосылки вводятся при определении упругих характеристик слоистого КМ?
14. Что такое сбалансированная структура КМ?
15. К чему приводит несимметричная структура КМ в элементе конструкции при нагружении?
16. Для чего используется планируемая несбалансированность КМ в элементах конструкции?
17. Как качественно влияют углы укладки однонаправленных слоев на величину модулей упругости сплошного КМ?
18. Что нужно изменить в структуре укладки слоев, чтобы повысить модуль упругости при сдвиге?
19. В чем принципиальное отличие оценки опасности напряженного состояния изотропного тела от тела из слоистого КМ?
20. Что такое послойный анализ напряженного состояния?
21. Как будет деформироваться прямолинейный прямоугольный стержень из многослойного композита, в котором слои уложены произвольно, при центральном растяжении?

22. Почему слои в многослойном композите располагают симметрично относительно срединной поверхности?
23. Что подразумевается под понятием «симметричное расположение слоев»?
24. Для чего при расположении слоев необходимо выполнять условие «слою с углом укладки  $+ \varphi$  по отношению к оси срединной поверхности должен соответствовать слой с углом укладки  $- \varphi$ , расположенный по другую сторону от срединной поверхности на одинаковом расстоянии»?
25. Что произойдет, если условие 4 не будет выполнено?
26. Как будет деформироваться прямой стержень при центральном растяжении, если слои уложены под углом, либо  $0^\circ$ , либо  $90^\circ$  или смешанно  $0^\circ$  и  $90^\circ$  (произвольно)?
27. Как повлияет разная толщина слоев на деформацию стержня при его растяжении (центральном)?
28. Как будет деформироваться стержень из многослойного композита, если один слой будет иметь повышенную температуру по отношению к другим при растяжении?
29. Для чего слои в многослойном композите умышленно располагают несимметрично?
30. Можно ли удовлетворить всем условиям расположения слоев в многослойном композите и, если нет, то почему?

## **6. ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ БАЛОК**

### **ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **6.1. Техническая теория изгиба**

Чтобы было понятно, в чем особенность расчета на прочность и жесткость балок из композитных материалов, кратко напомним теорию поперечного изгиба балок из традиционных изотропных материалов.

Исходные уравнения

Рассмотрим изотропную балку под действием поперечных распределенных нагрузок, действующих в плоскости  $XZ$  (рис. 6.1) [11, 12, 31].

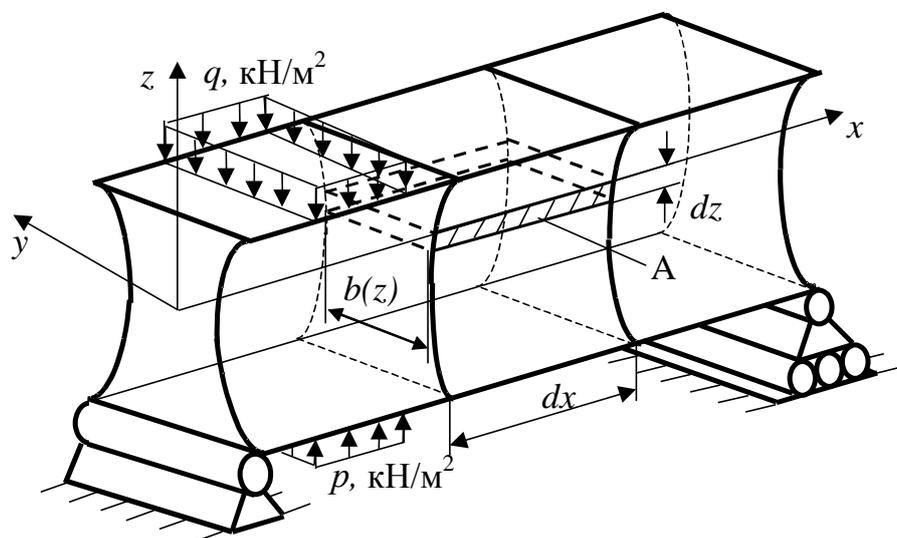


Рис. 6.1. Балка с действующими нагрузками

Выделим из балки элемент  $A$ . На гранях этого элемента возникают нормальные  $\sigma_x, \sigma_z$  напряжения и касательные  $\tau_{xz}$ . Считаем, что эти напряжения равномерно распределены по ширине балки. Ширина балки в общем случае является переменной по высоте балки  $b = b(z)$ . Рассмотрим элемент  $A$  с действующими на него нагрузками (рис. 6.2).

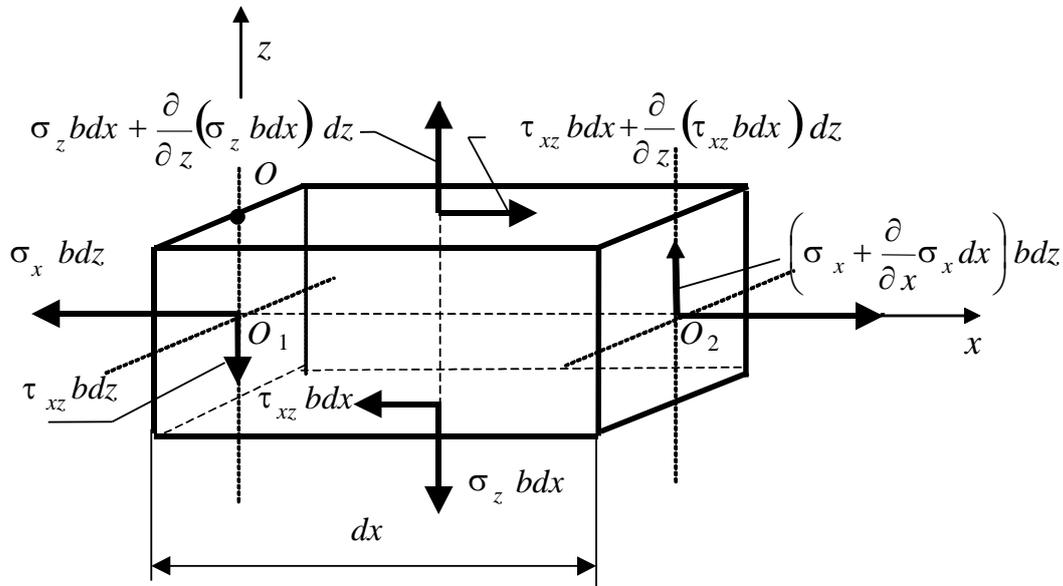


Рис. 6.2. Элемент с действующими по его граням силами

Силы, действующие по граням элемента, могут иметь приращение при переходе, например, от нижней грани к верхней и от точки  $O$  к точкам  $O_1$  и  $O_2$ , вызванные изменением ширины балки и распределенной нагрузкой.

Составим уравнение равновесия этого элемента. Для чего спроектируем все силы на оси  $x$  и  $z$ .

$$\begin{aligned}
 & -\sigma_x \cdot b \cdot dz + \left( \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) \cdot b \cdot dz + \left[ \tau_{xz} \cdot b + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz} \cdot b) \cdot dz \right] \cdot dx - \tau_{xz} \cdot b \cdot dx = 0, \\
 & \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \cdot b + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz} \cdot b) = 0.
 \end{aligned}$$

Так как  $b$  считаем функцией  $z$ , то первое уравнение запишется в виде

$$b \cdot \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz} \cdot b) = 0.$$

Составим второе уравнение

$$\begin{aligned}
 & -\tau_{xz}bdz - \sigma_z bdx + \left[ \sigma_z b + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z b)dz \right] dx + \\
 & + \left( \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial x}\tau_{xz}dx \right) bdz = 0, \\
 & \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z b) + b \cdot \frac{\partial}{\partial x}\tau_{xz} = 0.
 \end{aligned}$$

Итак, уравнения равновесия имеют вид

$$b \cdot \frac{\partial}{\partial x}\sigma_x + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{xz}b) = 0, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(b\sigma_z) + b \cdot \frac{\partial}{\partial x}\tau_{xz} = 0. \quad (6.2)$$

Из двух уравнений статики определить три неизвестные функции  $(\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz})$  не представляется возможным. Такие системы называются статически неопределимыми. Таким образом, напряжения в балке статически неопределимы. Более того, напряжения должны удовлетворять уравнениям совместности и граничным условиям (см. ниже).

Для решения задачи необходимо знать распределение напряжений по сечению балки. Инструментально найти распределение напряжений в балке практически очень сложно. Судить же о распределении напряжений возможно, если известно, как деформируется балка и какая связь напряжений и деформаций.

Запишем закон Гука для элемента балки, находящегося в условиях плоского напряженного состояния:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{zx} \frac{\sigma_z}{E_z}, \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} - \nu_{xz} \frac{\sigma_x}{E_x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G_{xz}}. \quad (6.3)$$

Рассмотрим в балке в ненагруженном состоянии два ортогональных отрезка  $OO_1$  и  $OO_2$  (рис. 6.3). В процессе нагружения точка  $O$  получит перемещение  $U$  и  $V$  в направлениях  $Y$  и  $Z$ ; ранее прямой угол между  $OO_1$  и  $OO_2$  изменится. Рассматриваемые отрезки займут положение, показанное на рис. 6.3.

Относительные удлинения равны отношениям приращений длин отрезков к начальным длинам:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= (O'O'_2 - OO_2) / OO_2, \\ \varepsilon_z &= (O'O'_1 - OO_1) / OO_1.\end{aligned}\quad (6.4)$$

Деформация сдвига измеряется углом, на который окончательный угол между отрезками отличается от прямого угла.

$$\gamma_{xz} = \alpha_1 + \alpha_2.$$

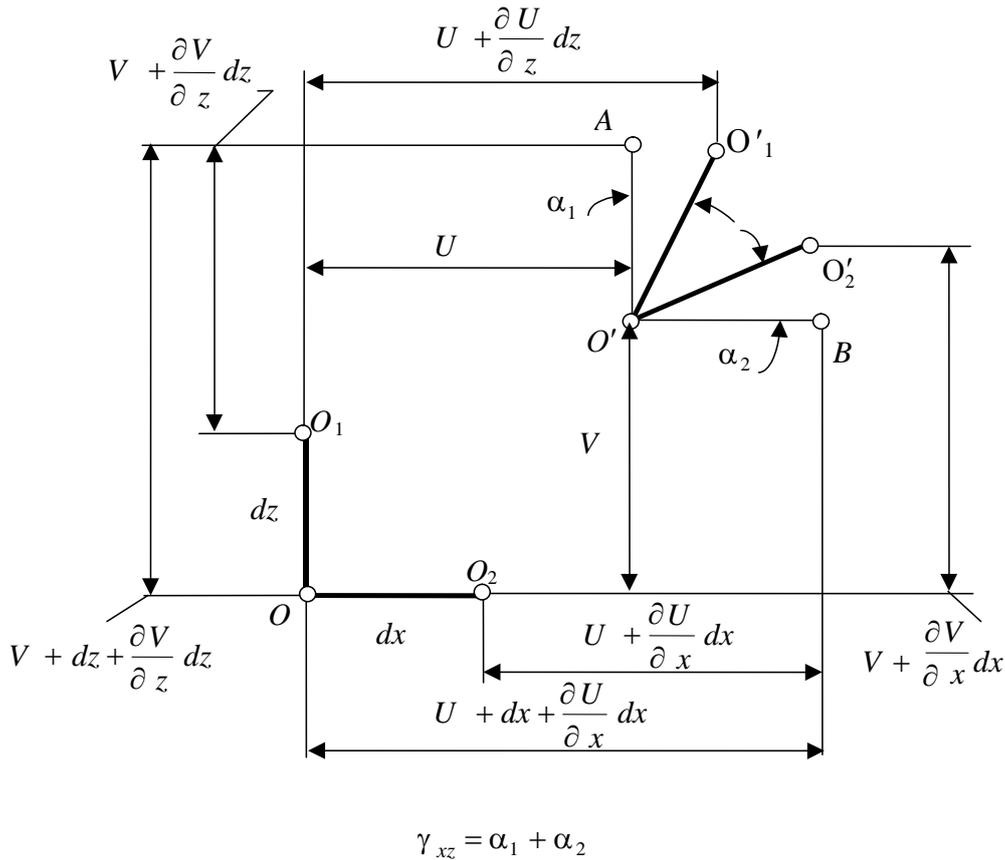


Рис. 6.3. Деформации и перемещения элементов  $dx$  и  $dz$

Здесь  $OO_2 = dx$ ;  $OO_1 = dz$ .

Считая, что углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  малы, примем

$$\begin{aligned}O'O'_2 &\approx O'B = dx + \frac{\partial U}{\partial x} dx; \\ O'O'_1 &\approx O'A = dz + \frac{\partial V}{\partial z} dz; \\ O'_2B &= \frac{\partial V}{\partial x} dx; \\ O'_1A &= \frac{\partial U}{\partial z} dz.\end{aligned}\quad (6.5)$$

Считая, что деформации  $\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz}$  малы, окончательно получим:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{O'O'_2 - OO_2}{OO_2} = \frac{dx + \frac{\partial U}{\partial x} dx - dx}{dx} = \frac{\partial U}{\partial x}; \\ \varepsilon_z &= \frac{O'O'_1 - OO_1}{OO_1} = \frac{dz + \frac{\partial V}{\partial z} dz - dz}{dz} = \frac{\partial V}{\partial z}; \\ \gamma_{xz} &= tg\alpha_1 + tg\alpha_2 = \frac{\frac{\partial U}{\partial z} dz}{dz} + \frac{\frac{\partial V}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial x}.\end{aligned}\quad (6.6)$$

Вышеперечисленные уравнения позволяют описать напряженно-деформированное состояние балки. Решение этих уравнений должно удовлетворять граничным условиям, определяющим характер нагружения и закрепления балки.

### ***Определение нормальных и касательных напряжений***

Точное решение уравнений (6.1) – (6.3), (6.6) в частных производных достаточно трудоемко. В практических расчетах балок, у которых высота сечения значительно меньше длины ( $h \leq 0,1 \cdot \ell$ ), удастся существенно упростить решения. Упрощение достигается введением некоторых гипотез, которые предопределяют распределение перемещений и напряжений по высоте. Одной из таких гипотез является гипотеза плоских сечений Бернулли – Эйлера, широко используемая в сопротивлении материалов. Эта гипотеза точно выполняется в задачах чистого изгиба и предполагает, что высота поперечных сечений балки при изгибе не изменяется, и они остаются ортогональными оси балки, искривляющейся в процессе изгиба.

На рис. 6.4 отрезки  $O'O'_1 = OO_1$  и согласно (6.4)  $\varepsilon_z = 0$ . Углы  $\alpha_1 = -\theta, \alpha_2 = \theta$ , т.е. прямой до изгиба угол между  $OO_1$  и  $OO_2$  остается прямым и после изгиба. Следовательно,  $\gamma_{xz} = \alpha_1 + \alpha_2 = 0$ .

Из равенства (6.6) получим уравнения для перемещений  $U$  и  $V$ :

$$\frac{\partial V}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0. \quad (6.7)$$

Из первого уравнения (6.7) следует, что вертикальное перемещение одинаково для всех точек сечения и зависит только от  $x$ .

$$V = v(x). \quad (6.8)$$

Рассмотрим второе уравнение

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -v'(x), \text{ где } v' = \frac{dv}{dx}.$$

Проинтегрируем его:

$$U = U(x) + z \cdot \theta(x), \quad (6.9)$$

где  $\theta(x) = -v'(x)$ .

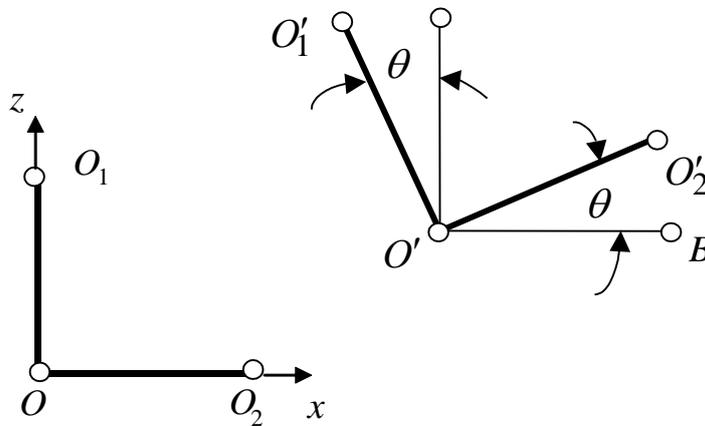


Рис. 6.4. Схема, поясняющая гипотезу плоских сечений

Здесь  $U(x)$  – произвольная функция интегрирования, равная продольному перемещению точек нейтральной оси

$$U(x) = U_0 \text{ при } z = 0.$$

Для однородной балки при отсутствии осевой силы нейтральная ось проходит посередине сечения  $U_0 = 0$ . Таким образом,  $U = z\theta(x)$ . Продольные перемещения точки сечения определяются углом поворота  $\theta = -v'$  и расстоянием точки до нейтральной линии.

Таким образом, гипотеза плоских сечений предопределяет распределение перемещений  $U$  и  $V$  по высоте балки и позволяет выразить их через две функции  $U(x)$  и  $V(x)$ . Гипотеза плоских сечений противоречит условиям равновесия, например, при поперечном изгибе.

Действительно, по гипотезе  $\gamma_{xz} = 0$ . Из выражения (6.3) следует, что либо  $\tau_{xz} = 0$ , либо  $G_{xz} = 0$ . Но  $G_{xz}$  не может быть равен 0. Этот результат противоречит уравнению равновесия. Для устранения про-

тиворечия заменим реальный материал некоторым условным материалом, обладающим  $G_{xz} \rightarrow \infty$ . Аналогично принимаем  $\varepsilon_z = 0$ . Это условие будет выполняться, если примем  $E_z \rightarrow \infty$  и  $v_{xz} = 0$ .

Таким образом, поведение балки будет точно соответствовать гипотезе плоских сечений, если материал является недеформируемым при сжатии по толщине и при сдвиге, т.е.

$$E_z \rightarrow \infty ; v_{xz} = 0 ; G_{xz} \rightarrow \infty . \quad (6.10)$$

С учетом равенств (6.6) и (6.10) первое уравнение (6.3) записывается в виде

$$\sigma_x = E_x \varepsilon_x = E_x \frac{\partial U}{\partial x} . \quad (6.11)$$

Подставим в (6.11) перемещение (6.9):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E_x \varepsilon_x = E_x \frac{\partial U}{\partial x} = E_x \frac{\partial}{\partial x} [U(x_0) + z\theta(x)] = \\ &= E_x \left( \frac{\partial}{\partial x} U(x_0) + z \frac{\partial}{\partial x} \theta(x) \right) = E_x [\varepsilon(0) + z\chi], \end{aligned} \quad (6.12)$$

где  $\chi = \theta' = -v''$  – кривизна оси балки;  $\varepsilon(0)$  – удлинение оси.

Равенство (6.12) определяет линейное изменение осевых напряжений по высоте балки. При этом постоянную составляющую можно привести к осевой силе  $N$ , а переменную – к изгибающему моменту  $M$  (рис. 6.5, 6.6).

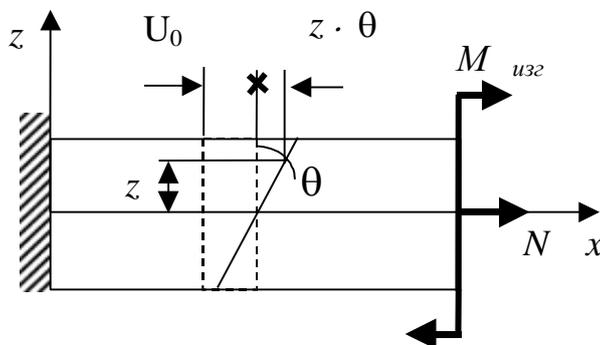


Рис. 6.5. Схема, поясняющая распределение деформаций продольных волокон балки при действии  $M_{изг}$  и продольной силы  $N$  с учетом гипотезы плоских сечений:  $U_0$  – продольное перемещение нейтральной линии;  $z \cdot \theta$  – перемещение,

вызванное изгибом;  $\theta$  – угол поворота сечения при изгибе

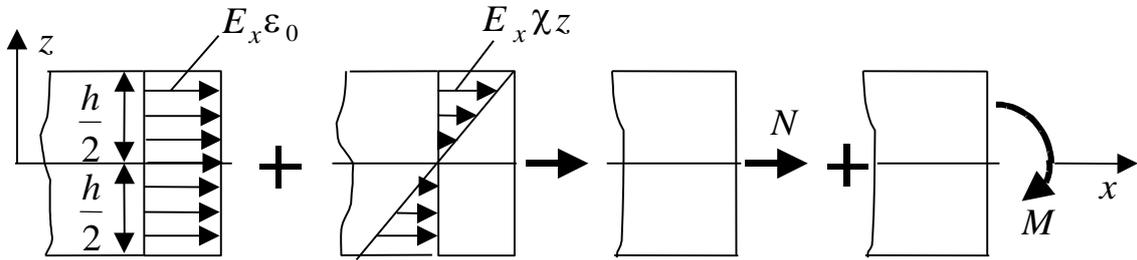


Рис. 6.6. Приведение осевых напряжений к осевой силе и изгибающему моменту

$$N = \int_{-0,5h}^{0,5h} \sigma_x b dz; \quad M = \int_{-0,5}^{0,5} \sigma_x b z dz. \quad (6.13)$$

Подставим в равенство (6.13) напряжения из (6.12):

$$N = \int_{-0,5h}^{0,5h} E_x (\varepsilon(0) + z\chi) b \cdot dz = E_x \varepsilon(0) b \cdot z \Big|_{-0,5h}^{0,5h} + E_x \frac{z^2}{2} \chi b \Big|_{-0,5h}^{0,5h} = E_x \varepsilon(0) b \cdot (0,5h + 0,5h) + 0 = B \varepsilon(0), \quad (6.14)$$

где  $B = E_x b h$ ;

$$M = \int E_x (\varepsilon(0) + z\chi) b z \cdot dz = E_x \frac{b h^3 \chi}{12} = D \chi,$$

где  $D = E_x \frac{b h^3}{12}$ .

Подставив  $\varepsilon(0)$  и  $\chi$  из равенств (6.14) в формулу (6.12), получим выражение для нормального осевого напряжения:

$$\sigma_x = E_x \left( \frac{N}{B} + \frac{M \cdot Z}{D} \right). \quad (6.15)$$

Определим напряжения  $\tau_{xz}$  и  $\sigma_z$ . Для этого воспользуемся уравнениями равновесия (6.1), (6.2) и граничными условиями:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -p, & \tau_{xz} &= 0 \text{ при } z = 0; \\ \sigma_z &= -q, & \tau_{xz} &= 0 \text{ при } z = h.\end{aligned}$$

Подставим (6.15) в уравнение (6.1):

$$\begin{aligned}b \frac{\partial}{\partial x} \sigma_x + \frac{\partial}{\partial z} (b \tau_{xz}) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial z} (b \tau_{xz}) &= -b \frac{\partial}{\partial x} \sigma_x, \\ b \tau_{xz} &= - \int_{-0,5h}^z b \frac{\partial}{\partial x} \sigma_x \cdot dz = - \int_{-0,5h}^z b \frac{\partial}{\partial x} E_x \left( \frac{N}{B} + \frac{MZ}{D} \right) \cdot dz; \\ \tau_{xz} &= -\frac{1}{b} \left( \int_{-0,5h}^z b E_x \frac{N'}{B} \cdot dz + \frac{M'}{D} \int_{-0,5h}^z b E_x z \cdot dz \right).\end{aligned}\tag{6.16}$$

Если принять  $b = \text{const}$ ,  $E_x = \text{const}$ , то

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= -\frac{1}{b} \left( \int_{-0,5h}^z \frac{N'}{h} dz + \frac{12 \cdot M'}{h^3} \int_{-0,5h}^z z dz \right) = \\ &= -\frac{1}{b} \left[ \frac{N'}{h} \left( z + \frac{h}{2} \right) + \frac{6M'}{h^3} \left( z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \right];\end{aligned}$$

Поскольку  $\tau_{xz} = 0$  при  $z = 0,5h$  и  $z = -0,5h$

$$\begin{aligned}0 &= -\frac{1}{b} \left( \frac{N'}{h} \left( \underbrace{\frac{h}{2} + \frac{h}{2}}_h \right) + \frac{6M'}{h^3} \left( \underbrace{\frac{h^2}{4} - \frac{h^2}{4}}_0 \right) \right) = -\frac{1}{b} N', \text{ откуда } N' = 0; \\ \tau_{xz} &= -\frac{6M'}{bh^3} \left( z^2 - \frac{h^2}{4} \right).\end{aligned}\tag{6.17}$$

Распределение  $\tau_{xz}$  по высоте балки показано на рис. 6.7.

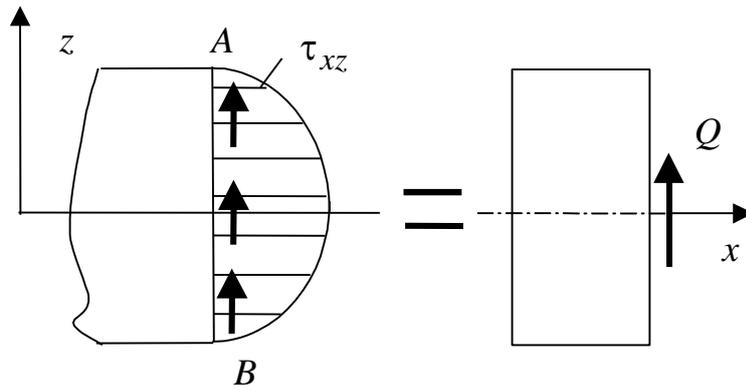


Рис. 6.7. Приведение касательных напряжений к поперечной силе

Согласно гипотезе плоских сечений при изгибе расстояние  $AB$  не изменяется, поэтому закон распределения  $\tau_{xz}$  по высоте балки не влияет на ее деформации. Существенна только равнодействующая этих напряжений, т.е. поперечная сила:

$$Q = \int_{-0,5h}^{0,5h} b\tau_{xz} dz. \quad (6.18)$$

Из дифференциальных зависимостей при изгибе известно, что:

$$Q = \frac{dM}{dx} = M'. \quad (6.19)$$

Окончательно для прямоугольного сечения касательные напряжения равны

$$\tau_{xz} = \frac{6Q}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right). \quad (6.20)$$

Перейдем к определению  $\sigma_z$ . Для чего в уравнение равновесия (6.2) подставим  $\tau_{xz}$  и проинтегрируем по  $z$  от  $-\frac{h}{2}$  до  $z$  с учетом граничного условия  $\sigma_z = -p$  при  $z = -\frac{h}{2}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z}(b\sigma_z) + b \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xz} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial z}(b\sigma_z) &= -b \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{6Q}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \right). \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(b\sigma_z) = -b \frac{6Q'}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right);$$

$$b\sigma_z = - \int_{-0,5h}^z \frac{b \cdot 6Q'}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) dz + C;$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= - \frac{1}{b} \frac{b \cdot 6Q'}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} z - \frac{z^3}{3} \right) \Big|_{-0,5h}^z + C = \\ &= - \frac{6Q'}{bh^3} \left[ \frac{h^2}{4} z - \frac{z^3}{3} + \frac{h^2}{4} (0,5h) - \frac{h^3}{8 \cdot 3} \right] + C = \\ &= - \frac{Q'}{bh^3} \left( \frac{h^3}{2} + \frac{3h^2 z}{2} - 2z^3 \right) + C. \end{aligned}$$

Постоянную  $C$  определим из условия  $\sigma_z = -p$  при  $z = -\frac{h}{2}$ .

$$\begin{aligned} -p &= - \frac{Q'}{bh^3} \left( \frac{h^3}{2} + \frac{3h^2 \left( -\frac{h}{2} \right)}{2} - 2 \left( -\frac{h}{2} \right)^3 \right) + C = \\ &= - \frac{Q'}{bh^3} \left( \frac{h^3}{2} - \frac{3h^3}{4} + \frac{h^3}{4} \right) + C = - \frac{Q'}{bh^3} \left( \underbrace{\frac{2h^3 - 3h^3 + h^3}{4}}_0 \right) + C, \end{aligned}$$

откуда  $C = -p$ .

$$\sigma_z = -p - \frac{Q'}{bh^3} \left( \frac{h^3}{2} + \frac{3h^2 z}{2} - 2z^3 \right). \quad (6.21)$$

Используем еще одно граничное условие при  $z = 0,5h$   $\sigma_z = -q$ , из которого определим

$$Q' = b(q - p). \quad (6.22)$$

Окончательно формула для  $\sigma_z$  при граничных условиях имеет вид:

$$\sigma_z = -p - (q - p) \left( \frac{1}{2} + \frac{3z}{2h} - \frac{2z^3}{h^3} \right). \quad (6.23)$$

Выше полученные уравнения позволяют определить все напряжения и перемещения. Уравнения (6.19) и (6.22) можно вывести, рассматривая равновесие элемента оси балки с приложенными к нему силами и моментами (рис. 6.8).

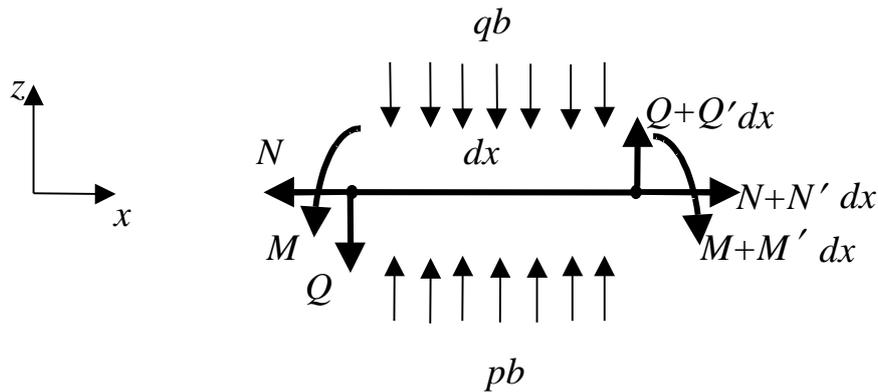


Рис. 6.8. Элемент оси балки с действующими нагрузками

Спроектируем все силы на ось  $x$

$$-N + N + N'dx = 0, \quad N' = 0.$$

Спроектируем все силы на ось  $z$

$$-Q - qb dx + pb dx + Q + Q'dx = 0, \\ Q' = b(q - p).$$

Вычислим сумму моментов относительно т.  $O$

$$Q dx + M + q \frac{dx^2}{2} - p \frac{dx^2}{2} - M - M' dx = 0,$$

$$Q = \frac{\frac{dM}{dx} dx + \overbrace{(p - q) \frac{dx^2}{2}}^{\frac{dM}{dx} dx}}{dx} = \frac{dM}{dx}.$$

## 6.2. Особенности изгиба балок из композиционных

## материалов

Рассмотренная выше теория изгиба балок предназначена для расчета сплошных балок из изотропных материалов. Тем не менее, эта теория успешно может быть использована и для расчета балок из композиционных материалов с учетом их особенностей.

Основная особенность таких балок – их слоистый характер. Балка может состоять из целого набора слоев, в котором каждый слой характеризуется своими упругими и прочностными свойствами.

На рис. 6.9 представлена консольная балка из композиционного материала,  $i$ -й слой которой характеризуется координатами  $z_{i-1}$  и  $z_i$ , шириной  $b_i$ , модулем упругости  $E_x^{(i)}$  и модулем сдвига  $G_{xz}^{(i)}$ . Так как слои располагаются произвольным образом по толщине балки, то средняя плоскость не является плоскостью симметрии. Поэтому в отличие от однородной балки координату  $z$  будем отсчитывать от нижней поверхности слоистой балки.

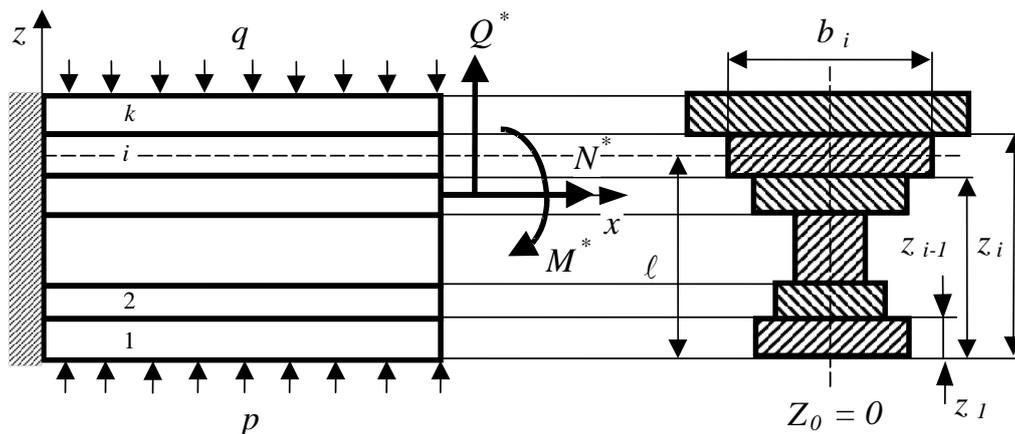


Рис. 6.9. Слоистая балка из композиционных материалов

Следующая особенность композитных балок связана с тем, что для них, как правило,  $E_x \gg G_{xz}$ ,  $E_x \gg E_z$ . Модуль упругости  $E_x$  определяется жесткостью волокон, укладываемых обычно в продольном направлении, а модули  $E_z$  и  $G_{xz}$ , называемые межслоевыми или трансверсальными, определяются в большей степени свойствами матрицы. Для современных композитов  $E_x/G_{xz} \approx 10 \dots 100$ ,  $E_x/E_z \approx 10 \dots 100$ .

В связи с этим гипотеза плоских сечений Бернулли-Эйлера не может в полной мере быть принята. Поясним это на соотношениях

между напряжениями  $\sigma_x, \tau_{xz}, \sigma_z$ . Дадим качественную оценку величин напряжений  $\sigma$  и  $\tau$  [40].

Для качественной оценки рассмотрим консольный стержень длиной  $\ell$  с приложенной на конце консоли силой  $F$  и жесткозакрепленной на другом конце (рис. 6.10). Предположим, что сечение стержня есть квадрат со стороной  $b$ . Наиболее опасным сечением является заделка. Выясним, какие напряжения возникнут в опасном сечении. Сила  $F$  стремится срезать балку. Для уравнивания силы  $F$  в сечении необходимо приложить касательные напряжения  $\tau$ , направленные вверх.

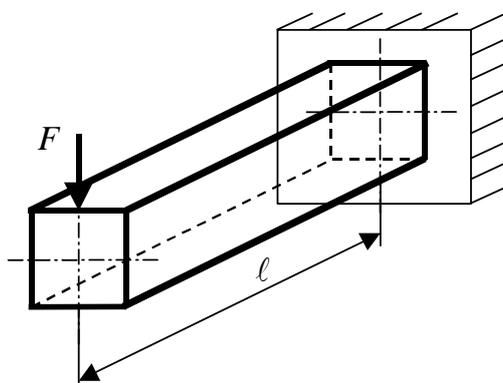


Рис. 6.10. Консольный стержень

Далее, сила  $F$  вызывает изгиб балки. Чтобы уравновесить момент силы относительно оси, лежащей в плоскости сечения, необходимо рассмотреть в сечении нормальные напряжения  $\sigma$ . Так как силы, направленные по оси стержня, отсутствуют, в сечении должны быть и растягивающие и сжимающие напряжения, причем в верхней части они будут растягивающими, в нижней – сжимающими.

Составляя уравнения моментов относительно горизонтальной оси, проведенной в опасном сечении, найдем, что момент внешней силы есть  $F\ell$ . Момент внутренних сил в сечении зависит только от  $\sigma$  и размеров сечения, то есть величины  $b$ . Максимальные нормальные напряжения будут равны

$$\sigma_x = \frac{M}{W_y} = \frac{6 \cdot F \cdot \ell}{b^3} \sim \frac{F \cdot \ell}{b^2 \cdot b}. \quad (6.24)$$

Знак  $\sim$  указывает, что нормальные напряжения имеют порядок  $\frac{F \cdot \ell}{b^2 \cdot b}$ . Перейдем к оценке  $\tau$ .

Предположим, что напряжения распределены равномерно. Тогда

$$\tau = \frac{F}{b^2}. \quad (6.25)$$

На самом деле напряжения распределены неравномерно. Для рассматриваемой балки

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{F}{b^2}.$$

Максимальное значение отличается от полученного выше лишь числовым множителем, никаких других размерных величин в формулу не входит. Будем говорить, что касательные напряжения  $\tau$  имеют порядок

$$\tau \sim \frac{F}{b^2}.$$

Сравним величины  $\sigma$  и  $\tau$ . При увеличении длины балки с сохранением ее поперечного сечения касательные напряжения остаются неизменными, а нормальные возрастают пропорционально длине. Таким образом, всегда можно подобрать настолько большое отношение  $\frac{\ell}{b}$ , чтобы касательные напряжения составляли малую долю от наибольших нормальных. Таким образом,

$$\tau \sim \frac{b}{\ell} \sigma_x. \quad (6.26)$$

Обозначим отношение высоты сечения  $b$  к  $\ell$  через  $\bar{b} = \frac{b}{\ell}$ , тогда  $\tau \sim \bar{b} \sigma_x$ .

Если на балку действует распределенная поверхностная нагрузка (рис. 6.11), то в плоскостях, параллельных оси стержня, нормальные напряжения весьма малы по сравнению с нормальными и касательными напряжениями в плоскостях, перпендикулярных оси стержня.

Действительно, вся сила, действующая на балку, равна:

$$F = p \cdot \ell \cdot b,$$

где  $p$ , Н/м<sup>2</sup> – распределенная нагрузка на единицу площади.

Приведем распределенную по площади балки нагрузку к стандартной распределенной нагрузке на единицу длины  $q$ :

$$q = \frac{F}{\ell} = pb, \text{ Н/м.}$$

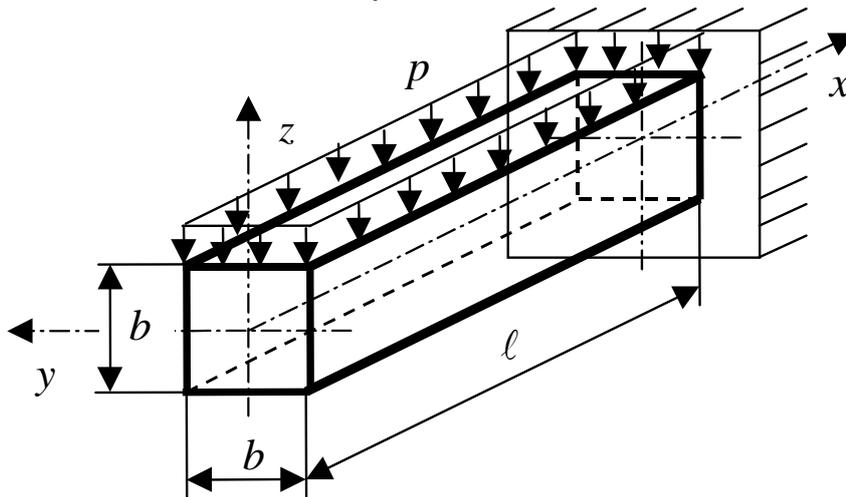


Рис. 6.11. Консольная балка с распределенной нагрузкой

Максимальные нормальные напряжения  $\sigma_x$  в заделке будут равны:

$$\sigma_x = \frac{M_{изг}}{W_y} = \frac{6 \cdot pb \cdot \ell^2}{2 \cdot b^3} \sim p \frac{\ell^2}{b^2}. \quad (6.27)$$

Рассечем балку горизонтальной плоскостью. В этой плоскости будут действовать нормальные напряжения  $\sigma_z$ . Если плоскость близка к верхней граничной плоскости, то  $\sigma_z$  будет мало отличаться от  $(-p)$ ; если плоскость сечения будет близка к нижней граничной плоскости, то  $\sigma_z$  будет стремиться к нулю, так как нижняя плоскость свободна от нагрузок.

Итак, максимальное значение  $\sigma_z$  имеет оценку

$$\sigma_z \sim p.$$

Сравнивая  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ , видим, что  $\sigma_z$  очень мало по сравнению с  $\sigma_x$ . Если порядок малости касательных напряжений по сравнению с  $\sigma_x$

составляет  $\frac{b}{\ell}$ , то порядок малости  $\sigma_z$  составляет  $\frac{b^2}{\ell^2}$ , или  $\sigma_z \sim \bar{b}^2 \sigma_x$ , где  $\bar{b} \ll 1$ .

Подобным образом оценим деформации, считая для упрощения коэффициенты Пуассона равными нулю. Запишем выражения для напряжений в виде  $\sigma_x = E_x \varepsilon_x$ ,  $\sigma_z = E_z \varepsilon_z$ ,  $\tau_{xz} = G_{xz} \gamma_{xz}$ .

$$\sigma_x \sim E_x \varepsilon_x, \quad (6.28)$$

$$\gamma_{xz} \sim \frac{\tau_{xz}}{G_{xz}}, \quad (6.29)$$

$$\varepsilon_z \sim \frac{\sigma_z}{E_z}. \quad (6.30)$$

Подставим вместо  $\tau_{xz}$ ,  $\sigma_z$  их соотношения через  $\sigma_x$ , получим:

$$\varepsilon_x \sim \frac{\sigma}{E_x}, \quad (6.31)$$

$$\gamma_{xz} \sim \bar{b} \frac{E_x \varepsilon_x}{G_{xz}}, \quad (6.32)$$

$$\varepsilon_z \sim \bar{b}^2 \frac{E_x \varepsilon_x}{E_z}. \quad (6.33)$$

Предположим, что модули  $E_x$ ,  $E_z$  и  $G_{xz}$  имеют одинаковый порядок (для металлов  $E_x = E_z$ ,  $G = 0,6E_x$ ). Тогда для балок, длина которых значительно больше высоты сечения (т.е.  $\bar{b} \ll 1$ ), получим  $\varepsilon_x \gg \gamma_{xz} \gg \varepsilon_z$ .

Пусть, например, относительная толщина балки  $\bar{b} = 0,01$ . Для традиционного конструкционного материала (металла), у которого  $\frac{E_x}{G_{xz}} \sim 1$  и  $\frac{E_x}{E_z} \cong 1$  из (6.32), (6.33) получим

$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &\approx 10^{-2} \varepsilon_x, \\ \varepsilon_z &\approx 10^{-4} \varepsilon_x. \end{aligned}$$

Таким образом, деформации  $\gamma_{xz}$  и  $\varepsilon_z$  можно считать малыми по сравнению с  $\varepsilon_x$ , а гипотезу Бернулли – Эйлера, согласно которой

$\gamma_{xz} = \varepsilon_z = 0$ , удовлетворительно отражающей поведение балок из традиционных материалов.

Иное дело для композитов, у которых  $E_x/G_{xz} \approx 10 \dots 100$ ,  $E_x/E_z \approx 10 \dots 100$ .

$$\gamma_{xz} \approx (0,1 \dots 1) \varepsilon_x, \quad (6.34)$$

$$\varepsilon_z \approx (10^{-2} \div 10^{-3}) \varepsilon_x. \quad (6.35)$$

Таким образом,  $\gamma_{xz}$  по сравнению с  $\varepsilon_x$  не является малой.

Что касается  $\varepsilon_z$ , то с достаточной для инженерных расчетов точностью, можно принять ее малой по сравнению с  $\varepsilon_x$  и принять гипотезу недеформируемости сечения в направлении  $z$ , т.е.  $\varepsilon_z = 0$ . В этом случае справедливо утверждение, что  $v(x)$  – прогиб нейтральной оси равен прогибу всего сечения.

### 6.3. Определение прогибов композиционных балок при поперечном изгибе

Принципиальных отличий расчета на прочность композиционных однородных анизотропных балок от изотропных нет. Методы определения нормальных напряжений  $\sigma_z$  (по направлению нормали к оси балки), изгибных нормальных напряжений  $\sigma_x$  (по направлению оси балки) и касательных межслойных напряжений  $\tau_{xz}$  при поперечном изгибе ничем не отличаются от определения аналогичных напряжений в изотропных балках и базируются на одинаковых предпосылках. К особенностям расчета на прочность композитных балок при поперечном изгибе следует отнести обязательную проверку на условие прочности по межслойным касательным напряжениям в опасных сечениях (максимальные касательные напряжения  $\tau_{xz}$  в опасном сечении возникают на уровне центральной линии сечения).

$$\tau_{xz \max} \leq [\tau_{xz}],$$

где  $[\tau_{xz}]$  – допускаемое напряжение.

Как было показано выше, основная особенность расчета композитных балок на жесткость (при поперечном изгибе) заключается в

учете дополнительного прогиба от сдвиговых деформаций. Прогиб при поперечном изгибе складывается от прогиба от изгибающего момента и прогиба, вызванного сдвиговыми деформациями от касательных напряжений  $\tau_{xz}$  (рис. 6.12).

$$w_{\text{полн}} = w_{\sigma} + w_{\tau},$$

где  $w_{\sigma}$  – прогиб от изгибающего момента;  $w_{\tau}$  – прогиб от сдвиговых деформаций.

Поперечная сила в каждом сечении равна  $F$ , поэтому усредненный угол сдвига  $\psi$  в каждом сечении одинаков. Прогиб в сечении  $x$  от сдвига может быть вычислен по формуле  $w_{\tau} = \psi \cdot x$ . В случае двухопорной балки (рис. 6.13) усредненный по высоте сечения угол сдвига  $\psi$  является функцией от координаты  $x$ .

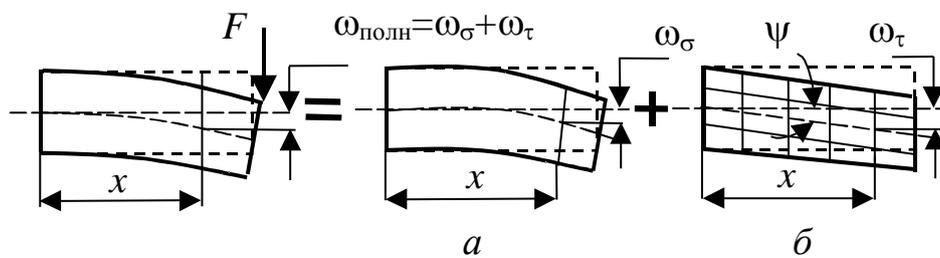


Рис. 6.12. Прогиб консольной балки от поперечной силы  $F$ :

- $a$  –  $w_{\sigma}$  – составляющая от изгибающего момента;
- $b$  –  $w_{\tau}$  – составляющая от сдвиговых деформаций (показан усредненный по высоте сечения сдвиг  $\psi$ )

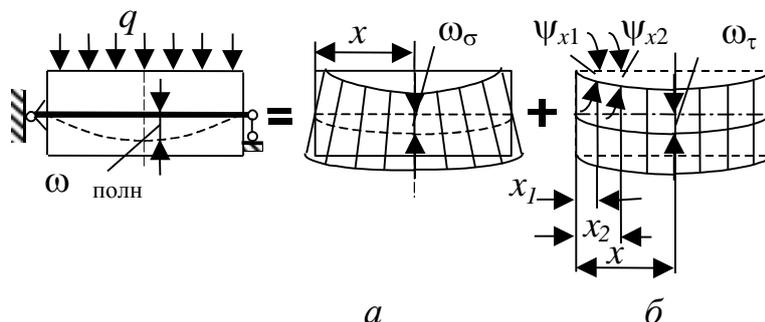


Рис. 6.13. Прогибы двухопорной балки от распределенной нагрузки:

- $a$  –  $w_{\sigma}$  – составляющая прогиба от изгибающего момента в сечении  $x$ ;
- $b$  –  $w_{\tau}$  – составляющая прогиба от сдвига;  $\psi_{x1}$  и  $\psi_{x2}$  – углы сдвига в сечениях  $x_1$  и  $x_2$

Относительная величина прогиба от сдвига по сравнению с прогибом от изгибающего момента зависит от соотношения высоты сечения балки и ее длины, от угла укладки армирующих волокон по отношению к оси балки, от деформативных свойств монослоев, от симметрии структуры слоистого композита.

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать вывод о том, что в отличие от методов по определению перемещений однородных изотропных балок перемещения балок из слоистых композиционных материалов должны определяться, как правило, с учетом сдвиговых деформаций, вызванных поперечными силами.

Существует несколько методов определения перемещения балок с учетом поперечных сил.

Рассмотрим наиболее широко используемый энергетический метод Мора. Еще раз подчеркнем, что рассматривается слоистая композиционная балка, структура которой симметрична относительно ее срединной плоскости.

Метод Мора построен на основе принципа возможной (виртуальной) работы. Этот принцип можно сформулировать следующим образом: если система находится в равновесии под действием приложенной нагрузки, то сумма работ внешних и внутренних сил на возможных бесконечно малых перемещениях точек системы равна нулю

$$\sum F_i \Delta_{im} + W_{im} = 0,$$

где  $F_i$  – внешние силы;  $\Delta_{im}$  – возможные перемещения этих сил;  $\sum F_i \Delta_{im}$  – возможная работа внешних сил;  $W_{im}$  – работа внутренних сил.

Необходимо подчеркнуть, что в процессе совершения системой возможного перемещения величина и направление внутренних и внешних сил остаются неизменными. Поэтому при вычислении работ следует брать не половину, а полную величину произведения соответствующих сил и перемещений.

В качестве возможных перемещений принимают упругие перемещения, вызванные любым видом нагрузки (силовой, температурной) и происходящие без нарушения связей.

Общее выражение начала возможных перемещений для плоской упругой стержневой системы

$$\sum F_a \Delta_{ab} - \left[ \sum_{\ell} \int M_a (d\varphi)_b + \sum_{\ell} \int N_a (\Delta ds)_b + \sum_{\ell} \int Q_a (\gamma ds)_b \right] = 0, \quad (6.36)$$

или

$$\sum F_a \Delta_{ab} - \left[ \sum_{\ell} \int \frac{M_a M_b ds}{EJ} + \sum_{\ell} \int \frac{N_a N_b ds}{EA} + \sum_{\ell} \int \frac{K Q_a Q_b ds}{GF} \right] = 0,$$

где  $(d\varphi)_b = \frac{M_b ds}{EJ}$  – взаимный угол поворота граней элемента,

вызванный изгибающими моментами;

$(\Delta ds)_b = \frac{N_b ds}{EA}$  – удлинение элемента, вызванное силой  $N_b$ ;

$(\gamma ds)_b = \frac{K Q_b ds}{GF}$  – взаимный сдвиг граней элемента, вызванный по-

перечными силами  $Q_b$ .

Итак, если упругая система находится в равновесии, то работа внешних и внутренних сил на возможных перемещениях, вызванных другой произвольной нагрузкой, равна нулю.

### ***Метод Мора для определения перемещений композитных балок***

Метод Мора рассмотрим на конкретных примерах. Рассмотрим произвольную плоскую стержневую систему (рис. 6.14), нагруженную заданными силами  $F$ . Усилия в произвольном сечении системы обозначим через  $M_F, Q_F, N_F$ . Требуется определить перемещение  $\Delta_{1F}$  точки  $C$  по направлению 1 – 1.

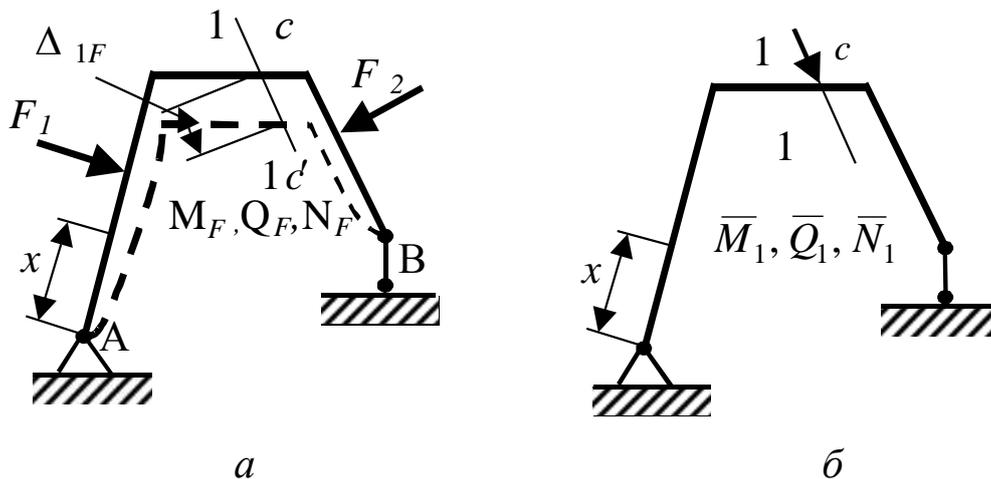


Рис. 6.14. Плоская стержневая система (а), нагруженная силами  $F$ , (б) – вспомогательное состояние с приложенной в т. С единичной силой в направлении искомого перемещения

Введем вспомогательное состояние (рис. 6.14,б), представляющее собой заданную систему, нагруженную лишь одной единичной силой, приложенной в точке С, в которой надлежит найти перемещение  $\Delta_{1F}$ . Усилия в произвольном сечении вспомогательного состояния, вызванные действием единичной силы, обозначим через  $\bar{M}_1, \bar{Q}_1, \bar{N}_1$ .

Применим принцип возможных перемещений для *вспомогательного* состояния, принимая в качестве возможных действительное перемещение точки С от внешних сил  $F$ . Согласно формуле (6.36)

$$1 \cdot \Delta_F = \sum \int \frac{\bar{M}_1 M_F dx}{EJ} + \sum \int \frac{\bar{N}_1 N_F dx}{EA} + \sum \int K \frac{\bar{Q}_1 Q_F dx}{GA}. \quad (6.37)$$

Выражение (6.37) является общей формулой для упругого перемещения плоской стержневой системы.

Рассмотрим примеры применения метода Мора для определения перемещений в стержневых системах.

Требуется определить максимальный прогиб посередине пролета шарнирно опертой композитной балки ( $EJ = \text{const}$ ), нагруженной равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью  $q$  (рис. 6.15). Балка изготовлена из ортотропных слоев стеклопластика, симметрично расположенных относительно срединной плоскости. Укладка слоев  $0 / 90^\circ$ . Модуль продольной упругости слоистого пакета  $E_x$ . Мо-

дугль межслойного сдвига  $G_{xz} = 0,1 \cdot E_x$ . Коэффициент армирования  $\psi = 0,6$ . Сечение балки – прямоугольное, высотой  $h$  и шириной  $b$ .

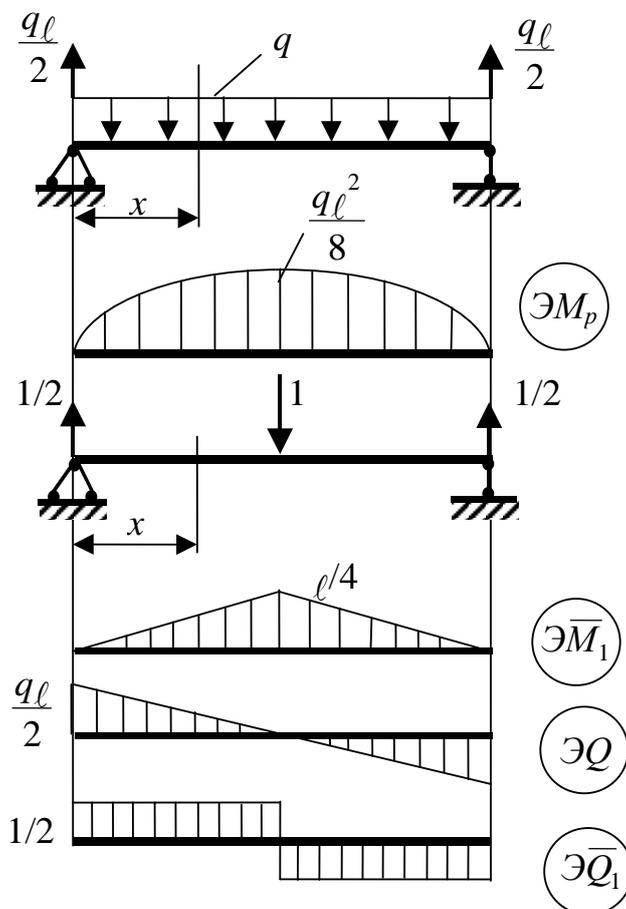


Рис. 6.15. Расчетная схема балки для определения прогиба посередине пролета

Для определения прогиба посередине пролета прикладываем в подобном сечении вспомогательной балки единичную сосредоточенную силу.

В продольном сечении первого участка балки ( $0 \leq x \leq \ell/2$ )

$$M_F(x) = \frac{q\ell}{2} \cdot x - \frac{qx^2}{2}; \quad \bar{M}_1(x) = \frac{1}{2}x;$$

$$Q_F(x) = \frac{q\ell}{2} - qx; \quad \bar{Q}_1(x) = \frac{1}{2}.$$

На основании равенства (6.37) прогиб, вызванный изгибающим моментом и поперечной силой, будет равен

$$\begin{aligned}
\Delta_{1F} &= \Delta_{1F}^M + \Delta_{1F}^Q = 2 \int_0^{\ell/2} \frac{M_F(x) \bar{M}_1(x) dx}{E_x J_y} + 2 \int_0^{\ell/2} K \frac{Q_F \bar{Q}_1}{G_{xz} A} dx = \\
&= \frac{2}{E_x J_y} \cdot \int_0^{\ell/2} \left( \frac{q\ell}{2} x - \frac{qx^2}{2} \right) \cdot \frac{x}{2} dx + \frac{2K}{G_{xz} A} \cdot \int_0^{\ell/2} \left( \frac{q\ell}{2} - qx \right) \cdot \frac{1}{2} dx = \\
&= \frac{5}{384} \cdot \frac{q\ell^4}{E_x J_y} + K \frac{q\ell^2}{8G_{xz} A}.
\end{aligned}$$

Коэффициент 2 перед интегралами учитывает симметрию эпюр изгибающих моментов и поперечных сил. Коэффициент формы для прямоугольного сечения  $K = 1,2$ ;  $G_{xz} = 0,1E_x$ .

Суммируя выражения для перемещений, получим

$$\Delta_{1F} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q\ell^4}{E_x J_y} + \frac{3}{2} \cdot \frac{q\ell^2}{E_x A} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q\ell^4}{E_x J_y} \left( 1 + 9,6 \frac{h^2}{\ell^2} \right).$$

Второй член в скобках отражает влияние поперечной силы. При  $\frac{h}{\ell} = 0,1$  он равен 0,096. Следовательно, прогиб, вызванный поперечной силой, для рассматриваемой балки составляет около 10 % от прогиба, вызванного изгибающим моментом.

При  $\frac{h}{\ell} = 0,2$  прогиб от поперечной силы будет составлять 38 % от прогиба, вызванного изгибающим моментом.

На рис. 6.16 приводятся зависимости относительной разницы прогиба в центре шарнирно опертой балки прямоугольного сечения из косоугольно армированного углепластика с учетом и без учета поперечных сил ( $\Delta_T$  – соответствует прогибу, определенному без учета действия поперечных сил).

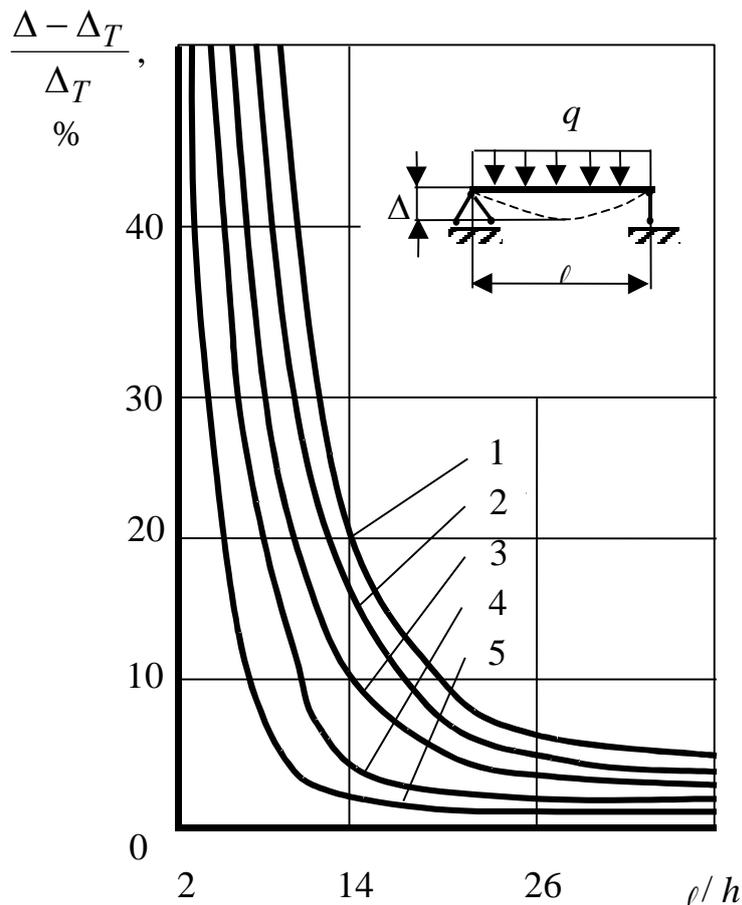


Рис. 6.16. Зависимость относительной разницы прогиба в центре шарнирно опертой балки прямоугольного сечения из косоугольно армированного **симметричноуложенного** углепластика от отношения длины к высоте поперечного сечения:

1 –  $\beta = 0^\circ$ ; 2 –  $\beta = 15^\circ$ ; 3 –  $30^\circ$ ; 4 –  $45^\circ$ ; 5 –  $90^\circ$ ;

$\beta$  – угол укладки слоев по отношению к продольной оси балки

Как следует из результатов, представленных на рис. 6.16, учет поперечных сил при анализе деформативных свойств стержневых систем при изгибе существенно зависит от отношения длины стержня к его высоте ( $\frac{l}{h}$ ), схемы армирования, симметрии укладки слоев, деформативных свойств монослоев [40].

Наибольшее отличие прогибов балки, определенных с учетом действия поперечных сил, от соответствующих прогибов, вызванных изгибающими моментами, наблюдается у наиболее анизотропных структур ( $\beta = 0^\circ$ ). С увеличением угла укладки  $\beta$  это отличие уменьшается в силу уменьшения жесткости балки ( $EJ$ ) на изгиб (с увеличением  $\beta$  продольный модуль упругости материала слоистой балки уменьшается) и, соответственно, увеличения прогиба от изгибающе-

го момента. Составляющая прогиба от поперечной силы зависит от модуля межслойного сдвига, который в меньшей мере зависит от угла укладки слоев.

Таким образом, определение перемещений стержневых систем при поперечном изгибе, как правило, должно проводиться с учетом поперечных сил.

**ПРИМЕР.** Поперечный изгиб слоистого стержня.

Определение нормальных и касательных напряжений в слоях

Рассмотрим изгиб слоистого стержня под действием поперечной нагрузки (рис. 6.17). Стержень покоится на двух опорах. Структура слоистого стержня относительно срединной плоскости симметричная. Укладка косоугольная. Каждому слою с углом укладки волокон относительно продольной оси  $+\alpha_k$  соответствует такой же слой с углом укладки  $-\alpha_k$  и находящийся на таком же расстоянии от срединной плоскости. Определить нормальные и касательные напряжения в слоях.

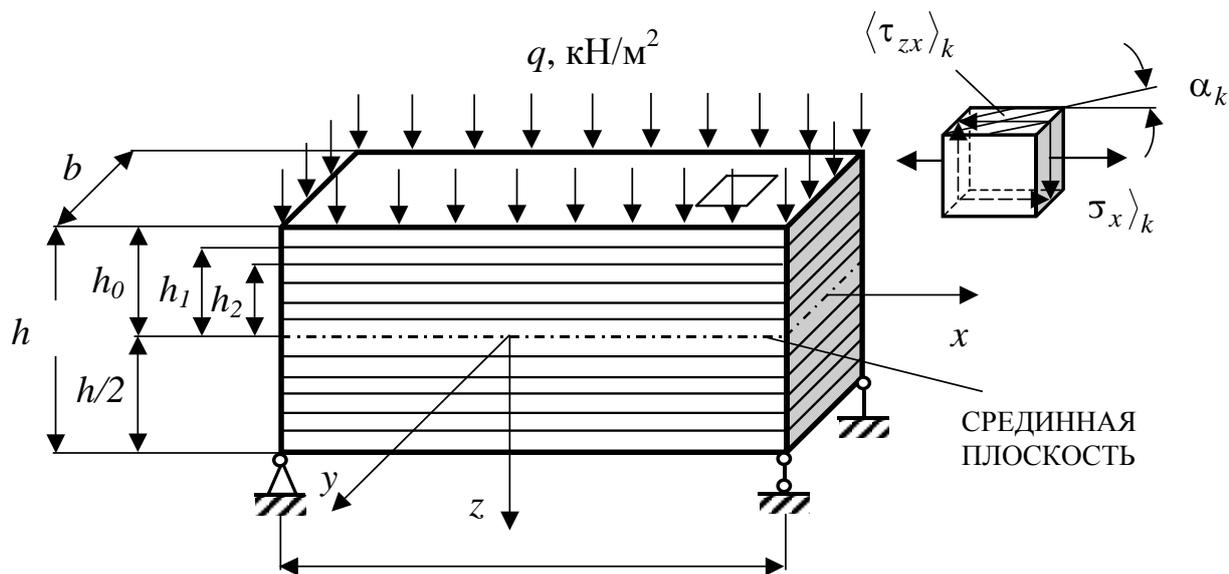


Рис. 6.17. Расчетная схема стержня при изгибе

Считаем, что в поперечном сечении стержня возникают только нормальные  $\langle \sigma_x \rangle_k$  и касательные напряжения  $\langle \tau_{xz} \rangle_k$ . Напряжениями  $\langle \sigma_z \rangle_k, \langle \tau_{yz} \rangle_k, \langle \sigma_y \rangle_k$  ввиду их относительной малости можно пренебречь.

Приведем расчетную схему к схеме с единичной шириной (рис. 6.18).

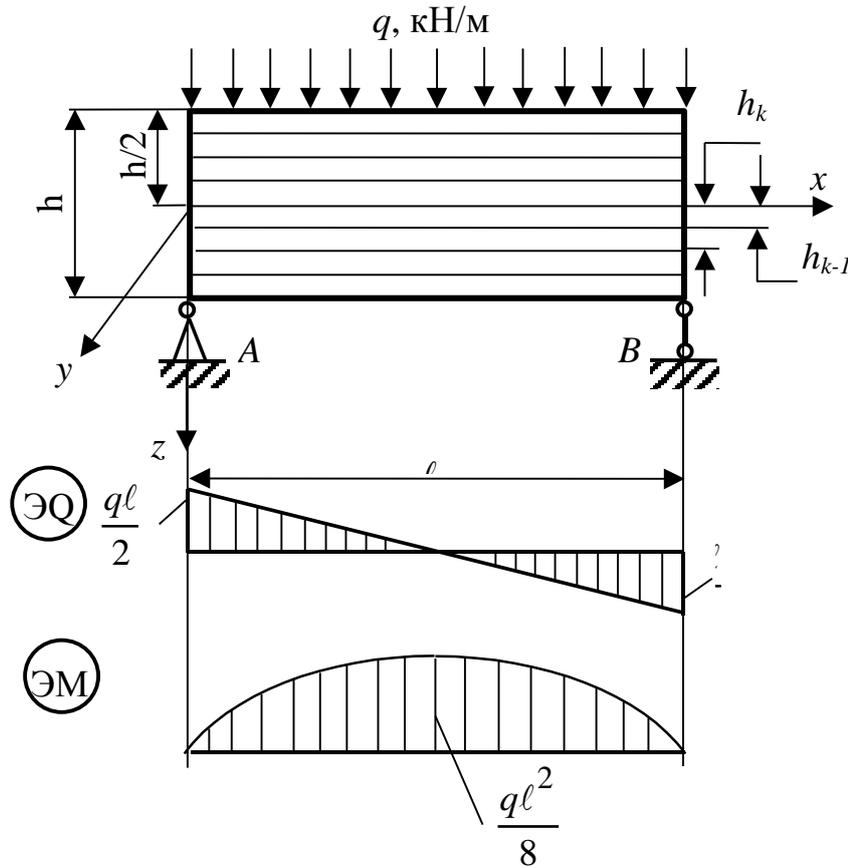


Рис. 6.18. Расчетная схема балки с единичной шириной и эпюрами перерезывающих сил и изгибающих моментов

Рассмотрим последовательность расчета, двигаясь от более общего случая, рассмотренного в разделе 6 (см. рис. 6.1), где представлена расчетная схема слоистого композита и обобщенный закон деформирования слоистого материала, к схеме ортотропной балки при поперечном изгибе.

Запишем обобщенный закон деформирования слоистого композита, когда слои уложены под произвольным углом, но симметрично относительно срединной плоскости. В этом случае  $B_{ij} = 0$ .

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \langle \varepsilon_x^\circ \rangle \\ \langle \varepsilon_y^\circ \rangle \\ \langle \gamma_{xy}^\circ \rangle \end{bmatrix}, \quad (6.38)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x^\circ \\ K_y^\circ \\ K_{xy}^\circ \end{bmatrix}, \quad (6.39)$$

где

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \sigma_x \rangle_k dz; & M_x &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \sigma_x \rangle_k z dz; \\ N_y &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \sigma_y \rangle_k dz; & M_y &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \sigma_y \rangle_k z dz; \\ N_{xy} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \tau_{xy} \rangle_k dz; & M_{xy} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \tau_{xy} \rangle_k z dz. \end{aligned} \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}); \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2); \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \end{aligned} \quad (6.41)$$

В нашем случае в поперечном сечении слоистого композита возникают изгибающий момент  $M$  относительно оси  $y$  и перерезывающая сила  $Q$  (рис. 6.19). Остальные силовые факторы  $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_{xy} = 0$ .

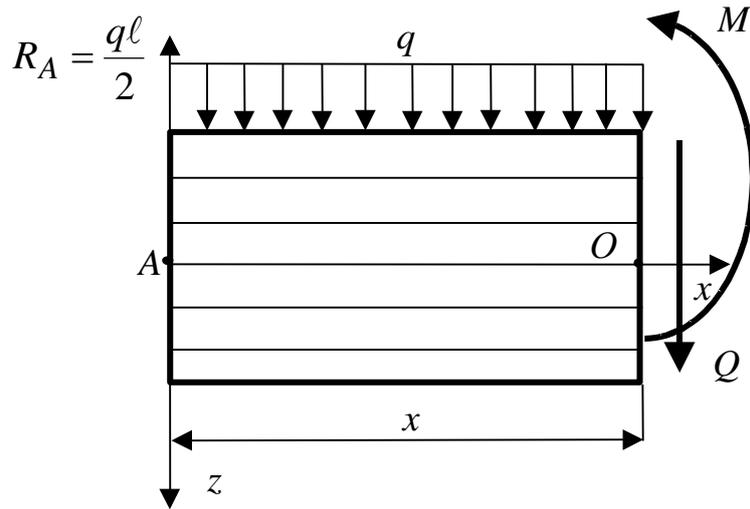


Рис. 6.19. Внутренние силовые факторы в поперечном сечении балки

Соответственно, в поперечном сечении в каждом слое возникнут нормальные напряжения (от изгибающего момента) и касательные (от поперечной силы).

Определим вначале нормальные напряжения. Выразим изгибающий момент в сечении (напомним, что речь идет об изгибающем моменте на единицу ширины сечения балки  $\frac{M}{b} = M_x$ ) через нормальные напряжения в слоях

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \langle \sigma_x \rangle_k z dz. \quad (6.42)$$

Выразим  $\langle \sigma_x \rangle_k$  через закон деформирования ортотропного слоя. Напомним, что структура слоев симметричная, укладка косоугольная. Каждому слою с углом укладки  $+\alpha$  соответствует слой с углом укладки  $-\alpha$  (при одинаковом расстоянии от срединной плоскости). Для такой структуры коэффициенты в обобщенном законе деформирования (6.36)  $B_{ij} = 0$ ;  $A_{16} = A_{26} = D_{16} = D_{26} = 0$ .

Выразим из закона деформирования (6.38) деформации срединной плоскости  $\langle \varepsilon_x^\circ \rangle, \langle \varepsilon_y^\circ \rangle, \langle \gamma_{xy}^\circ \rangle, K_x^\circ, K_y^\circ, K_{xy}^\circ$ .

Запишем их в матричном виде

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \langle \varepsilon_x^\circ \rangle \\ \langle \varepsilon_y^\circ \rangle \\ \langle \gamma_{xy}^\circ \rangle \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & A'_{16} \\ A'_{12} & A'_{22} & A'_{26} \\ A'_{16} & A'_{26} & A'_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} K_x^\circ \\ K_y^\circ \\ K_{xy}^\circ \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D'_{11} & D'_{12} & D'_{16} \\ D'_{12} & D'_{22} & D'_{26} \\ D'_{16} & D'_{26} & D'_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (6.43)$$

Из теории слоистых материалов следует, что напряжение в слое  $K$  определяется по формуле (5.31)

$$\begin{aligned} \langle \sigma_x \rangle_k &= (\bar{Q}_{11})_k \langle \varepsilon_x^\circ \rangle + (\bar{Q}_{12})_k \langle \varepsilon_y^\circ \rangle + (\bar{Q}_{16})_k \langle \gamma_{xy}^\circ \rangle + \\ &+ z \left[ (\bar{Q}_{11})_k K_x^\circ + (\bar{Q}_{12})_k K_y^\circ + (\bar{Q}_{16})_k K_{xy}^\circ \right]. \end{aligned} \quad (6.44)$$

В нашем случае

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_x^\circ \rangle = \langle \varepsilon_y^\circ \rangle = \langle \gamma_{xy}^\circ \rangle = 0, \quad K_{xy}^\circ = 0, \\ A'_{16} = A'_{26} = D'_{16} = D'_{26} = 0. \end{aligned}$$

$$\text{Тогда } \langle \sigma_x \rangle_k = (\bar{Q}_{11})_k K_x^\circ z_k + (\bar{Q}_{12})_k K_y^\circ z_k,$$

$$\text{где } K_x^\circ = D'_{11} M_x; \quad K_y^\circ = D'_{21} M_x. \quad (6.45)$$

Подставим в зависимость (6.42) выражения для  $K_x$  и  $K_y$ , учитывая, что  $M = M_x \cdot b$ . Получим

$$\langle \sigma_x \rangle_k = z_k \cdot \left[ (\bar{Q}_{11})_k D'_{11} \frac{M}{b} + (\bar{Q}_{12})_k D'_{12} \frac{M}{b} \right]. \quad (6.46)$$

Формула устанавливает закон распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения слоистого стержня ортотропной структуры.

Если соотношение пролета  $\ell$  и ширины  $b$  поперечного сечения стержня достаточно большое, то при изгибе можно пренебречь влиянием составляющей матрицы податливости  $D'_{21}$ . Тогда

$$\langle \sigma_x \rangle_k = \frac{M}{b} (\bar{Q}_{11})_k D'_{11} \cdot z_k. \quad (6.47)$$

При определении податливости  $D'_{11}$  используем выражения для  $M_x$  из зависимости (5.38)

$$M_x = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\bar{Q}_{11})_k \cdot K_x \cdot z_k^2 dx. \quad (6.48)$$

В этом выражении  $K_x$  не является функцией  $z$ .  $(\bar{Q}_{11})_k$  в пределах толщины слоя  $(z_k - z_{k-1})$  остается постоянной. Тогда после интегрирования получаем

$$M_x = \frac{1}{3} \left[ (\bar{Q}_{11})_1 (z_1^3 - z_0^3) + (\bar{Q}_{11})_2 (z_2^3 - z_1^3) + \right. \\ \left. (\bar{Q}_{11})_3 (z_3^3 - z_2^3) + \dots + (\bar{Q}_{11})_n (z_n^3 - z_{n-1}^3) \right] \cdot K_x \quad (6.49)$$

или 
$$M_x = \frac{1}{3} K_x \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{11})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = D_{11} \cdot K_x, \quad (6.50)$$

где

$$D_{11} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{11})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (6.51)$$

Изгибающий момент в сечении стержня шириной  $b$  будет равен

$$M = M_x \cdot b = D_{11} \cdot K_x \cdot b. \quad (6.52)$$

Выражение  $D_{11} \cdot b$  представляет собой изгибную жесткость стержня. Из выражения (6.45) определяется кривизна срединной плоскости

$$K_x = \frac{M}{D_{11} \cdot b}. \quad (6.53)$$

Сравнивая (6.53) и (6.45), получим

$$D'_{11} = \frac{1}{D_{11}}. \quad (6.54)$$

Подставляя (6.54) в (6.47), получим

$$\langle \sigma_x \rangle_k = \frac{M}{b} \cdot \frac{(\bar{Q}_{11})_k z_k}{D_{11}}, \quad (6.55)$$

где

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \alpha_k + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \alpha_k \cos^2 \alpha_k + Q_{22} \sin^4 \alpha_k;$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad Q_{22} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad Q_{66} = G_{12}.$$

Область применимости приведенных выше формул для определения нормальных напряжений при поперечном изгибе тесно связано с особенностями диаграммы деформирования композиционного материала. Эта связь заключается в том, что многим армированным пластикам при растяжении свойственно многоступенчатое разрушение. В пределах относительных деформаций при растяжении  $\varepsilon_0 = 0,5 \div 2,5$  может наблюдаться одно или двухступенчатое разрушение. Под разрушением здесь понимается появление на диаграмме деформирования зон изменения угла наклона диаграммы, которое происходит из-за накопления повреждений в процессе деформирования (рис. 6.20).

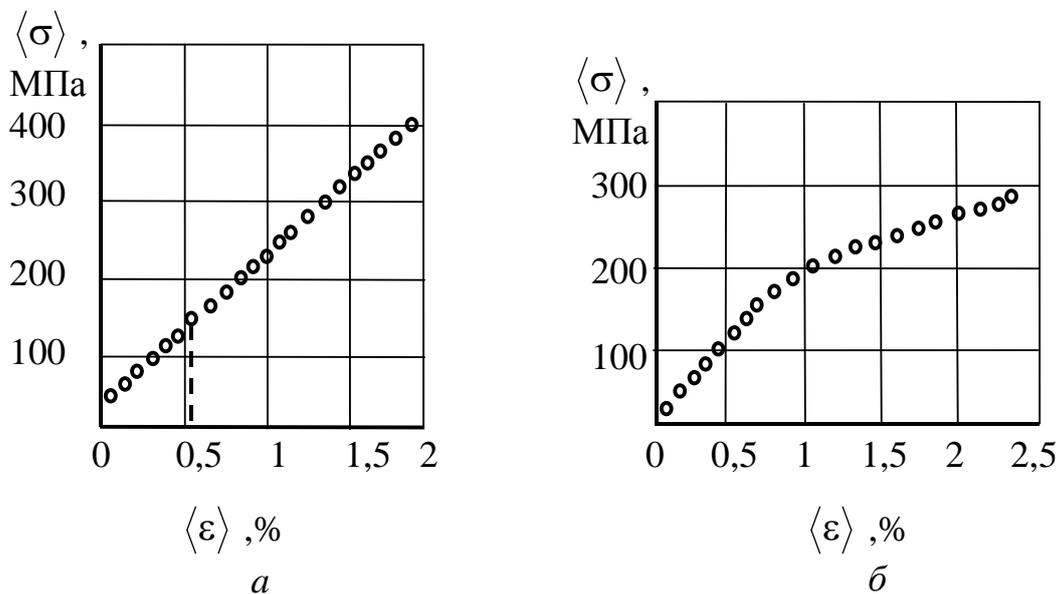


Рис. 6.20. Диаграммы деформирования ортогонально армированного пластика (1:1) (а) и пластика, армированного тканью (б)

После первой ступени разрушения слоистая структура стержня становится несимметричной относительно срединной плоскости, и коэффициент  $B_{11} \neq 0$ . Более того, модули упругости на растяжение и сжатие становятся различными, в материале появляется бимодуль-

ность. Поэтому формула (6.55) применима только в пределах до первой ступени нагружения. За пределами первой ступени необходимо учитывать бимодульность.

### Определение касательных напряжений в слоях при поперечном плоском изгибе

Особенность определения касательных напряжений в анизотропных балках при поперечном изгибе заключается в ее слоистой структуре.

Для определения закона распределения касательных напряжений  $\langle \tau_{xz} \rangle$  по высоте поперечного сечения рассмотрим уравнения равновесия малого объема  $k$ -го слоя. Считаем, что слой находится в плоском напряженном состоянии, и напряжения не зависят от координаты  $y$ .

Подробный вывод этих уравнений приведен в разделе 6.1. Воспользуемся первым уравнением (6.1)

$$\frac{b \partial \langle \sigma_x \rangle_k}{\partial x} + \frac{\partial \langle b \tau_{xz} \rangle_k}{\partial z} = 0.$$

Определим из этого выражения  $\langle \tau_{xz} \rangle_k$ , для чего проинтегрируем по  $z$  от  $-\frac{h}{2}$  до координаты слоя, где мы определяем касательные напряжения

$$\langle \tau_{xz} \rangle_k = -\frac{1}{b} \int_{-\frac{h}{2}}^z \frac{\partial \langle b \sigma_x \rangle_k}{\partial x} dz. \quad (6.56)$$

Для слоистого стержня шириной  $b$  эта зависимость имеет следующий вид

$$\langle \tau_{xz} \rangle_k = -\frac{1}{b} \sum_{i=1}^k \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{b \partial \langle \sigma_x \rangle_k}{\partial x} dz. \quad (6.57)$$

Напряжение  $\langle \sigma_x \rangle_k$  при поперечном изгибе определим по формуле:

$$\langle \sigma_x \rangle_k = [(\bar{Q}_{11})_k K_x + (\bar{Q}_{12})_k K_y]. \quad (6.58)$$

Считая, что кривизна  $K_y$  по координате  $y$  равна нулю, выражение (6.57) принимает вид

$$\langle \sigma_x \rangle_k = (\bar{Q}_{11})_k \cdot K_x \cdot z. \quad (6.59)$$

Кривизну  $K_x$  по координате  $x$  найдем из формулы

$$K_x = \frac{M}{D_{11} \cdot b}, \quad (6.60)$$

где  $M$  – изгибающий момент в сечении слоистой балки шириной  $b$ .

Продифференцируем по  $x$  выражения (6.59)

$$\frac{\partial \langle \sigma_x \rangle_k}{\partial x} = (\bar{Q}_{11})_k \cdot z \frac{\partial K_x}{\partial x}; \quad (6.61)$$

$$\frac{\partial K_x}{\partial x} = \frac{M'}{D_{11} \cdot b}. \quad (6.62)$$

где  $(\bar{Q}_{11})_k$ ,  $D_{11}$ ,  $b$  от координат  $x$  не зависят;

$M' = \frac{\partial M}{\partial x} = S$  – перерезывающая сила в сечении  $x$ .

Подставим (6.62) в (6.61)

$$\frac{\langle \partial \sigma_x \rangle_k}{\partial x} = (\bar{Q}_{11})_k \frac{M'}{D_{11} \cdot b} \cdot z. \quad (6.63)$$

Подставляя (6.62) в (6.57) и считая ширину сечения  $b$  постоянной, получим

$$\langle \tau_{xz} \rangle_k = -\frac{M'}{D_{11} b} \sum_{i=1}^k \int_{h_{i-1}}^{h_i} (\bar{Q}_{11})_k \cdot z dz. \quad (6.64)$$

Выполняя интегрирование по слоям, будем иметь

$$\langle \tau_{xz} \rangle_k = -\frac{M'}{2D_{11} b} \sum_{i=1}^k (\bar{Q}_{11})_i (h_i^2 - h_{i-1}^2). \quad (6.65)$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие предпосылки вводятся при рассмотрении поперечного изгиба балки из слоистых КМ?
2. Влияет ли соотношение размеров балки (отношение длины балки к максимальному поперечному размеру) на учет деформации сдвига при определении прогиба балки?
3. Как влияет структура балки по толщине (расположение и угол укладки слоев) на нормальные напряжения в слоях?
4. Какие дополнительные деформации появятся в слоях композитной балки при поперечном изгибе, если структура балки по толщине будет несимметричной?
5. Какие области деформирования в координатах  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  имеются при растяжении композитного материала, армированного тканью?
6. В какой области деформирования справедливы представленные формулы для определения напряжений в слоях?
7. Может ли иметь место нарушение симметрии структуры по толщине балки при действии поперечной силы?
8. Что такое «бимодульность» материала?
9. Какие напряжения вызывают расслоение балки?
10. Определение напряжений в балке – это статически определимая задача или статически неопределимая задача?

## 7. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 7.1. Общая характеристика соединений композитных элементов

Проблемы соединений элементов из КМ между собой или соединений КМ-металл являются одной из важнейших при создании конструкций с применением композитов. Эти проблемы связаны со специфическими свойствами этих материалов, таких как анизотропия упругих и прочностных свойств, гетерогенность структуры, низкая сдвиговая прочность и др. Особенности физико-механических свойств композитов, их структуры, присущие им типы разрушений требуют иных подходов к методам расчета и проектирования соеди-

нений по сравнению с соединениями элементов из традиционных металлов и сплавов.

Геометрия соединений композитных элементов, их конструктивные решения отличаются большим разнообразием и зависят как от назначения и предъявленных требований, так и от технических операций их изготовления.

Все многообразие конструкций можно представить комбинацией конечного числа таких элементов, как балок, стержней, пластин и оболочек. При сборке этих элементов реализуется большое количество различных по геометрии соединений, которые могут быть сведены к нескольким основным видам: стыковым, нахлесточным и угловым.

Эти виды соединений могут быть осуществлены с помощью механических, клеевых, формовочных и комбинированных способов.

Каждый вид и способ соединений обладает своими особенностями, преимуществами и недостатками. Выбор вида и способа соединения элементов зависит от характера и величины нагрузки, размеров деталей, физико-механических свойств соединяемых материалов, условий эксплуатации, специальных требований (герметичности), технологичности, стоимости. Факторы, определяющие конструктивно-технологический облик проектируемого соединения, можно объединить в три группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные. Удовлетворение требованиям, выдвигаемым этими факторами, является основным содержанием этапа проектирования соединений.

## **7.2. Механические соединения**

К наиболее распространенным механическим соединениям композитов относятся заклепочные, винтовые, болтовые, игольчатые. Для передачи значительных сосредоточенных нагрузок используют крепежные элементы из металла. Все шире используются крепежные элементы из композиционных материалов.

Преимуществами механических соединений являются: возможность соединений элементов из материалов различной природы, толщины; передача сосредоточенных нагрузок; осуществление разборки изделий.

К недостаткам механических соединений следует отнести уменьшение сечения элементов из-за наличия в них отверстий под крепежные детали, возникновение концентрации напряжений в местах отверстий, отсутствие гладкости в местах соединений поверхностей.

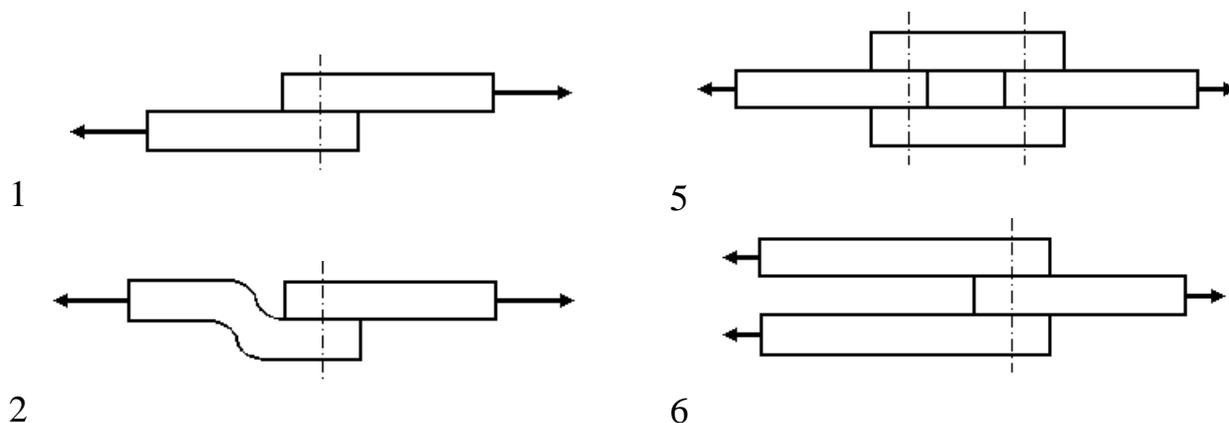
**Заклепочные соединения типа «КМ-КМ», «КМ-металл».** Они относятся к неразъемным соединениям. В большинстве случаев заклепки используют для соединения элементов, выполненных из листовых заготовок, различных профилей. Применение заклепочных соединений оптимально при толщине соединяемых листов до 5 мм.

В зависимости от конструкций соединений применяют заклепки с плоской, полукруглой, потайной головками. Выбор типа заклепок имеет значение в плане обеспечения заданной прочности соединений. Соединения стекло- и углепластиков заклепками с плоской и полукруглой головками разрушаются при более высоких нагрузках, чем соединения с потайными головками [15, 51].

Для слоистых композиционных материалов угол закладной головки  $120^\circ$  предпочтительней, чем угол  $90^\circ$ , применяемый для металлических конструкций. В заклепочных соединениях обычно используют алюминиевые, латунные и медные заклепки. Известны способы соединения КМ заклепками из однонаправленных композитов.

Примеры типов соединений элементов из композитов приведены на рис. 7.1. Соотношения размеров заклепки и соединяемых элементов приведены на рис. 7.2.

Геометрия механических соединений



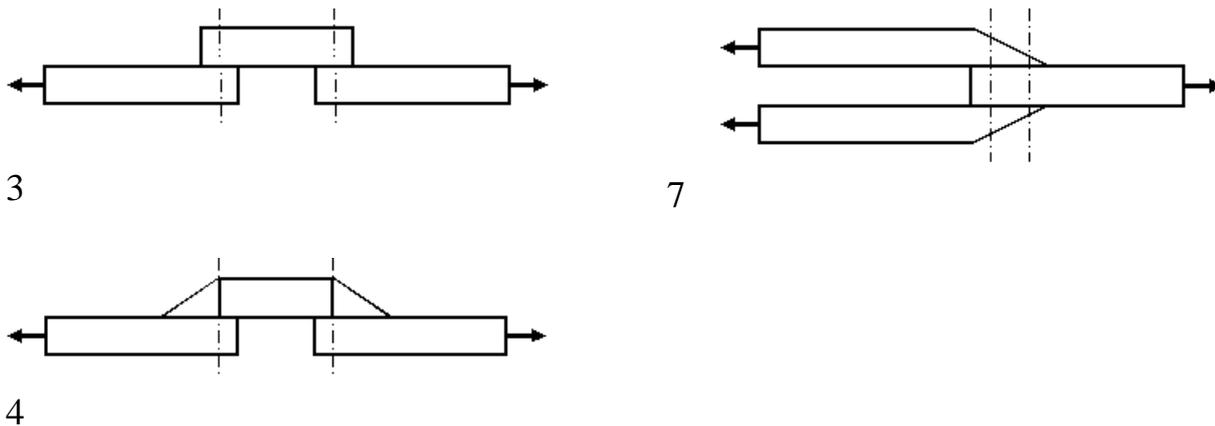


Рис. 7.1. Типы соединений деталей из композитов:

- 1 – обычное нахлесточное; 2 – нахлесточное с изгибом; 3 – стыковое с простой накладкой;  
 4 – стыковое со скошенной накладкой; 5 – стыковое с двойной накладкой;  
 6 – двухстороннее нахлесточное; 7 – скошенное двухстороннее нахлесточное

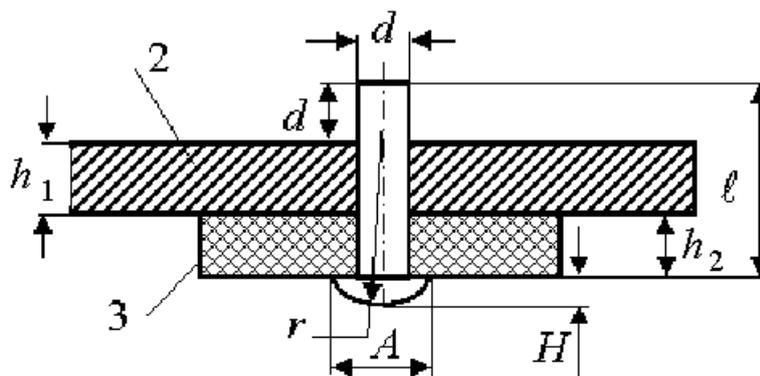


Рис. 7.2. Схема выбора размеров заклепки:

- $d$  – диаметр и длина заклепываемой части стержня заклепки; 2 – металл; 3 – композит;  
 $A = 2,3d$  – диаметр низкой полукруглой головки;  $H = d/3$  – высота головки заклепки;  
 $l$  – длина стержня заклепки;  $r = 2,5d$  – радиус сферической поверхности головки заклепки;  
 $h_1, h_2$  – толщины соединяемых элементов

**Болтовые соединения** обладают наибольшей прочностью среди механических соединений. Винтовые соединения в КМ встречаются значительно реже, так как полимерная матрица не обеспечивает необходимую прочность нарезанной резьбы в соединяемых деталях. Для соединения элементов из конструктивных КМ (стекло, углепластик и др.) обычно применяют стальные или титановые болты. Болты из цветных металлов (алюминиевые сплавы) используют в мало нагруженных соединениях.

**Игольчатые соединения** чаще всего применяют для соединения КМ с металлом, когда один из конструктивных элементов жестче

другого. Опыт эксплуатации игольчатых соединений показал, что они обладают высокой прочностью. Это объясняется менее значительным повреждением КМ отверстиями под крепежные элементы, отсутствием повреждений армирующей компоненты КМ при выполнении соединения на стадии формования материала. Результаты испытаний игольчатых соединений (диаметр иголок – 1 мм) показали, что по прочности они близки к соединяемым материалам, а при циклических нагрузках их долговечность во много раз выше болтовых соединений с отверстиями диаметром 6 мм [15].

**Резьбовые соединения** используются в основном для труб. В соединениях композитов и металлов применяют треугольную, круглую, прямоугольную и трапецеидальную резьбы.

Всем механическим соединениям (заклепочным, болтовым, игольчатым) присущ единый подход к оценке влияния конструктивных и технологических параметров и эксплуатационных факторов на прочностную надежность соединений.

К конструктивным параметрам относятся: тип соединения (одно-, двухсрезное), размеры соединяемых деталей, количество элементов крепежа, их диаметр, шаг между ними, минимальное расстояние от края образца до центра отверстия под крепеж, физико-механические характеристики соединяемых деталей и крепежа.

Технологические параметры включают порядок сборки соединений, необходимые требования к оборудованию и оснастке, форме и качеству обработки поверхностей, плотности прилегания головок крепежа к поверхностям соединяемых деталей, точность и взаимосвязь элементов, качество и образование отверстий.

К эксплуатационным факторам относятся: изменения в процессе эксплуатации внешних нагрузок, температуры, состояния среды (влажность, коррозионность и др.).

Более подробная классификация факторов и параметров, определяющих несущую способность соединений конструкций из КМ, дана в [15, 30, 51].

Влияние конструктивных и структурных параметров элементов соединения на прочность рассмотрим на примере нахлесточного механического соединения пластин из КМ с помощью заклепок или болтов (рис. 7.3).

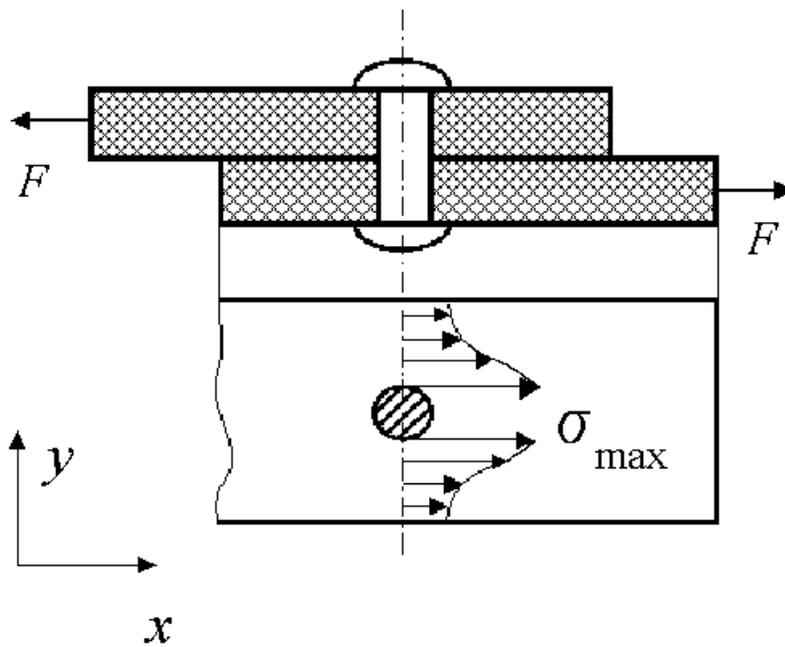


Рис. 7.3. Схема передачи усилий в нахлесточном однородном соединении

Передача усилий с одного элемента на другой через заклепку или болт вызывает в соединяемых элементах вокруг крепежа сложное напряженное состояние. Материал, расположенный между силовыми точками крепления, испытывает растяжение. Зона взаимодействия отверстия с крепежом нагружена контактным давлением, которое вызывает в композите напряжения сжатия и сдвига. Разрушение такого механического соединения может произойти по различным формам, изображенным на рис. 7.4.

Выделим основные типы разрушений: разрыв пластины по сечению, ослабленному отверстием под крепеж (рис. 7.4,а); срез пластины в направлении действия приложенной силы (рис. 7.4,б); раскалывание пластины в продольном и поперечном направлениях (рис. 7.4,в); смятие материала пластины в зоне контакта с крепежным элементом (рис. 7.4,г); прорыв пластины головкой крепежного элемента (рис. 7.4,д); срез крепежного элемента (рис. 7.4,е).

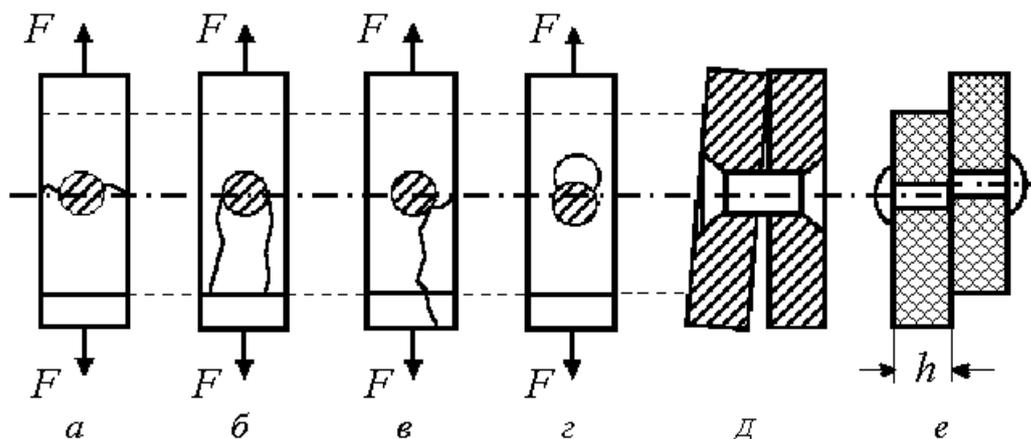
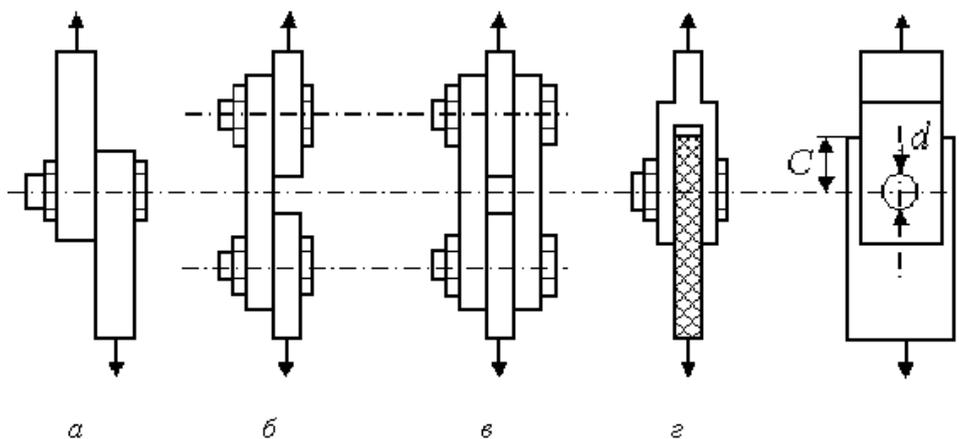


Рис. 7.4. Характерные формы разрушения механических соединений пластин из КМ: *a* – разрыв по ослабленному сечению; *б* – срез композита; *в* – раскалывание в поперечном и продольном направлениях; *г* – смятие в зоне контакта; *д* – прорыв крепежного элемента; *е* – срез (смятие) крепежного элемента

Приведенные формы разрушения не исключают комбинацию различных форм разрушения. Для оценки прочности механических соединений необходимо знание механических свойств соединяемых материалов при растяжении, сжатии, срезе, смятии. Эти свойства определяются в основном экспериментально.

Прочность элементов и самого механического соединения исследуется на специальных образцах и устройствах, имитирующих работу того или иного вида соединения. На рис. 7.5 представлены схемы испытаний различных механических соединений пластин из КМ.

Прочность элементов механического соединения из КМ в составе соединения представляет собой достаточно условную характеристику, так как при нагружении пластин через болт или заклепку вблизи крепежа возникает сложное напряженное состояние. В инженерных расчетах, как правило, принимают предположения, упрощающие определение, так называемых, условных напряжений. Например, при оценке прочности болтового или заклепочного соединения на смятие принимается предположение о равномерном распределении напряжений сжатия по диаметральной плоскости.



*Рис. 7.5.* Схема испытаний механических соединений пластин из КМ:  
*а* – нахлесточное соединение; *б* – стыковое с одной накладкой; *в* – стыковое с двумя накладками; *г* – вилка проушина для исследования в отдельности геометрических размеров испытываемых образцов, диаметра крепежа, силы затяжки болта

Также установлено, что прочность композита при смятии болтом зависит от степени предварительной затяжки, создающей боковое стеснение в деформации материала образца в районе отверстия, а так же от схемы укладки и соотношения слоев, толщины соединяемых элементов. Увеличение затяжки болтов вызывает возрастание разрушающей нагрузки образца. Боковое стеснение предотвращает потерю устойчивости волокон в зоне контакта. Установка шайб и создание предварительной затяжки увеличивает нагрузку разрушения примерно на 30 % [16].

Как показали исследования, создание в композите боковых напряжений сжатия порядка 20...25 МПа, приводит к повышению разрушающей нагрузки в зависимости от природы и структуры материала на 60 и более процентов. На несущую способность при смятии и срезе существенно влияет угол и последовательность укладки слоев.

При испытании образцов с перекрестной схемой армирования ( $\pm\alpha$ ) при увеличении угла армирования от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  отмечается возрастание прочности при смятии. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  приводит к снижению прочности. Такой характер зависимости, как указывают авторы работы [19], обусловлен снижением концентрации напряжений в композите при изменении угла  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , и последующем его возрастанием с увеличением угла  $\alpha$  до  $90^\circ$ . Прочность композита на смятие зависит не только от угла укладки слоев, но и от последовательности расположения слоев, например, прочность соединений

углепластика с укладкой ( $0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ$ ) на 16 % ниже, чем с укладкой ( $0^\circ/+45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ$ ). Прочность соединения на смятие стеклопластика с укладкой ( $90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ$ ) оказалась на 30 % выше по сравнению со схемой армирования ( $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ ). Как упоминалось выше, диаметр отверстия также влияет на прочность при смятии. Чем выше отношения диаметра отверстия к толщине  $d/h$ , тем прочность ниже.

Прочность соединений при срезе определяется в основном межслойным сдвигом и сдвигом в плоскости армирования композита. В слоистых композитах прочность при срезе существенно зависит от структуры материала и направления нагружения. Наиболее низкая прочность наблюдается у однонаправленных композитов, когда направление нагружения совпадает с направлением армирования. Для перекрестно-армированных структур с увеличением угла укладки от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  происходит возрастание прочности на срез.

Увеличение прочности при срезе достигается за счет сочетания перекрестно-армированных слоев и слоев с направлением укладки, совпадающей с направлением нагружения ( $0^\circ/\pm\alpha$ ). Для достижения оптимальной прочности при механическом соединении пластин из углепластика необходимо, чтобы доли слоев с ориентацией  $0^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно составляли 60 % и 40 % слоев пакета. Оптимальная прочность механических соединений, разрушающихся по ослабленному отверстиями сечению, достигается при ориентации слоев  $0^\circ/\pm 45^\circ$  и соотношении 2 : 1, а на срез – при их соотношении 1 : 1.

Важным параметром механического соединения является отношение диаметра отверстия к ширине образца. С увеличением этого отношения прочность на растяжение уменьшается. Наиболее чувствительным является материал с укладкой ( $0^\circ/0^\circ/90^\circ$ ), а наименее чувствительным – композит с укладкой слоев ( $\pm 45^\circ$ ).

При анализе напряжений, возникающих в зоне соединения, важно знать максимальный теоретический коэффициент концентрации напряжений в зоне отверстия в случае приложения растягивающей нагрузки в направлении оси  $X$ . В работе [19] приводится следующее выражение для коэффициента концентрации

$$n = 1 + \sqrt{2 \left( \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} - \mu_{xy} + \frac{E_x}{G_{xy}} \right)}$$

Концентрация напряжений зависит от отношения модулей упругости  $E_x$  и  $E_y$  и модуля сдвига  $G_{xy}$ . Чем больше различия в модулях и чем ниже модуль сдвига, тем больше коэффициент концентрации. В случае растяжения однонаправленного углепластика в направлении укладки волокон коэффициент концентрации напряжений достигает  $n=7$ . Наличие в слоистом пакете слоев с перекрестной схемой армирования ( $\pm \alpha$ ) приводит к снижению  $n$ . На рис. 7.6 представлен график теоретического и определенного из эксперимента (эффективного) коэффициентов концентрации около отверстия в пластине из углепластика с углами армирования слоев  $0^\circ$  и  $\pm 45^\circ$  от относительного содержания слоев с углами  $\pm 45^\circ$  ( $f = \frac{K_{45}}{K_0 + K_{45}}$ , где  $K_{45}, K_0$  – число слоев под углом  $45^\circ$  и  $0^\circ$  соответственно).

Значительное снижение коэффициента концентрации напряжений с увеличением числа слоев, ориентированных под углом  $45^\circ$ , обусловлено уменьшением степени анизотропии упругих свойств и увеличением модуля сдвига, что способствует более эффективному нагружению соседних с отверстием участков материала. Более низкое значение эффективного (опытного) коэффициента связано с неупругим в действительности характером деформирования композита при напряжениях, близких к предельным.

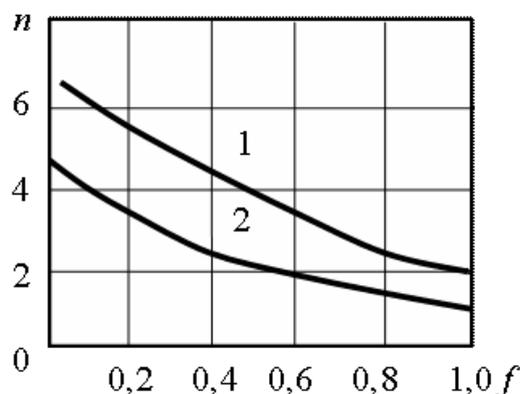


Рис. 7.6. Зависимость теоретического и эффективного коэффициентов концентрации напряжений около отверстия в пластине из углепластика от относительного содержания слоев с углом укладки  $\pm 45^\circ$

Рассмотрим конструктивные параметры нахлесточного механического соединения как однорядного, так и многорядного (рис. 7.8, 7.9). Как показали исследования, для широкого спектра слоистых композиционных материалов (СКМ) с полимерной матрицей оптимальное отношение шага к диаметру крепежных элементов в фланговых швах (параллельные линии приложения нагрузки) соответствует оптимальному отношению  $c/d$ , определенному для данного СКМ по результатам испытаний соединения с одним крепежным элементом. Для лобовых швов (перпендикулярных линии приложения нагрузки) – соответствует оптимальному отношению  $w/d$ , полученному для одного крепежного элемента. Таким образом, прочность многорядных (многоболтовых или многозаклепочных) соединений СКМ целесообразно исследовать на моделях с одним соединяющим (крепежным) элементом.

К основным параметрам нахлесточного соединения относятся: толщины соединяемых деталей  $h$ , диаметр болта или заклепки  $d$ , шаг между ними  $\tau$ , расстояние от торцевого края образца до центра отверстия под крепеж  $C$ , расстояние от края боковой стороны  $\ell_\delta$ .

В табл. 7.1 даны рекомендации по выбору расстояний от торца и бокового края композита в зависимости от толщины последнего [31].

Таблица 7.1

Толщина композита, мм	$C$ , мм	$\ell_\delta$ , мм
$\leq 3,2$	3,0	2,0
3,2 – 4,8	2,5	1,5
$\geq 4,8$	2,0	1,3

Разрушение композита в результате смятия будет происходить, если напряжение  $\sigma_{см}$  вызывает 4% -е удлинение диаметра отверстия.

На рис. 7.7 представлены зависимости напряжения смятия в направлении выкладки в стеклотекстолите на основе ткани и полиэфира от отношения высоты сечения образца к диаметру отверстия.

Напряжения в композите при смятии снижаются с ростом отношения  $D/h$  (отношение диаметра отверстия к толщине образца). Для

большинства боро- и углепластиков соотношение  $D/h \approx 3$  для всех толщин.

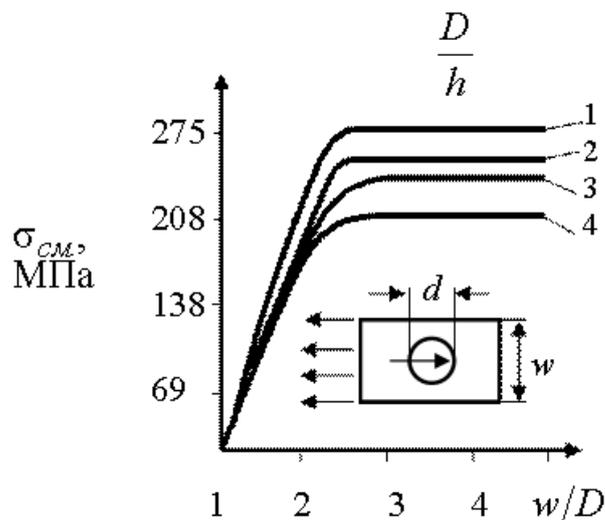


Рис. 7.7. Зависимость напряжения смятия в направлении выкладки от отношения высоты сечения к диаметру отверстия (материал – стеклотекстолит на основе ткани и полиэфира при нагружении по основе)

Определение конструктивных параметров механического нахлесточного соединения целесообразно проводить из условия равнопрочности соединения на все виды разрушения. Для однорядного соединения (рис. 7.8) предельные нагрузки для каждого вида разрушения имеют вид: при разрыве соединения по ослабленному сечению

$$F_0 = \frac{\bar{\sigma}_v(w-d) \cdot h}{K_{эф}}; \text{ при смятии } F_{см} = \bar{\sigma}_{см}dh; \text{ при срезе } F_{ср} = 2\bar{\tau}_{ср}ch;$$

при срезе крепежа  $F_{кр} = \bar{\tau}_к \frac{\pi d^2}{4}$ . Здесь  $\bar{\sigma}_v$ ,  $\bar{\sigma}_{см}$ ,  $\bar{\tau}_{ср}$ ,  $\bar{\tau}_к$  – предельные напряжения.

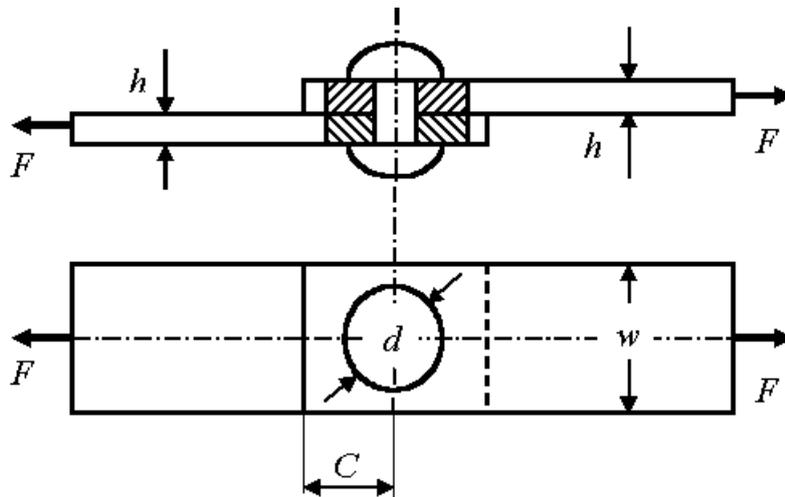


Рис. 7.8. Схема однорядного механического соединения

Из условия равнопрочности  $F_0 = F_{см} = F_{ср} = F_{кр}$  определяются основные параметры соединения

$$\frac{d}{h} = \frac{4\sigma_{см}}{\pi\tau_{ср}}, \quad \frac{c}{d} = \frac{\bar{\sigma}_{см}}{2\bar{\tau}_{ср}}, \quad \frac{w}{d} = 1 + \frac{\bar{\sigma}_{см}}{\sigma_в} K_{эф}.$$

Для многорядного соединения выбор оптимального отношения шага между заклепками к диаметру определяется из соотношения

$$\frac{t}{d} = 1 + i \frac{\bar{\sigma}_{см}}{\sigma_в} K_{эф},$$

где  $i$  – количество рядов в соединении.

При выборе оптимальных параметров нахлесточного (рис. 7.9) соединения необходимо учитывать, что эффективный коэффициент концентрации напряжений возрастает при увеличении диаметра отверстия под крепеж. Поэтому необходимо выбирать минимально возможный диаметр крепежа.

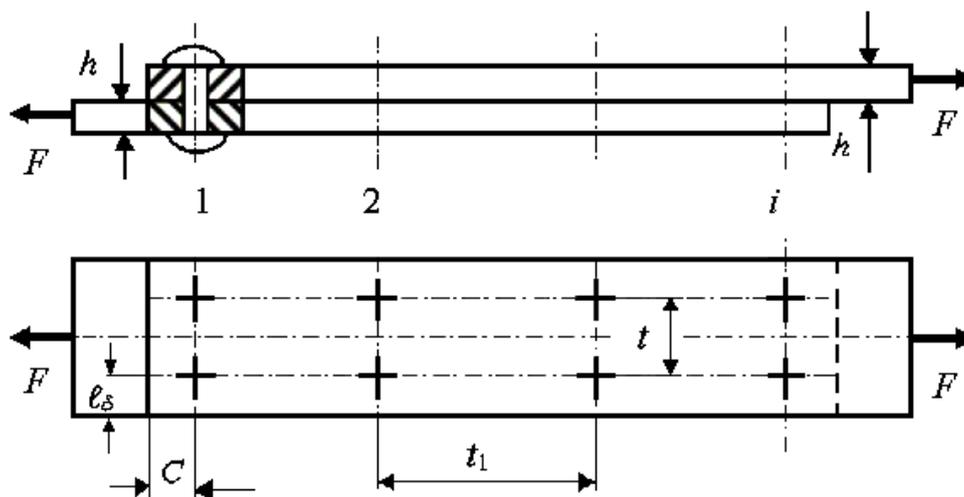


Рис. 7.9. Схема многорядного односрезного нахлесточного соединения

### Эффективность соединения и запас прочности

Эффективность соединений из композитов основана на сравнении прочностных характеристик соединения и прочности сечения исходного образца такого же размера.

$$K_{эф} = \frac{F_c}{F_{обр}},$$

где  $F_c$  – нагрузка разрушения соединения ( $H$ );  $F_{обр}$  – нагрузка разрушения образца из композиционного материала того же размера ( $H$ ).

Запас прочности является отношением предельных задающих в конструкции напряжений к уровню максимальных напряжений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации.

Для композиционных материалов, которые практически не проявляют текучести, запас прочности определяется только по пределу прочности. Для стеклопластиков запас прочности выбирается равным 3. Для боро-, органо- и углепластиков коэффициент запаса прочности выбирается равным 1,5...2.

### Анализ соединений

При проектировании соединений для конкретных конструкций возникает необходимость анализа различных типов соединений и выбора наиболее отвечающего заданным условиям. Последовательность анализа сводится к следующему:

1. Определяется вид нагрузок, испытываемых соединением.
2. Определяются условия эксплуатации: температурные условия; погодные условия; статические или усталостные нагрузки; срок эксплуатации и др.
3. Определяются максимальные эксплуатационные нагрузки и коэффициент запаса прочности в данном соединении, сравнивают их с характеристиками других соединений.
4. Определяется наиболее вероятный вид разрушения и условия, приводящие к разрушению.

### **7.3. Адгезионное (клеевое) соединение композитов**

#### **Общие положения**

Преимущества адгезионных (клеевых) соединений композиционных материалов:

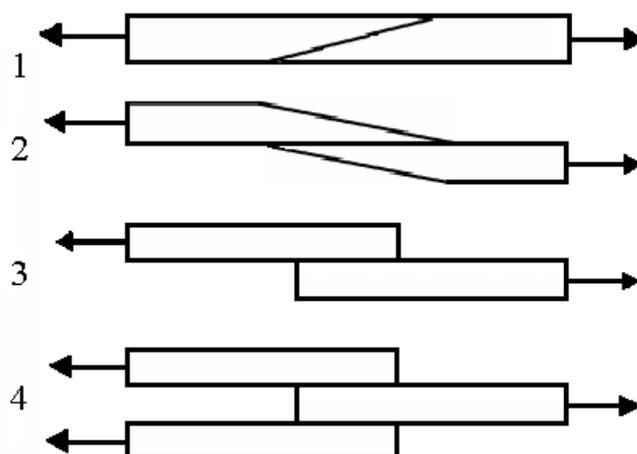
1. В адгезионных соединениях отсутствуют необходимые для механических соединений отверстия, уменьшающие рабочее сечение и являющиеся значительными концентраторами напряжений.
2. Позволяют иметь гладкую внешнюю поверхность и обладают меньшей возможностью к развитию и распространению трещин.
3. Позволяют соединить большие площади, что существенно уменьшает затраты на соединения по сравнению с механическими.

К недостаткам адгезионных соединений нужно отнести:

1. Невозможность их применения для передачи значительных сосредоточенных нагрузок.
2. Невозможность их применения для разъемных конструкций.
3. Необходимость высокой точности взаимного расположения деталей.
4. Резкое снижение прочности при воздействии повышенных температур.

#### **ВИДЫ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

В практике применения адгезионных соединений разработано большое количество видов соединений. На рис. 7.10 представлены лишь классические виды соединений.



*Рис. 7.10.* Виды соединений:

1 – в ус; 2 – нахлесточное со скосом; 3 – простое нахлесточное; 4 – двойное нахлесточное

Несущая способность клеевых соединений зависит от физико-механических свойств соединяемых деталей (модуля упругости, коэффициентов Пуассона и температурного расширения соединяемых деталей и клеевой прослойки), геометрических размеров, длины и ширины клеевого соединения, условий эксплуатации, технологической реализуемости, специальных требований.

Рассмотрим влияние указанных выше факторов на напряженно-деформированное состояние нахлесточного клеевого соединения как наиболее распространенного (рис. 7.11).

Приложение нагрузки в плоскости склеенных элементов вызовет сдвиговые напряжения  $\tau$  в клеевом слое и на поверхностях соединяемых элементов.

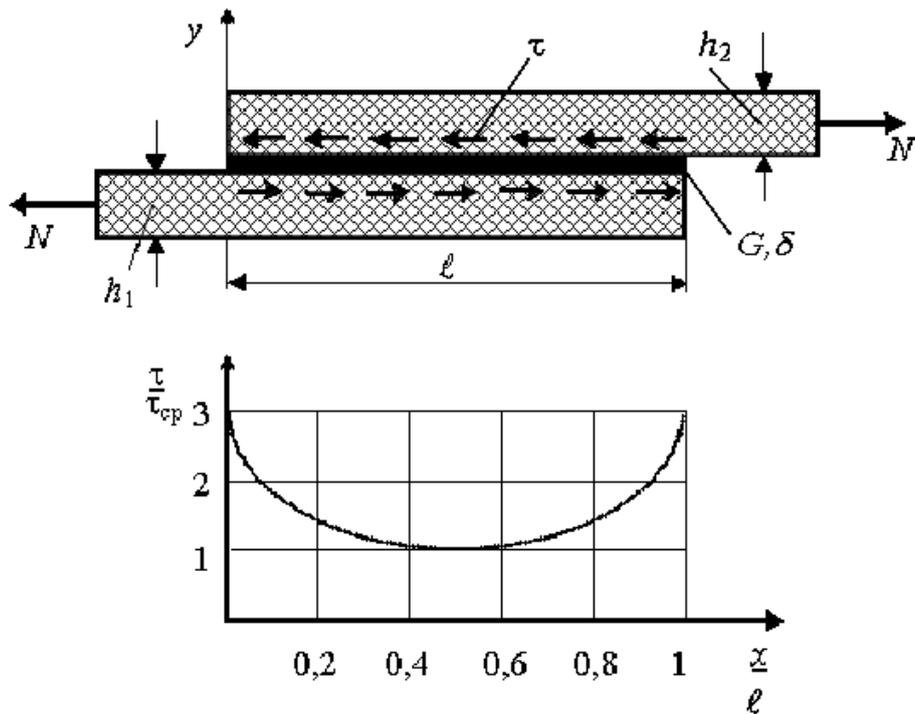


Рис. 7.11. Расчетная схема клеевого нахлесточного соединения и распределение относительных касательных напряжений по длине клеевого шва:

$G, \delta$  – модуль сдвига и толщина клеевой прослойки;  $\ell$  – длина соединения;  $h_1$  и  $h_2, E_1, E_2$  – толщины и модули упругости соединяемых элементов;  $\tau$  – касательные напряжения в клеевом соединении;  $\tau_{cp}$  – средние касательные напряжения, равные отношению нагрузки  $N$  к длине клеевого шва  $N/\ell$

Рассмотрим перемещения и деформации в нахлесточном соединении (рис. 7.12). Изгибающими моментами, возникающими в этом соединении, пренебрегаем.

Выделим на расстоянии  $x$  от выбранной системы координат элемент соединения длиной  $dx$ . Действие нагрузки вызовет перемещение точек  $A_1, B_1, A_2, B_2$ . Точки  $A_1$  и  $B_1$  переместятся соответственно на величину  $u_1$  и  $u_1 + \frac{du_1}{dx} dx$ , точки  $A_2$  и  $B_2$  – соответственно на  $u_2$  и

$u_2 + \frac{du_2}{dx} dx$ . Клеевая прослойка будет иметь сдвиговую деформацию

$\gamma$  и  $\gamma + \frac{d\gamma}{dx} dx$ .

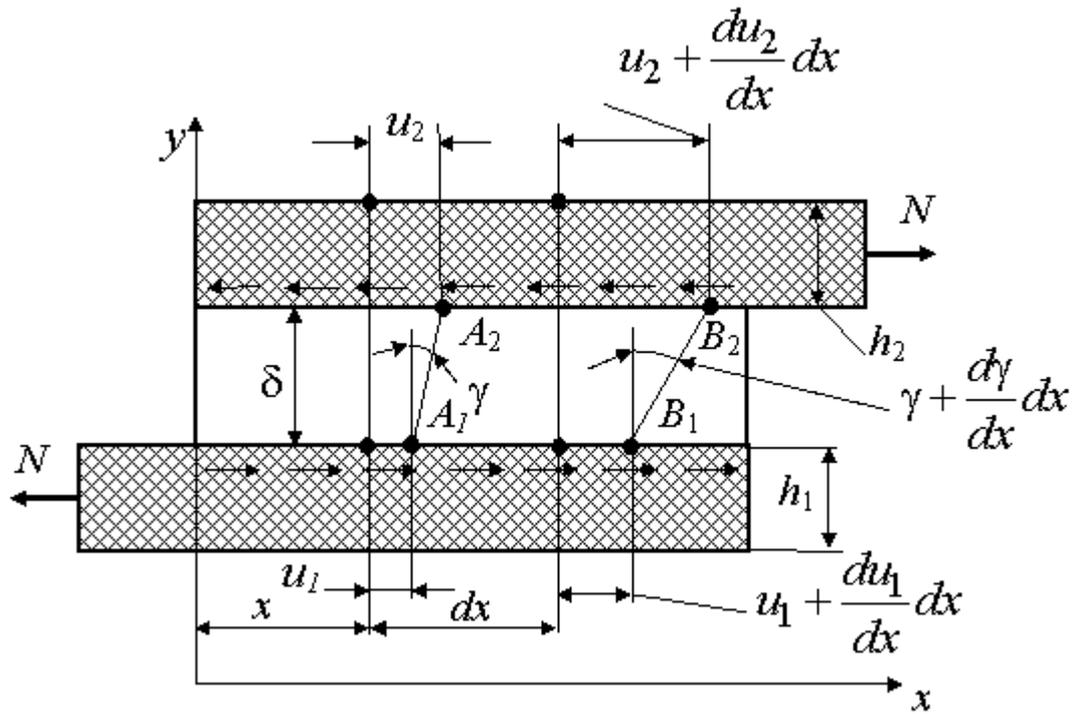


Рис. 7.12. Перемещения и деформации в нахлесточном соединении

Для определения касательных напряжений составим условие совместности деформаций соединяемых элементов и клеевой прослойки [9].

$$A_2B_2 - A_1B_1 = \frac{d\gamma}{dx} dx \cdot \delta, \text{ где} \quad (7.1)$$

$$A_2B_2 = u_2 + \frac{du_2}{dx} dx + dx - u_2 = dx(1 + \varepsilon_{2x}), \quad (7.2)$$

$$A_1B_1 = u_1 + \frac{du_1}{dx} dx + dx - u_1 = dx(1 + \varepsilon_{1x}). \quad (7.3)$$

Подставляя (7.2), (7.3) в (7.1), получим

$$\varepsilon_{2x} - \varepsilon_{1x} = \frac{d\gamma}{dx} \delta, \quad (7.4)$$

где  $\varepsilon_{1x} = \frac{du_1}{dx}$ ;  $\varepsilon_{2x} = \frac{du_2}{dx}$  – относительные деформации верхнего и нижнего элементов клеевого соединения;  $\delta$  – толщина клеевой прослойки;  $\gamma$  – угол сдвига клеевой прослойки.

Выразим  $\varepsilon_{1x}$  и  $\varepsilon_{2x}$  через закон Гука

$$\varepsilon_{1x} = \frac{\sigma_{1x}(x)}{E_{1x}}; \quad \varepsilon_{2x} = \frac{\sigma_{2x}(x)}{E_{2x}}, \quad (7.5)$$

где  $\sigma_{1x}(x)$ ,  $\sigma_{2x}(x)$  – осевые напряжения в соединяемых элементах на расстоянии  $x$  от левого торца (рис. 7.13).

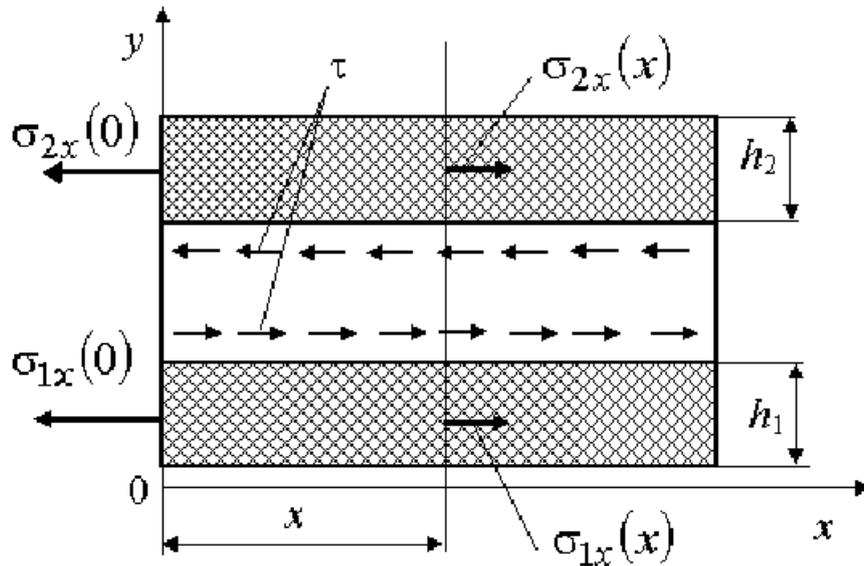


Рис. 7.13. Напряжения в нахлесточном соединении

Подставляя (7.5) в (7.4), получим

$$\frac{\sigma_{2x}(x)}{E_{2x}} - \frac{\sigma_{1x}(x)}{E_{1x}} = \frac{d\gamma}{dx} \delta. \quad (7.6)$$

Считаем, что сдвиговые деформации клеевой прослойки подчиняются закону Гука  $\gamma = \frac{\tau}{G}$ , где  $G$  – модуль сдвига клеевой прослойки.

Тогда уравнение (7.6) будет иметь вид

$$\frac{\sigma_{2x}(x)}{E_{2x}} - \frac{\sigma_{1x}(x)}{E_{1x}} = \frac{d\tau}{dx} \frac{\delta}{G}. \quad (7.7)$$

Составим уравнения равновесия для 1-го и 2-го элементов клеевого соединения

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{2x}(x) &= \sigma_{2x}(0) + \frac{1}{h_2} \int_0^x \tau(x) dx \\ \sigma_{1x}(x) &= \sigma_{1x}(0) - \frac{1}{h_1} \int_0^x \tau(x) dx \end{aligned} \right\}, \quad (7.8)$$

здесь  $\sigma_{1x}(0)$  и  $\sigma_{2x}(0)$  – осевые напряжения в элементах 1 и 2 при  $x=0$ .

Подставим (7.8) в (7.7)

$$\frac{\sigma_{2x}(0) + \frac{1}{h_2} \int_0^x \tau(x) dx}{E_{2x}} - \frac{\sigma_{1x}(0) - \frac{1}{h_1} \int_0^x \tau(x) dx}{E_{1x}} = \frac{d\tau}{dx} \frac{\delta}{G}. \quad (7.9)$$

Продифференцируем (7.9) по  $x$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\sigma_{2x}(0) + \frac{1}{h_2} \int_0^x \tau(x) dx}{E_{2x}} - \frac{\sigma_{1x}(0) - \frac{1}{h_1} \int_0^x \tau(x) dx}{E_{1x}} \right) = \frac{d}{dx} \left[ \left( \frac{d\tau}{dx} \right) \frac{\delta}{G} \right]. \quad (7.10)$$

Принимая, что  $G, \delta, h_1, h_2, E_{1x}, E_{2x}, \sigma_{1x}(0), \sigma_{2x}(0)$  не зависят от  $x$ , получим

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} \frac{\delta}{G} = \tau_x \left( \frac{1}{E_{2x}h_2} + \frac{1}{E_{1x}h_1} \right). \quad (7.11)$$

Обозначим  $E_{2x}h_2 = B_2; E_{1x}h_1 = B_1$ .

Окончательно распределение касательных напряжений по длине клеевого шва характеризуется следующим уравнением [19]

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - K^2\tau = 0, \quad (7.12)$$

где  $K = \sqrt{\frac{G}{\delta} \left( \frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right)}$ ;  $B_1, B_2$  – жесткости соединяемых слоев на растяжение;  $G, \delta$  – модуль сдвига и толщина клеевой прослойки (шва).

Общее решение уравнения (7.12) имеет вид

$$\tau = C_1 shKx + C_2 chKx. \quad (7.13)$$

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определяются из граничных условий: при  $x=0$   $N_{2x} = N$ ; при  $x=\ell$   $N_{1x} = N$ .

После некоторых преобразований распределение касательных напряжений по длине клеевого шва имеет следующий вид

$$\tau = NK \left[ \frac{\psi chK(x-\ell) - (1-\psi) chKx}{shK\ell} \right]; \quad (7.14)$$

$$N_{1x} = N \left[ \psi + \frac{\psi shK(x - \ell) + (1 - \psi)shKx}{shK\ell} \right]; \quad (7.15)$$

$$N_{2x} = N \left[ 1 - \psi - \frac{\psi shK(x - \ell) + (1 - \psi)shKx}{shK\ell} \right];$$

где  $\psi = \frac{B_1}{B_1 + B_2}$ .

Для элементов одинаковой жесткости ( $B_1 = B_2 = B$ ,  $\psi = 1/2$ ) полученное решение принимает вид

$$\tau = \frac{NK}{2} \frac{chK \left( x - \frac{\ell}{2} \right)}{shK \frac{\ell}{2}}; \quad (7.16)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{1x} &= \frac{N}{2} \left[ 1 + \frac{shK \left( x - \frac{\ell}{2} \right)}{shK \frac{\ell}{2}} \right] \\ N_{2x} &= \frac{N}{2} \left[ 1 - \frac{shK \left( x - \frac{\ell}{2} \right)}{shK \frac{\ell}{2}} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (7.17)$$

где  $K = \sqrt{\frac{2G}{B\delta}}$ .

Из равенства (7.16) следует, что касательные напряжения по длине клевого шва распределяются неравномерно. Максимальная величина касательных напряжений имеет место на концах нахлесточного соединения при  $x=0$  и  $x = \ell_x$ , где имеет место ярко выраженная концентрация напряжений (рис. 7.14), и равна

$$\tau_{\max} = \frac{NK}{2} \cdot cth \frac{K\ell}{2}. \quad (7.18)$$

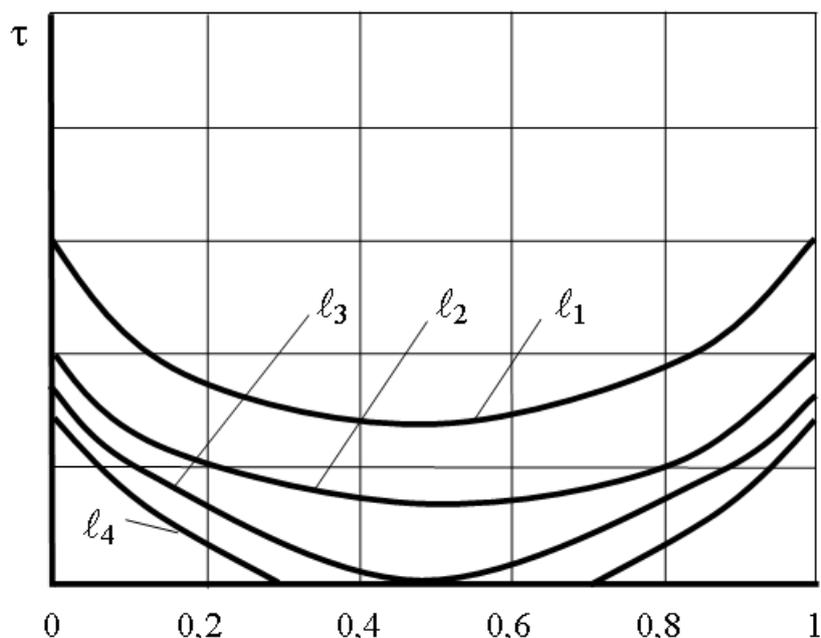


Рис. 7.14. Влияние длины нахлестки на распределение касательных напряжений в клеевой прослойке ( $l_1 < l_2 < l_3 < l_4$ )

Рассмотрим влияние параметров клеевого соединения ( $G, \delta, B_1, B_2, l$ ) на величину  $\tau_{\max}$ .

Величина  $\tau_{\max}$  зависит от параметра  $K$ . Чем больше  $K$ , тем больше  $\tau_{\max}$ . Соответственно несущая способность падает. На рис. 7.15 представлены распределения касательных напряжений в клеевом шве в зависимости от величины параметра  $K$ . Здесь  $\tau_{cp}$  рассчитывается как частное от деления растягивающей силы на площадь шва.

Входящее в параметр  $K$  отношение  $G/\delta$  характеризует способность клеевой прослойки включать в работу присоединенный элемент. Чем выше жесткость клеевой прослойки, тем меньше ее объем оказывается нагруженным, тем выше максимальные напряжения.

Изменение жесткости соединяемых элементов оказывает обратное влияние на распределение напряжений в соединении: чем выше жесткость соединяемых элементов, тем неравномерность напряжений меньше. Возрастание несущей способности с увеличением жесткости соединяемых элементов происходит до определенной величины, после чего ее увеличение не оказывает влияния на прочность шва.

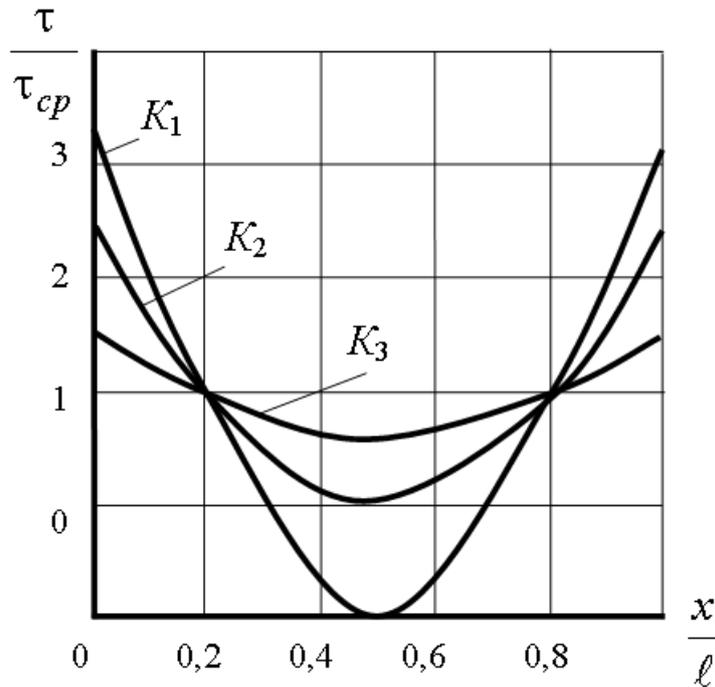


Рис. 7.15. Влияние параметра  $K$  на распределение касательных напряжений в клеевой прослойке по длине нахлесточного соединения ( $K_1 > K_2 > K_3$ )

Из формулы (7.18) следует, что при увеличении длины нахлестки величина  $\tau_{\max}$  снижается и, достигнув некоторого предела, остается постоянной. Длину нахлестки, при которой  $\tau_{\max}$  перестает уменьшаться, обозначим через  $\ell_{np}$ . При  $\ell = \ell_{np}$   $\operatorname{cth} K \frac{\ell}{2} \approx 1$ . Подставляя это в формулу (7.18), получим

$$\tau_{\max} = \frac{NK}{2} = N \sqrt{\frac{G}{2B\delta}}. \quad (7.19)$$

Из формулы (7.16) можно также заключить, что с увеличением длины нахлестки касательные напряжения в ее средней части уменьшаются до нуля. При превышении длины нахлестки больше предельной в средней части соединения начинает развиваться зона, которая не участвует в восприятии внешней нагрузки (рис. 7.14).

Величину  $\ell_{np}$  можно определить из условия  $\operatorname{cth} K \frac{\ell_{np}}{2} \approx 1$ .

Учитывая, что  $K = \sqrt{\frac{2G}{B\delta}}$ , получим  $\ell_{np} = 6\sqrt{\frac{B\delta}{2G}}$ .

$$h_{1x} = h_{10} \left( 1 - a \frac{\ell - 2x}{2\ell} \right); \quad h_{2x} = h_{20} \left( 1 - a \frac{\ell + 2x}{2\ell} \right),$$

где  $a$  изменяется от 0 до 1. При  $a=1$  имеем наиболее равномерное распределение касательных напряжений.

Если нахлесточное клеевое соединение имеет соединяемые элементы различной жесткости, то касательные напряжения имеют большую неравномерность последних в клеевой прослойке. Наибольшие напряжения возникают на концах нахлестки менее жесткого элемента.

$$\tau_{(x=0)} = NK \frac{\psi \operatorname{ch} K\ell + 1 - \psi}{\operatorname{sh} K\ell}; \quad (7.20)$$

$$\tau_{(x=\ell)} = NK \frac{\psi + (1 - \psi) \operatorname{ch} K\ell}{\operatorname{sh} K\ell}, \quad (7.21)$$

где

$$\psi = \frac{B_1}{B_1 + B_2}, \quad K = \sqrt{\frac{G}{\delta} \left( \frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right)}. \quad (7.22)$$

Из равенств (7.20, 7.21) видно, что при  $B_1 > B_2$  максимальные напряжения в клеевой прослойке имеют место при  $x=0$ , и их величина превосходит  $\tau_{(x=\ell)}$  в  $\frac{B_1}{B_2}$  раз. С возрастанием жесткости первого элемента увеличивается максимум касательных напряжений в начале соединения. При проектировании клеевого соединения увеличение жесткости только одного из соединяемых элементов уменьшает прочность соединения.

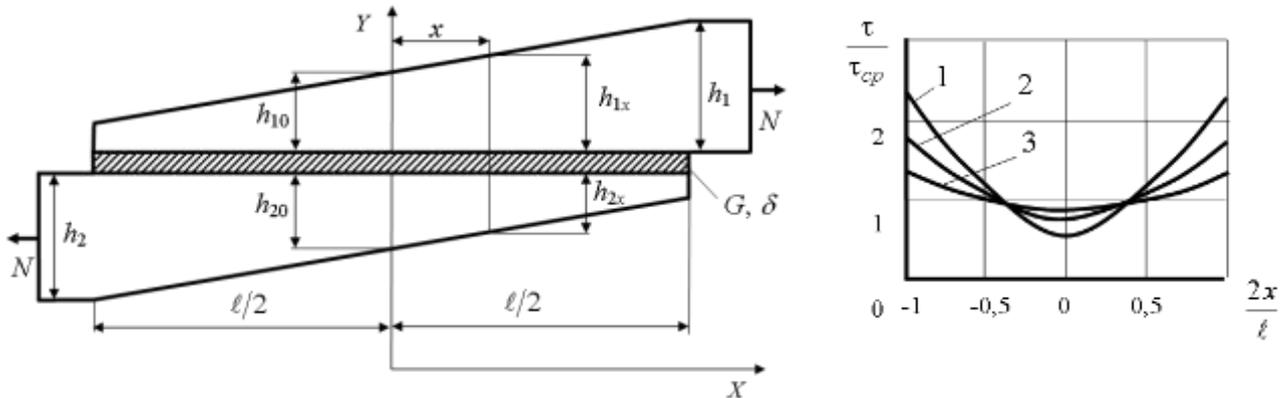
Рассмотрим влияние жесткости клеевой прослойки  $\lambda = \frac{G}{\delta}$  на распределение касательных напряжений в нахлесточном соединении. Из (7.22) видно, что с уменьшением жесткости клеевой прослойки концентрация напряжений уменьшается. В соединении элементов одинаковой жесткости увеличение толщины клеевой прослойки к краям нахлестки по квадратичной зависимости приводит к более равномерному распределению касательных напряжений.

Эффективным конструкторским решением по снижению концентрации касательных напряжений в клеевой прослойке является плавное уменьшение жесткости (толщины) соединяемых элементов по длине нахлестки (рис. 7.16), например, по линейному закону

$$h_{1x} = h_{10} \left( 1 - a \frac{\ell - 2x}{2\ell} \right),$$

$$h_{2x} = h_{20} \left( 1 - a \frac{\ell + 2x}{2\ell} \right),$$
(7.23)

где  $a$  изменяется от 0 до 1.



*Рис. 7.16.* Распределение относительных касательных напряжений в соединении одинаковых элементов с различной степенью уменьшения их толщины по длине нахлестки: 1 –  $a = 0$ ; 2 –  $a = 0,8$ ; 3 –  $a = 0,95$

Из рис. 7.16 видно, что с уменьшением толщины соединяемых элементов к концам нахлестки происходит снижение максимальных напряжений, и распределение напряжений становится более равномерным [30].

## КОМБИНИРОВАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Комбинированными соединениями называются соединения, образованные одновременно механическими и адгезионными (клеевыми) способами. К ним относятся клееболтовые, клеезаклепочные, клееигольчатые и т.п. Сочетание клеевого и механического соединений позволяет устранить недостатки, присущие обоим способам соединений. Это позволяет получить более прочный в механическом отношении шов, повысить его ударные и вибрационные характеристики. При нагружении комбинированного соединения клеевая прослойка воспринимает часть нагрузки, разгружая области механического соединения, что приводит к снижению концентрации напряжений по границам отверстий под механический крепеж и повышению прочности конструкции. В то же время, наличие в клеевом шве жестких механических связей существенно повышает прочность комбинированного соединения при неравномерном отрыве.

При проектировании комбинированного соединения необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства:

- податливость клепанных соединений значительно выше, чем клеевых;
- для эффективной работы комбинированного соединения деформативность его элементов должна быть близкой друг к другу. В этом случае необходимо повышать жесткость механического соединения за счет увеличения количества, прочности и жесткости заклепок или за счет повышения эластичности клеевого шва.

Технологический процесс выполнения клееклепанных соединений возможно выполнять двумя способами:

1. Клепка по отвержденному клею предполагает подготовку поверхности нанесения клея, склеивание соединяемых элементов, отверждение клеевой прослойки и постановку механического крепежа;
2. Установка механического крепежа до отверждения клеевой прослойки.

Создание необходимого давления во втором случае осуществляется затяжкой крепежа.

С точки зрения несущей способности комбинированных соединений, выполненных этими двумя способами, они неравнозначны. Процесс, например, клепки элементов конструкций, содержащих неотвержденную клеевую прослойку, сопровождается сложными явлениями, происходящими в клеевой прослойке. Давление, необходимое для отверждения клея, распределено неравномерно по длине шва и, как следует, снижается качество клееклепанного соединения. Для получения прочного комбинированного соединения предпочтительно механическое соединение производить по отвержденной клеевой прослойке.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие виды соединений элементов из КМ наиболее широко используются?
2. Какие виды соединений относятся к механическим соединениям?
3. В чем преимущества и недостатки механических соединений КМ?
4. Как наиболее эффективно расположить слои КМ при механи-

ческом соединении, чтобы повысить прочность соединения на срез?

5. Какие типы заклепок предпочтительнее применять при механическом соединении КМ?
6. В чем преимущество и недостатки клеевых соединений из КМ?
7. Как распределяются касательные напряжения по длине клеевого шва нахлесточного соединения?
8. Как влияет длина нахлесточного соединения на величину касательного напряжения?
9. Как влияет модуль сдвига и толщина клеевого шва на величину максимального касательного напряжения?
10. Что необходимо предпринять для обеспечения наиболее равномерного распределения касательного напряжения по длине клеевого шва при нахлесточном соединении?

## **8. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Существенной особенностью изготовления изделий из КМ является совмещение этапов создания композиционного материала и формообразования изделия. Эта особенность предъявляет определенные требования к основным исходным компонентам композиционных материалов – матрицам и армирующим материалам. Максимальное удовлетворение этим требованиям – залог получения изделия с высокими прочностными, деформационными и другими эксплуатационными свойствами.

Технологические методы изготовления изделий из КМ подразделяются на однооперационные и многооперационные. К однооперационным относятся методы изготовления изделий непосредственно из исходных компонентов (нитей, тканей, лент и связующего), минуя

операции изготовления полуфабрикатов из этих компонент. К таким методам относится так называемая «мокрая» намотка, пултрузия. Наибольшее распространение получили многооперационные методы изготовления изделий из КМ, в которых изделия образуются из полуфабрикатов. Полуфабрикаты представляют собой заготовки из армирующего материала (нити, ткани, ленты, маты и др.), пропитанные связующим и слегка отвержденные. В этом случае пропитка армирующего материала связующим представляет самостоятельную операцию.

Технологический процесс изготовления изделий из КМ включает следующие основные этапы:

- подготовку исходных компонентов КМ;
- совмещение армирующей компоненты со связующим (матрицей);
- формообразование изделия и отверждение матрицы;
- сборка с другими элементами.

## **8.1. Общие требования к матрицам конструкционных полимерных материалов**

Физико-механические свойства композиционных волокнистых материалов (прочностные, упругие, теплофизические и др.) существенно зависят от физико-механических свойств матрицы и характера взаимодействия ее с армирующими компонентами.

Высокие деформационно-прочностные свойства КМ могут быть реализованы при условии обеспечения монолитности КМ. Понятие монолитности предполагает: сплошность самих компонент и сплошность заполнения компонентами КМ (матрицей, армирующим материалом) заданного объема конструкции; непрерывность матрицы во всем объеме материала; отсутствие нарушений связи на границе раздела компонент при деформировании КМ до тех пор, пока не разрушатся волокна вследствие исчерпания их прочности.

Для обеспечения монолитности КМ в условиях их эксплуатации необходимо выбирать матрицы и армирующие компоненты с конкретно задаваемым соотношением их физико-механических свойств, температурного расширения, упругопрочностных свойств и др. Ниже будут приведены основные соотношения между механическими характеристиками матричных и армирующих компонент и прочностью их сцепления (адгезионной прочностью) при сдвиге и отрыве, обес-

печивающих сплошность КМ с учетом относительных объемов компонент КМ.

Важным условием эксплуатационной работоспособности КМ является обеспечение заданного распределения армирующей компоненты в матрице. Также необходимо иметь в виду, что прочностные и деформационные свойства матриц, сформированных без воздействия армирующей компоненты, отличаются от свойств матрицы в КМ. Наряду с необходимыми деформационно-прочностными характеристиками матрицы должны для обеспечения условий эксплуатации обладать: необходимой теплостойкостью (неизменяемость структуры при температурах эксплуатации), термопрочностью, химостойкостью, огнестойкостью, влагостойкостью.

Также необходимо иметь в виду, что на границе раздела волокно-матрица образуется пограничный слой (межфазный слой) со свойствами, отличными от свойств матрицы. Протяженность межфазного слоя (МФС) колеблется в достаточно широких пределах от 20 до 200 нм. Условия эксплуатации могут в различной степени повлиять на механические свойства матрицы в блоке и межфазного слоя. Вклад деформационных и прочностных свойств МФС в свойства КМ с высокой объемной долей наполнителя (40-70%) оказывается очень значительным и часто решающим. Количественная оценка свойств МФС затруднительна и проводится по таким механическим характеристикам КМ, как прочность сцепления, сдвиговая прочность, межслоевая прочность при сдвиге.

В конструкциях из КМ, эксплуатирующихся в различных климатических условиях, существенное значение имеет оценка влагопоглощения матриц и КМ в целом. Влагопоглощение матрицей на уровне  $5 \div 8\%$  массы снижают прочность и модуль упругости на  $15 \div 20\%$ , снижается температура стеклования, прочность и другие физико-механические свойства.

Ниже рассматриваются основные механические характеристики матричных компонент, влияющие на прочностные и деформационные свойства КМ.

**8.1.1. Вязкостные характеристики связующего.** Матричную компоненту КМ на этапе пропитки армирующего материала часто называют связующим. Поэтому в дальнейшем термины матрица, связующее являются синонимами.

Обеспечение монолитности КМ зависит от способности матричного материала (связующего) проникнуть к каждому волокну (либо к другому армирующему материалу), покрыть его, создать прочное сцепление (адгезионную связь), соединить волокна и создать монолитную структуру.

Качество пропитки армирующей компоненты зависит от вязкостных характеристик связующих на стадии совмещения (пропитки). Вязкость связующего оказывает существенное влияние на параметры формования и на технологический процесс получения изделий. Регулирование вязкости достигают за счет применения разбавителей, пластификаторов, жидкокристаллических структур, загустителей и др. Слишком низкая вязкость на стадии формования приводит к значительному вытеканию связующего из пакета армирующего материала, что нарушает заданное соотношение «матрица-наполнитель» в изготовленном изделии из КМ. Завышенный уровень вязкости расплава связующего затрудняет процесс монолитизации структуры КМ, так как препятствует удалению воздуха и летучих низкомолекулярных продуктов. Для пропитки без использования давления требуется вязкость  $0,1 \div 1,0$  Па·с.

Для КМ на основе терморезактивных связующих, которые используются преимущественно в виде растворов, процессы пропитки и уплотнения пакета заготовки при формовании разделены. Давление уплотнения определяется вязкостью расплава связующего после удаления растворителя и его реологическим поведением. Для терморезактивных связующих регулирование вязкости расплава на стадии формования осуществляется с учетом химизма и кинетики реакции отверждения. Для КМ на основе полиэфирных связующих, которые отверждаются по механизму полимеризации, процесс уплотнения проводят при температуре разложения инициатора, что обычно соответствует температуре отверждения. Вязкость регулируют использованием загустителей. Для КМ на основе эпоксидных связующих, отверждающихся по реакции полиприсоединения, процесс формования обычно проводят ступенчато; уплотнение при температуре ниже температуры отверждения, так как при окончательной температуре отверждения вязкость связующего высокая, что требует повышенных уровней давления. Температура уплотнения пакета заготовки определяется прежде всего вязкостью связующего и колеблется от  $20^{\circ}\text{C}$  до

180÷200°С. Соответственно и диапазон давлений уплотнения колеблется от 0,06 до 30 МПа. Широкие возможности регулирования технологических свойств эпоксидных связующих позволяют применять практически любые методы формования. Для полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе фенолоформальдегидных связующих, отверждающихся по реакции поликонденсации с выделением большого количества летучих продуктов, процесс уплотнения обычно проводят при температуре отверждения. Вязкостные характеристики термореактивных связующих на стадии формования КМ представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Вязкостные характеристики термореактивных связующих на стадии формования КМ [18, 54]

№	Связующее	T°, С	Вязкость, Пас
1	Полиэфирные ПН-1	T <sub>отв</sub>	1 ÷ 2
2	Эпоксидные	T <sub>отв</sub>	1 ÷ 10
3	Фенолформальдегидные	T <sub>отв</sub>	10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>5</sup>

Применение в качестве связующих термопластичных матриц вызывает большие трудности из-за высокой вязкости расплава (до 10<sup>9</sup> Па·с), что затрудняет получение качественных изделий. Использование растворов термопластов в растворителях для регулирования вязкости связующих (как правило, токсичных) значительно удорожает технологический процесс, ухудшается экология производства. В настоящее время развитие производства КМ на термопластичных связующих идет по пути использования твердофазного совмещения армирующего и матричного материалов [8, 16, 45]. Твердофазное совмещение основано на приближении армирующей и матричной компоненты друг к другу, что позволяет сократить путь расплава матричного материала (при температуре плавления) к поверхности армирующего и в межволоконное пространство. В зависимости от метода твердофазного совмещения различают: метод напыления (порошковая технология); пленочная технология, когда слои армирующего материала чередуются с пленочными слоями матричного материала; волоконная технология, когда волокна армирующей и матричной компонентов чередуются между собой. При твердофазном совмещении процесс пропитки и уплотнения происходит при воздействии температуры и давления. В этом случае давление формования

(уплотнения) будет определяться условиями пропитки, то есть вязкостью расплава и его реологическими свойствами (зависимостью вязкости от температуры, скорости напряжения сдвига). В табл. 8.2 приведены вязкости расплава некоторых типов термопластов, используемых в качестве связующих КМ [8, 38].

Таблица 8.2

Вязкость некоторых типов термопластов, используемых в качестве связующих [54]

№	Название полимера	Т°, С	Вязкость расплава, Пас
1	Полиэтилен высокой плотности, ПЭВМ	220	$10^3$
2	Полипропилен, ПП	200	$10^3$
3	Поливинилхлорид, ПВХ	200	$6 \times 10^3$
4	Поликарбонат, ПК	220	$10^3$
5	Полиэтилентерефталат, ПЭТФ	270	$10^2$
6	Полиамиды, ПА-6	250	$10^2$
	ПА-12	260	$4 \times 10^2$
	ПА-66	252	$10^2$

Более подробный перечень полимеров, которые используются или могут быть использованы в качестве связующих КМ полимерных композиционных материалов, дан в работах [7, 8, 38].

### **8.1.2. Влияние деформационных и прочностных свойств матриц на прочность КМ.**

#### *Деформационная совместимость матрицы и армирующего материала*

Наряду с физико-химической совместимостью компонентов в КМ не менее важное значение имеет и их деформационная совместимость. Даже при простейшем виде деформирования – растяжение однонаправленного КМ вдоль волокон – в объеме материала возникает сложнапряженное состояние. Напряженное состояние в матрице и армирующем материале возникает вследствие различия коэффициентов линейного термического расширения, химической усадки при отверждении связующего, градиента температур по объему материала при отверждении, коэффициентов Пуассона.

Различие в свойствах матриц и армирующих материалов приводит к разновременному разрушению компонентов, нарушению сплошности матрицы КМ в целом.

Для обеспечения сплошности (монолитности КМ) необходимо, чтобы матрицы и армирующие материалы отвечали определенным требованиям к соотношениям упругих и прочностных свойств и отвечали условиям сплошности. Независимо от вида нагружения они описываются системой неравенств между механическими характеристиками армирующего материала матрицы, прочностью их сцепления при сдвиге и отрыве, объемов армирования, обеспечивающих их совместную работу в КМ [17, 53]:

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{cy}}{\sigma_{\sigma}} &\geq \frac{v_M^{\frac{3}{2}}}{(1-v)^{0,5}} K_{\sigma_{\sigma}} (1-\varphi) \geq 0,015 \div 0,040; \\ \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_{\sigma}} &\geq \frac{1}{2} K_{\sigma_{\sigma}} \left[ \varphi + (3-2\varphi)v_{\sigma}(1-v_{\sigma}) \frac{E_{\sigma}}{E_M} \right] \geq 1,5 \text{ при } \varepsilon_M \geq 3-5\%; \\ \frac{\sigma_M}{\sigma_{\sigma}} &\geq (1,4 \div 1,6) \frac{v_{\sigma}^{\frac{3}{2}}}{(1+v_{\sigma})^{0,5}} K_{\sigma_{\sigma}} (1-\varphi) \geq 0,060; \\ \sigma_{\sigma} K_{\sigma_{\sigma}} n &\leq \frac{G_M(2-v_{\sigma})}{2(1-v_{\sigma})} \left[ 1 + \frac{v_{\sigma}(1-v_{\sigma})}{2} \cdot \frac{E_{\sigma}}{E_M} \right]; \\ \tau_M &\geq \tau_{cy} \text{ при } \tau_M = (0,60 \div 0,75)\sigma_{\sigma}, \end{aligned} \quad (8.1)$$

где  $K_{\sigma_{\sigma}} = \frac{\sigma_{разр}}{\sigma_{\sigma}}$  – коэффициент использования прочности волокон в КМ;  $\sigma_{разр}$  – напряжение в волокнах, соответствующее напряжению разрушения КМ;  $\sigma_{\sigma}$  – разрушающее напряжение волокон;  $\varphi$  – коэффициент эффективности, определяющий границу напряжений, выше которой волокно утрачивает несущую способность;  $v_M, v_{\sigma}$  – коэффициенты Пуассона матрицы и волокна;  $G_M$  – модуль сдвига матрицы;  $n$  – число слоев в КМ;  $\sigma_M, E_M, \varepsilon_M, \tau_M, \tau_{cy}$  – рассчитанные показатели свойств матриц (предел прочности при растяжении, модуль упругости, предельное удлинение, предел прочности на сдвиг, прочность сцепления матрицы с волокном), обеспечивающие монолитность однонаправленных композитов;  $\sigma_{\sigma}, E_{\sigma}, \varepsilon_{\sigma}, v_{\sigma}$  – предел прочно-

сти, модуль упругости, предельное удлинение, объемное содержание волокон, используемых в качестве армирующего материала.

Если сравнить свойства матрицы (табл. 8.3), обеспечивающие монолитность однонаправленных стекловолоконитов, со свойствами промышленных полимерных матриц, то наглядно видно, что свойства выпускаемых матриц значительно ниже требуемых из условия монолитности. По технологическим причинам не обеспечивается требуемое значение  $\tau_{сц}$  и низкой пористости.

Таблица 8.3

Рассчитанные показатели свойств матриц, обеспечивающих монолитность однонаправленных стекловолоконитов [53] и свойства выпускаемых эпоксидных матриц (отвержденных смол)

Свойства стекловолокна	Требуемое свойство матрицы	Свойства выпускаемых эпоксидных матриц (усредненные)
$\sigma_{\epsilon} = 2350$ МПа	$\sigma_{м} = 140$ МПа	$\sigma_{м} = 40 - 120$ МПа
$E_{\epsilon} = 75000$ МПа	$E_{м} = 4500$ МПа	$E_{м} = 2600 - 4000$ МПа
$\epsilon_{\epsilon} = 3\%$	$\epsilon_{м} = 4,5\%$	$\epsilon_{м} = 1,7 - 3,5\%$
	$\tau_{м} = 94$ МПа	$\tau_{м} = 26 - 70$ МПа
	$\tau_{сц} = 94$ МПа	$\tau_{сц} = 14 - 24$ МПа

### *Влияние прочности полимерных матриц на прочность КМ*

Прочность матрицы, удовлетворяющая требованиям монолитности однонаправленного ПКМ при нагружении вдоль оси волокон [40]

$$\sigma_{м} \geq \frac{\left(\frac{\nu_{\epsilon}}{1-\nu_{\epsilon}}\right) \cdot E_{м}^* \bar{E}_{\epsilon} (\alpha_{м}^* - \alpha_{\epsilon}^*) \cdot \Delta T}{E_{м}^* + \bar{E}_{\epsilon} \left(\frac{\nu_{\epsilon}}{1-\nu_{\epsilon}}\right)} + E_{м} \bar{\epsilon}_{\epsilon}, \quad (8.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициенты линейного термического расширения матрицы и волокон;  $T$  – температура;  $\epsilon$  – деформация;  $\bar{E}_{\epsilon}$  – усредненный модуль упругости волокон; \* – значения в интервале температур ( $T_c - T_{комн}$ ).

Исчерпание прочности волокон позволяет достичь теоретического предела прочности КМ при выполнении двух условий: отсутствие продольного растрескивания и низкой концентрации напряжений вблизи дефектов. Условием пропорциональности между прочностью КМ и долей волокон является хорошая адгезионная связь между волокнами и матрицей и низкая пористость материала. Несущая способность (прочность) однонаправленных КМ при растяжении вдоль направления армирования определяется в основном прочностью волокон (их прочность в 20-60 раз выше прочности типичных полимерных матриц). Тем не менее, прочностные свойства матрицы существенно влияют на прочность КМ. Адгезионная прочность связи со стеклянным волокном составляет для полиэфирных матриц  $9,8 \div 14,7$  МПа, эпоксифенольных –  $14,7 \div 24,5$  МПа. Очень важным фактором взаимодействия матрицы и волокон является соотношение адгезионной и когезионной прочности (т.е. соотношение между прочностью сцепления матрицы и волокон и прочностью матрицы) (в некоторых случаях и волокон). Благодаря когезионной прочности матрицы и адгезионной прочности на границе матрица-волокно обеспечивается вовлечение в работу незагруженных элементов армирующего материала. Удельный вклад адгезионной и когезионной прочности матрицы в прочность КМ при растяжении превышает удельный вклад деформативности матрицы в несколько раз.

В зависимости от соотношения между прочностью матрицы, волокна и прочностью их сцепления на границе раздела при каждом виде деформирования возможны три случая разрушения ПКМ:

- когезионное по матрице ( $\sigma_e > \sigma_{cy} > \sigma_m$ );
- когезионное по волокну ( $\sigma_m > \sigma_{cy} > \sigma_e$ );
- адгезионно-когезионное по межфазной границе и по матрице ( $\sigma_e > \sigma_m \geq \sigma_{cy}$ ).

Использование матриц с повышенными прочностными и адгезионными характеристиками приводит к хрупкому разрушению.

#### *Влияние матрицы на прочность КМ при сжатии*

Прочность при сжатии определяется прочностью сцепления матрицы с волокном. Характер разрушения КМ при сжатии описыва-

ется целым спектром механизмов разрушения: расслоением, потерей устойчивости волокон, сдвигом, разрушением волокон. Расслоение происходит из-за низкой прочности сцепления матрицы и армирующей компоненты. Для обеспечения высокой прочности КМ при сжатии выбирают высокопрочные матрицы.

Необходимость использования матриц с высокой прочностью на практике не удовлетворяется, так как прочность промышленных матриц значительно ниже требуемой.

Анализ разрушения КМ при межслойном сдвиге, растяжении и сжатии поперек волокон при когезионном и адгезионно-когезионном разрушении по поверхности раздела показывает на необходимость увеличения прочности сцепления на границе раздела волокно-матрица и прочности матрицы при сдвиге. В работе [53] указывается, что верхний предел необходимой прочности сцепления при условии, что прочность КМ при межслойном сдвиге не ниже прочности матрицы при сдвиге ограничивается величиной  $\tau_{cy} > 2 \frac{\tau_m}{\pi}$  или  $\tau_{cy} \cong 0,64\tau_m$ .

## 8.2. Подготовка исходных компонентов КМ

**8.2.1. Подготовка связующих.** В качестве связующих при жидкофазном совмещении армирующих и матричных материалов применяют композиции из полимерных смол (полиэфирные, эпоксидные, фенолформальдегидные и др.) и различных добавок, определяющих технологические и эксплуатационные свойства материалов (отвердители, инициаторы, катализаторы, ускорители, разбавители, эластификаторы и т.п.).

Для пропитки применяют связующие, находящиеся в вязкотекучем состоянии. Свойствами вязкой жидкости обладают некоторые смолы и олигомеры, например, полиэфирмалеиновые смолы и олигоэфиракрилаты (ПН-1-ПН-4, ПН-11, ТГМ-3, МГФ-9, ТМГФ-11 и др.), эпоксидные смолы ЭД-20, ЭД-16 и др.

Вязкость полиэфирмалеинов резко снижается при введении в

их состав мономерных или олигомерных отвердителей, например, стирола или менее токсичного олигоэфиракрилата ТГМ-3.

Вязкость эпоксидных смол уменьшается введением низкомолекулярных эпоксидных олигомеров-разбавителей ДЭГ-1, ТЭГ-1 и др., сополимеризующихся со смолами в процессе отверждения.

Твердую фенолформальдегидную смолу растворяют в фурфуроле (связующее ФН), который играет роль активного разбавителя и одновременно отвердителя. Роль активного разбавителя для фенолформальдегидной смолы может играть и фуриловый спирт.

Вводимые в состав связующих активные разбавители существенно влияют на структуру и эксплуатационные свойства полимерных матриц. Так, например, с увеличением в составе эпоксидных связующих разбавителя ДЭГ-1, который встраивается в сетку полиэпоксида и увеличивает расстояние между поперечными связями, теплоустойчивость пластика резко уменьшается. Поэтому для придания требуемой вязкости в связующие дополнительно вводят пассивные растворители, в качестве которых чаще всего применяют ацетон, этиловый спирт, спиртоацетоновые смеси. Растворителями могут служить также циклогексанон, диоксан, метилэтилкетон, этилацетат, бутилацетат, ароматические углеводороды (бензол, ксиол, толуол и др.), хлорированные углеводороды (дихлорэтан, четыреххлористый углерод и др.).

При подборе растворителей учитывают параметр растворимости  $\gamma$  растворителя и полимера. Раствор будет образовываться только в том случае, если  $\gamma$  растворителя и полимера приближаются друг к другу.

Приготовление связующих осуществляется в якорных, пропеллерных и планерных пластинчатых мешалках. Вязкие компоненты связующего предварительно смешивают в лопастных смесителях. Емкости смесителей снабжают рубашкой. В зазоре между рубашкой и стенкой емкости циркулирует термостатирующая жидкость, обеспечивающая необходимый температурный режим смешивания компонентов связующего. Существует определенный порядок загрузки компонентов связующего в смеситель. В первую очередь загружают смолу или олигомер, затем разбавители, растворители, пластификаторы и другие компоненты. Перед загрузкой каждого последующего компонента связующего производят тщательное диспергирование ра-

нее введенных. Для предотвращения преждевременного гелеобразования отвердители и инициаторы вводят в связующее в последнюю очередь, одновременно снижают и температуру термостатирующей жидкости. Ускорители и катализаторы процессов отверждения добавляют в связующее непосредственно перед его использованием. Крупные куски твердых смол перед загрузкой в смеситель измельчают до размеров не более 5-10 мм в мельницах молоткового типа. Совмещение твердых смол с эластомерными модификаторами (каучуками) производят на вальцах.

Порошки и гранулы полимеров вначале заливают половинным количеством растворителя, чтобы вызвать набухание полимера, а затем добавляют оставшуюся часть растворителя и перемешивают связующее до образования однородного раствора.

Качество связующего и пригодность его для производства препрегов оценивают по технологическим характеристикам. Некоторые из них используют также для расчета технологических параметров процессов получения препрегов и формования из них готовых изделий [49, 56].

Основными технологическими характеристиками связующего является плотность, концентрация раствора связующего, вязкость раствора или расплава, количество летучих, время вязкотекучего состояния (гелеобразования), время отверждения, экзотермичность, упругость паров компонентов связующего, поверхностное натяжение и др. Плотность связующего, определяемая пикнометрическим или ареометрическим методами, зависит от плотности применяемых компонентов и их количественного соотношения в связующем. Если известны плотности  $\rho_i$  и относительные объемные содержания  $v_i$  компонентов связующего, то плотность вычисляют по формуле:

$$\rho_{св} = \sum_{i=1}^{i=n} \rho_i v_i.$$

По плотности связующего судят о его составе, и этот параметр связующего является паспортной характеристикой. По плотности связующего контролируют и концентрацию растворимых в нем компонентов. В производстве препрегов применяют связующие с возможно большей концентрацией (40-60 %), так как в этом случае увеличивается нанос связующего на поверхность волокнистого наполнителя. С другой стороны, с ростом концентрации растет и вязкость

связующего, что приводит к резкому уменьшению скорости проникновения его в межволоконное пространство наполнителя, ухудшается и качество пропитки.

Промышленные полиэфирные связующие типа ПН, содержащие от 28 до 45 % стирола, имеют вязкость от 0,5 до 2,5 Па·с. Вязкость связующих на основе различных эпоксидных композиций изменяется от 0,1 до  $15 \cdot 10^3$  Па·с, а спиртовых растворов фенолформальдегидных смол при содержании растворителя 35 - 55 % - от 0,04 до 10 Па·с.

В лабораторных условиях вязкость связующего определяют на капиллярных, ротационных вискозиметрах и вискозиметрах с падающим шариком (вискозиметр Хеплера).

Для экспресс-анализа в производственных условиях чаще используют капиллярные вискозиметры с калиброванными отверстиями (вискозиметры ВЗ-1, ВЗ-4). За показатель вязкости в этом случае принимают время истечения определенного объема связующего через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Имеются таблицы перерасчета этого показателя вязкости в Пас.

Оптимальная вязкость связующих, применяемых для пропитки волокнистых наполнителей, лежит в интервале 0,1 - 1 Па·с. Вязкость связующего  $\eta$  зависит от концентрации  $c$  и молекулярной массы  $M$  растворенных олигомера, полимера, вязкости растворителя  $\eta_p$ , температуры  $T$  и может быть предварительно оценена по следующим уравнениям [35, 37]:

$$\eta_{cv} = \eta_p \left\{ [c|\eta|_x + a^2 c] + 1 \right\}, \quad (8.3)$$

где  $|\eta|_x = k M^\alpha;$  (8.4)

$$\eta_{cv} = \eta_0 e^{\frac{u}{RT}}; \quad (8.5)$$

здесь  $|\eta|_x$  – характеристическая вязкость раствора;  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\eta_0$  – константы;  $u$ ,  $R$  – энергия активации вязкого течения и универсальная газовая постоянная соответственно;  $T$  – температура, К.

Источниками летучих продуктов в связующих являются пассивные растворители и низкомолекулярные вещества, выделяющиеся при отверждении связующего. В процессе отверждения при повышенных температурах и вакуумировании из связующего могут до-

полнительно удаляться и реакционноспособные компоненты (мономеры, отвердители, активные разбавители), имеющие низкую упругость паров. В результате изменяется стехиометрический состав связующего и резко ухудшается свойство отвержденной композиции.

Поэтому упругость паров, составляющих связующее компонентов, учитывают при назначении максимальной степени разряжения в процессе вакуумной пропитки волокнистого наполнителя и мембранных методов формования изделий из препрегов ПКМ (вакуумное, пневматическое и автоклавное формование).

Вязкость терморезактивных связующих (кроме имидных) даже при комнатной температуре постепенно возрастает вследствие идущих в нем химических реакций, приводящих к увеличению молекулярной массы олигомеров. При определенной степени превращения в полимерной части связующего образуется редкая сетка, и оно теряет текучесть, переходит в гелеобразное состояние. С повышением температуры образование геля происходит за более короткое время. Время гелеобразования  $\tau_{го}$  (вязкотекучее состояние) для большинства терморезактивных связующих связано с абсолютной температурой  $T$  экспоненциальной зависимостью типа

$$\tau_{го} = \tau_0 e^{\frac{Q}{RT}}, \quad (8.6)$$

где  $\tau_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $Q$  – энергия активации процесса отверждения.

Так, например, для связующего ЭДТ-10П эта зависимость выглядит следующим образом (табл. 8.4)

Таблица 8.4

Температура, °С	20	40	80	120	140
Время гелеобразования	6 сут.	3 сут.	2ч	15мин	8мин

Таким образом, повышая температуру с целью снижения вязкости связующего, способствующего ускорению пропитки и повышению качества препрега, всегда необходимо учитывать резкое уменьшение жизнеспособности связующего, а, следовательно, и времени пропитки.

Время гелеобразования в лабораторных условиях определяют на пластометре с параллельными плитами методом торсионного маятника и методом термопиков, в производственных условиях – методом плитки.

Большое значение для процесса пропитки имеет поверхностное натяжение  $\sigma$ , которое для большинства связующих лежит в пределах 25 – 40 мН/м. Величину  $\sigma$  можно уменьшить введением в состав связующего различных растворителей и поверхностно-активных веществ.

**8.2.2. Подготовка волокнистых армирующих материалов (заготовок).** В качестве волокнистых наполнителей применяют различного рода волокнистые структуры из непрерывных и штапельных волокон. К непрерывным структурам могут быть отнесены крученые и некрученые первичные нити, состоящие из 100 – 200 элементарных волокон, жгуты, получаемые объединением определенного количества первичных нитей, а также однонаправленные ленты. К этой группе относят ткани из непрерывных волокон с различными видами плетения, мягкие стеклохолсты прошивного типа и др.

Из штапельных структур изготавливают жесткие холсты, объемные заготовки, получаемые напылением, насасыванием или осаждением ткани, бумаги.

В процессе формирования элементарных волокон их поверхность покрывают замасливателями на основе минеральных масел, жирных кислот, поливинилового спирта и др. для улучшения текстильных свойств волокон (переметки, ткачества и т.д.). Однако замасливатели резко ухудшают адгезионные свойства волокон, поэтому перед пропиткой их удаляют отмывкой в подходящем растворителе или термической обработкой при температуре выше температуры деструкции вещества, из которого изготовлен замасливатель. Для волокон из минеральных веществ предпочтение отдают термообработке. Так, из содержащегося на поверхности стеклянных волокон 1,5 – 2 % замасливателя отмывкой удается снизить его количество до 0,3 – 0,6 %, в то время как после термообработки при 300 °С на поверхности волокна остается только 0,05 % замасливателя. Вследствие увеличения поверхностной энергии смачиваемость термообработанных волокон связующим резко возрастает. Однако в отформованном из такого препрега материале существенно увеличиваются остаточные напряжения, возникающие на границе раздела волокно-связующее вследствие большого различия их термоупругих свойств. Для уменьшения этих напряжений и увеличения прочности сцепления компонентов ПКМ волокна покрывают аппретами – многофункциональными

ми соединениями, способными взаимодействовать с поверхностью волокна и связующим. Для эпоксидных и фенолформальдегидных связующих применяют аппрететы марок АГМ - 3, АГМ - 9, для полиэфирных – ГВС - 9, ГКЖ - 12. Указанные выше аппрететы являются поверхностно активными веществами, поэтому их можно вводить и в состав связующего. При пропитке эти аппрететы осаждаются на поверхности наполнителя в виде тонких пленок. Для более эффективного снижения остаточных напряжений в качестве аппрететов, вводимых в связующее, применяют высокомолекулярные блокосополимеры типа КЭП - 2, которые образуют на поверхности волокнистого наполнителя мобильные пленки толщиной до 250 А.

Целесообразно использовать так называемые прямые замасливатели, в состав которых входят вещества (обычно это кремнийорганические соединения), способные увеличить прочность сцепления связующего с наполнителем.

Аппретированные и неаппретированные стеклянные волокна, которые долго хранились до приготовления препрегов, подвергают сушке при температуре 80 – 100 °С для удаления адсорбированной влаги.

Поверхность углеродных волокон покрыта слоем текстильной шлихты на основе поливинилового спирта. Замасливатель и сорбированную поверхность влагу удаляют нагреванием волокна в среде азота, например, путем пропускания по нему электрического тока. Затем освобожденную поверхность покрывают слоем аппрета или протектирующего полимера. Наилучшие результаты получают в том случае, когда на поверхность сначала наносят тонкий слой мономера, хорошо смачивающего волокно и заполняющего открытые поры. После полимеризации мономера волокна покрывают тонким слоем протектора, пломбирующего поверхностные дефекты. Поверхность углеродных волокон подвергают окислению в сильных окислителях, например, в кипящей  $\text{HNO}_3$ . В результате такой обработки на порядок увеличивается поверхность волокон, возрастает количество активного водорода, кислорода, спиртовых и фенольных групп, вызывающих возрастание поверхностной энергии. Особенно эффективно сочетать растворение пленки замасливателя электрохимическим способом с действием ультразвука.

Несмотря на то, что поверхностная энергия бора и его окислов много больше, чем углеродного волокна, полимерные связующие

смачивают его довольно плохо. Краевой угол смачивания борных волокон эпоксидной смолой составляет около  $30^\circ$ . Это вызвано загрязнением поверхности волокон адсорбированными веществами. Очистку поверхности осуществляют водными растворами кислот или кипящим этанолом. В результате такой обработки происходит не только десорбция, но и снятие с поверхности волокон окисной пленки, благодаря чему возрастает поверхностная энергия, а краевой угол смачивания снижается до  $5 - 7^\circ$ .

Среди органических волокон для препрегов в отечественной промышленности применяют в основном волокна типа СВМ, изготавливаемых на основе ароматических полиамидов. Поверхность этих волокон обычно покрыта текстильной шлихтой, которую перед нанесением связующего отмывают в подходящем растворе. Полиамидные волокна чрезвычайно гигроскопичны, поэтому перед пропиткой их подвергают сушке при температуре ниже температуры стеклования волокнообразующего полимера.

Органические волокна структурно неоднородны. Многие из них состоят из ориентированного ствола с высокой степенью кристалличности и аморфной оболочки.

В процессе получения препрегов низкомолекулярные компоненты связующего диффундируют в аморфные оболочки волокон, заполняют микродефекты, взаимодействуют с функциональными группами волокнообразующего полимера. После отверждения связующего граница раздела компонентов в органопластике становится размытой, а прочность сцепления связующего с наполнителем становится выше трансверсальной прочности волокна. Набухание в компонентах связующего при повышенной температуре может привести к дезориентации волокон и снизить тем самым их прочность и упругие характеристики. Кроме того, в результате диффузии низкомолекулярных компонентов связующего в волокне изменяется состав смоляной фазы, в результате чего происходит недоотверждение полимерной матрицы, особенно в зоне, непосредственно прилегающей к волокну. Во избежание приведенных выше эффектов поверхность органических волокон покрывают барьерным слоем [34, 46].

**8.2.3. Технологические характеристики волокнистых наполнителей.** К технологическим относятся следующие характеристики и свойства волокнистых наполнителей.

1. Диаметр элементарных волокон,  $d$ , мкм.

2. Линейная плотность длинномерных волокнистых структур (нити, жгуты) в тексах,  $T_m$ ; текст представляет собой массу (в граммах) нити или жгута длиной 1000 м.

3. Поверхностная плотность, представляющая собой массу единицы площади листовых волокнистых структур (ткани, холсты, бумага),  $\rho_s$ , кг/м<sup>2</sup>.

4. Относительная объемная пористость (коэффициент пористости) волокнистых структур  $\Pi$  в состоянии поставки, рассчитываемая по формуле:

$$\Pi = 1 - \rho_{стр} / \rho_{нан}, \quad (8.7)$$

где  $\rho_{стр}$  – плотность волокнистой структуры, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{нан}$  – плотность материала, из которого изготовлено волокно, кг/м<sup>3</sup> и ее зависимость от давления уплотнения.

Функциональную зависимость  $\Pi=f(p)$  определяют экспериментально, уплотняя модельные пакеты различными давлениями  $p_i$ . В процессе уплотнения измеряют высоту пакета. По результатам эксперимента строят зависимость в координатах  $h=f(\lg p)$  (кривую уплотнения), где  $h$  – относительная высота пакета;  $h=H_{pi}/H_0$ ; здесь  $H_{pi}$  – высота пакета при давлении  $p_i$ ,  $H_0$  – начальная высота пакета.

Кривую уплотнения по формуле

$$\Pi = 1 - \rho_s / (\rho_{нан} H_{pi}) \quad (8.8)$$

пересчитывают в зависимости  $\Pi=f(p)$ .

На рис. 8.1 представлены кривые уплотнения различных стекловолокнистых наполнителей, в которых можно выделить три зоны. Для первой зоны характерны большие обратимые деформации упругого изгиба пучка волокон. Во второй зоне увеличивается количество контакта между волокнами, возрастают контактные напряжения. В третьей зоне начинается разрушение волокнистого наполнителя, так как контактные напряжения достигают предела прочности волокна.

В пределах первой зоны взаимосвязь между относительной толщиной пакета  $h$  и давлением уплотнения  $p$  хорошо описывается формулой

$$h = A - B \lg p,$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Коэффициенты  $A$  и  $B$  различных видов наполнителей [44]

№ пп	Тип стекловолокнистой структуры	Коэффициенты	
		$A$	$B$
1.	Жгутовая ткань	0,812	0,188
2.	Ткань полотняного переплетения	0,837	0,165
3.	Холст жесткий из рубленых нитей	0,606	0,394
4.	Холст из непрерывных нитей	0,626	0,374
5.	Холст мягкий	0,523	0,477
6.	Холст воздушного вытягивания	0,555	0,445

Из кривых уплотнения следует, что при увеличении давления выше границы первой зоны, уменьшение пористости пакета, а следовательно, и увеличение содержания волокнистого наполнителя значительно замедляется.

По кривым уплотнения с учетом массы единицы площади листовых волокнистых наполнителей  $\rho_s$  и коэффициента пористости  $\Pi$  относительное объемное содержание волокна в пакете можно определить по формулам (8.8) и (8.9).

$$V = 1 - \Pi = \rho_s / (\rho_{nan} H_{pi}). \quad (8.9)$$

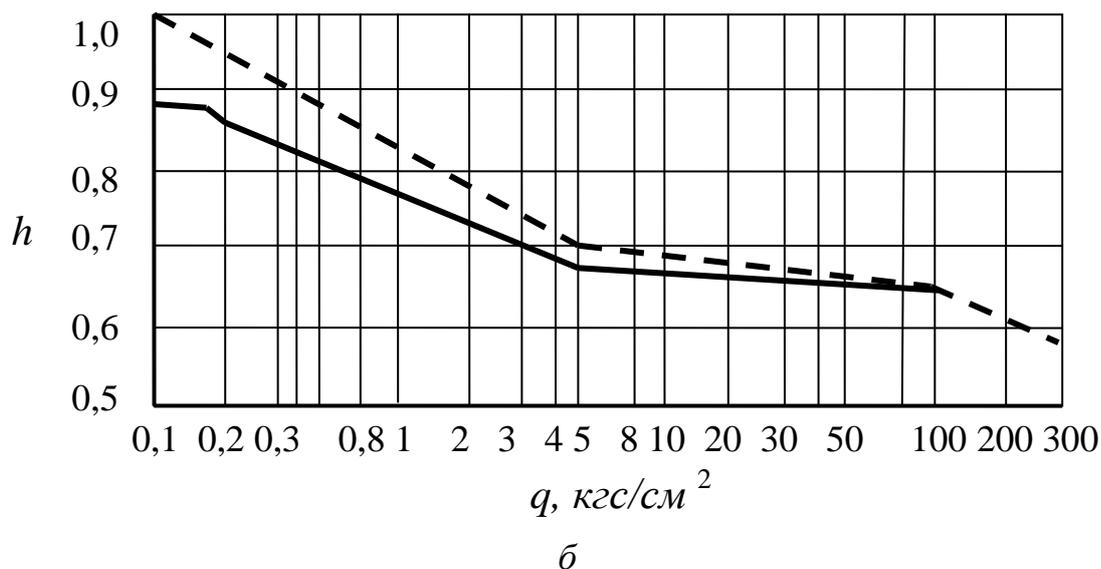
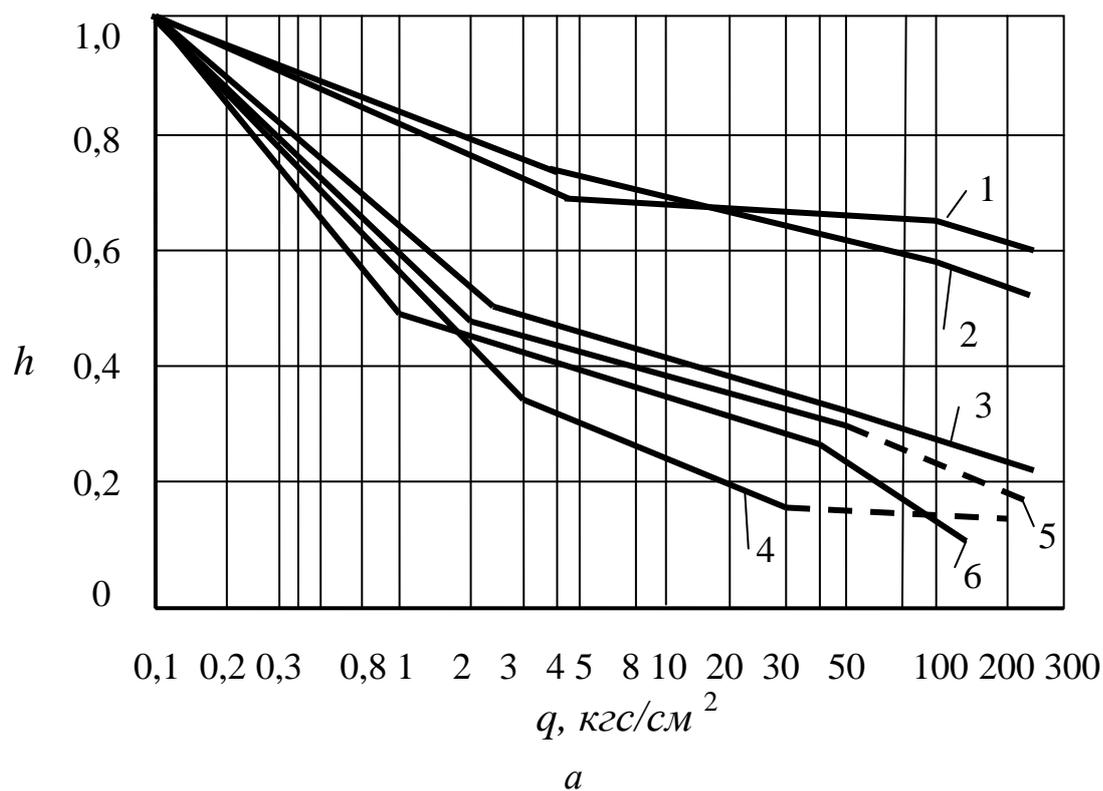


Рис. 8.1. Кривые уплотнения пакетов из различных стекловолокнистых наполнителей:

$a$  – 1 – жгутовая ткань; 2 – ткань полотняного плетения; 3 – холст из непрерывных нитей; 4 – холст жесткий из рубленых волокон; 5 – холст воздушного вытягивания; 6 – мягкий холст;  $b$  – кривые уплотнения (–) и разгрузки (– –) пакета из жгутовой ткани

5. Деформационно-прочностные характеристики – модуль упругости волокна  $E$  и разрывную прочность волокнистой структуры (нитей, жгутов, тканей и т.д.) учитывают при назначении усилия про-

тяжки наполнителя через тракт пропиточной машины и диаметров путевых роликов машины.

6. Поверхностная энергия волокнистого наполнителя позволяет судить о возможности совмещения его с конкретным видом связующего. Поверхностная энергия различной природы приведена в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Поверхностная энергия волокон различной природы

№ пп	Природа волокнистого наполнителя	Поверхностная энергия $a$ , эрг/см <sup>2</sup>
1.	Алюмоборсиликатное	425
2.	Кварцевое аморфное	260
3.	Борное	250
4.	Углеродное	50-70
5.	СВМ	30
6.	Металлическое	1300
7.	Нитевидные кристаллы	до 2000

7. Для пары волокнистый наполнитель – связующее еще одной важной характеристикой является краевой угол смачивания  $\theta$ .

Смачивание поверхности волокна и проникновение связующего в капилляры волокнистой структуры происходит только в том случае, когда  $\theta < 90^\circ$ . Некоторые технологические характеристики матов (холстов) и тканых наполнителей приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Некоторые технологические характеристики матов (холстов) и тканых наполнителей [7, 8]

Вид волокна	Марка ткани, холста	Тип переплетения	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Толщина, мм	Относительная пористость
1	2	3	4	5	6
Стекловолоконное	T-10	сатин 8/3	0,29	0,23	0,496
	T-11	сатин 8/3	0,39	0,30	0,480
	T-12	или 5/3	0,37	0,30	0,510
	T-13	полотно	0,29	0,27	0,570
	T-14		0,31	0,29	0,573
	A-1		0,11	0,10	0,560
	A-2		0,07	0,06	0,534

1	2	3	4	5	6
Стеклоянное волокно	ТСУ8/Э-ВМ	сатин 8/3	0,32	0,27	0,526
	ТУ ПР	полотно	0,29	0,26	0,554
	ТС-5Н		0,30	0,47	0,545
	МТТС-2,1	объемное	2,10	2,20	0,618
	МТБС-2,5	плетение	2,90	2,50	0,536
	МТБС-8		8,60	8,40	0,590
	жесткий холст	рубленые, клееные нити длиной 30-60 мм	0,20-0,6	0,3-1,5	0,736-0,770
	мягкий холст	рубленые нити, скрепленные прошивкой	0,6-2,5	0,9-3,0	0,734-0,50
	ХЖ КН	непрерывные клеенные нити, уложенные восьмеркой	0,3-0,5	0,5-2,0	0,760-0,90
Органическое волокно СВМ		полотно	0,11	0,25-0,30	0,662-0,718
			0,075	0,15	0,615
		рогожа 2/2	0,18	0,35	0,605
			0,11	0,20	0,577
		сатин 8/3	0,16	0,40	0,692
	однонаправленная лента	0,1	0,35	0,626	

### 8.3. Жидкофазное совмещение связующих с наполнителем (пропитка)

В процессе пропитки волокнистый наполнитель окунают в связующее (пропитка окунанием), приводят его в контакт с поверхностью связующего (контактная пропитка) или напыляют жидкое связующее на поверхность наполнителя (совмещение напылением с последующим оплавлением).

Проникновение связующего в межволоконное пространство осуществляется под действием сил поверхностного натяжения, сил

тяжести, атмосферного давления и внешних сил, специально прикладываемых к связующему (избыточное давление газа, центробежные силы и т.п.). Сопротивление волокнистого наполнителя фильтрации связующего зависит от размера пор межволоконного пространства. Поскольку поры отличаются друг от друга размерами, то условия заполнения их связующими могут быть разными. Однако, поскольку в реальных условиях скорости движения связующего по межволоконным капиллярам чрезвычайно малы, фильтрационные характеристики пористой среды предложено оценивать интегральной характеристикой – коэффициентом проницаемости  $K$ .

Коэффициент проницаемости характеризует интенсивность фильтрации связующего с вязкостью  $\eta$  через пористую среду под давлением  $p_n$ . Его рассчитывают по формуле

$$K = \frac{\eta Q l}{S p_n}, \quad (8.10)$$

в которую подставляют данные, полученные экспериментально на модельных установках и пакетах конкретных волокнистых наполнителей, пропитываемых конкретными связующими.

В формуле (8.10)  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $Q$  – расход связующего, фильтруемого через пакет, см/с;  $l$  и  $S$  – длина и поперечное сечение пакета;  $p_n$  – перепад давления по длине пакета, МПа.

Величина коэффициента фильтрации зависит от структуры волокнистого наполнителя, степени анизотропии его в различных направлениях [52, 56].

Приведенные в табл. 8.8 данные показывают, что коэффициенты проницаемости в тканях различного переплетения в направлении основы и утка мало отличаются друг от друга и резко уменьшаются в направлении, перпендикулярном толщине листового наполнителя.

По мере увеличения степени уплотнения пропитываемого волокнистого наполнителя коэффициент проницаемости его уменьшается.

№ пп	Структура стекловолокон, наполнителя	Коэффициент проницаемости $K$	
		по основе и утку	перпендикулярно толщине
1.	Ткань полотняного переплетения	$(0,1-0,2) \times 10^3$	$(0,002-0,004) \times 10^3$
2.	Ткань сатинового переплетения	$(0,15-0,25) \times 10^3$	$(0,003-0,005) \times 10^3$
3.	Жгутовая ткань	$(0,25-0,35) \times 10^3$	$(0,004-0,008) \times 10^3$
4.	Стекломат	$(0,7-1,0) \times 10^3$	$(0,05-0,62) \times 10^3$

### 8.3.1. Пропитка волокнистых наполнителей без давления.

**Пропитка волокнистых наполнителей окунанием. Сушка препрегов.** В процессе пропитки окунанием волокнистый наполнитель в виде нитей, жгутов или ткани сматывают со шпулей, бобин или рулонов и по тракту установки для пропитки направляют в ванную со связующим (рис. 8.2). На выходе из пропиточной ванны производят отжим избытка связующего и препрег направляют в сушильную камеру, где происходит удаление растворителя или предотвращение связующего. Готовый препрег сматывают в рулон, прокладывая между слоями антиадгезионную пленку, если имеется опасность слипания полуфабриката.

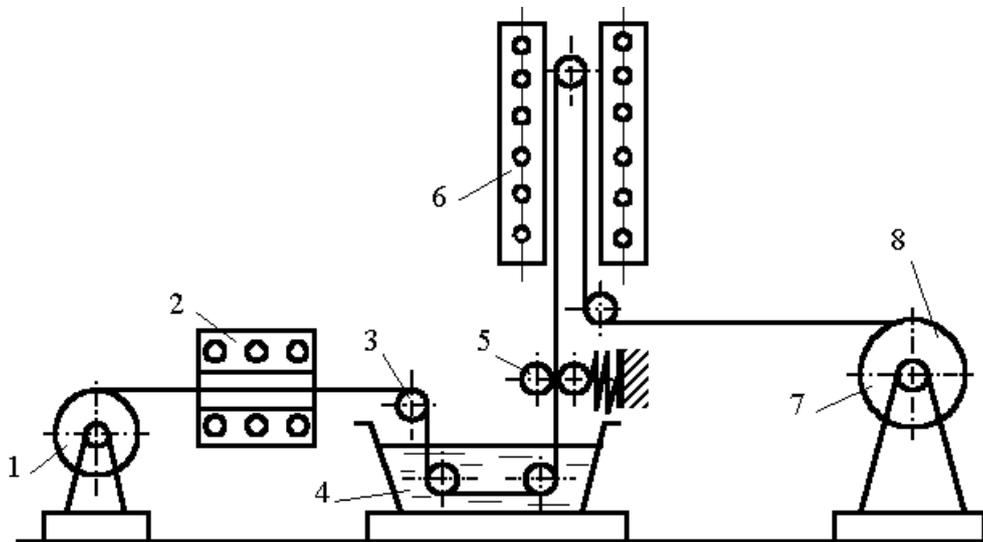


Рис. 8.2. Схема установки для пропитки волокнистых наполнителей окунанием:

1 – рулон наполнителя; 2 – камера сушки волокон; 3 – путевые ролики; 4 – пропиточная ванна; 5 – отжимное устройство; 6 – камера сушки препрега; 7 – антиадгезионная пленка; 8 – рулон препрега

Рис. 8.3 поясняет закономерности проникновения связующего в межволоконное пространство наполнителя.

Жгут диаметром  $2R$  находится в ванне со связующим на глубине  $H$ . Связующее проникает в межволоконное пространство жгута через боковую поверхность, сквозь щели шириной  $\delta$ , образованные параллельно уложенными элементарными волокнами.

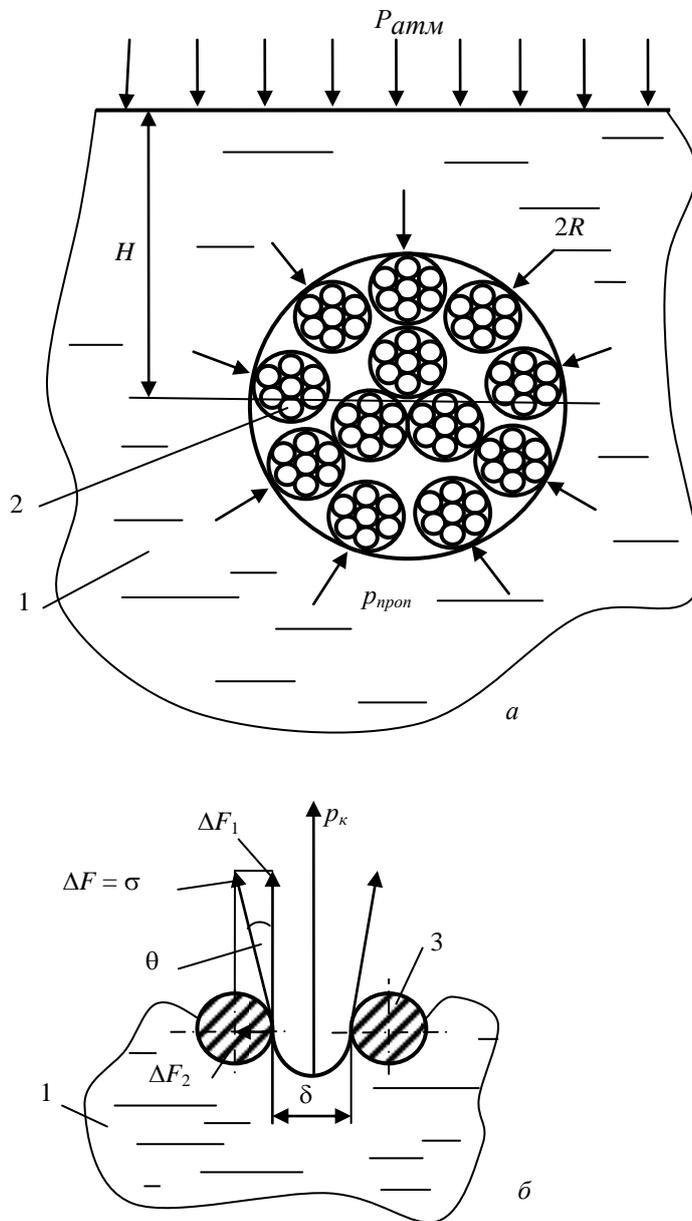


Рис. 8.3. Схема, поясняющая механизм пропитки связующим волокнистого наполнителя: 1 – связующее; 2 – жгут; 3 – элементарные волокна;

$P_{атм}$  и  $P_{прон}$  – атмосферное давление и давление пропитки

Движение связующего в процессе пропитки волокнистого наполнителя хорошо описывается законом Дарси:

$$V_{\phi} = -\frac{K}{\eta} \frac{dp_n}{dR}, \quad (8.11)$$

где  $V_{\phi}$  – скорость фильтрации;  $K$  – коэффициент проницаемости;  $dp_n/dR$  – градиент давления по радиусу жгута.

В соответствии с теорией гидравлического радиуса, формула, связывающая  $K$  с характеристиками пропитываемого наполнителя, выглядит следующим образом:

$$K = a\Pi^3 / [bf(1 - \Pi^2)], \quad (8.12)$$

где  $a = \sin^2 \alpha$  – фактор ориентации каналов пор по отношению к направлению потока связующего (для хаотически распределенных волокон  $a = 0,75$ );  $b$  – фактор формы каналов (для каналов между прямолинейными цилиндрами  $b = 3$ );  $f$  – удельная поверхность волокон (отношение единицы поверхности волокна к площади его поперечного сечения).

Давление пропитки  $p_n$  складывается из нескольких составляющих:

$$p_n = 2\sigma \cdot \cos \frac{\theta}{\delta} + \rho g H + p_{атм} - p_{возд} \quad (8.13)$$

капиллярного давления, гидростатического и атмосферного. Воздух, находящийся в межволоконном пространстве, оказывает сопротивление движению связующего. Под действием удельной капиллярной силы  $\Delta F_2 = \sigma \cdot \sin \theta$  происходит сближение элементарных волокон, а, следовательно, уменьшение  $\delta$  и снижение скорости пропитки.

Пропитку интенсифицируют вакуумированием межволоконного пространства наполнителя (вакуумная пропитка), увеличением давления над свободной поверхностью связующего (пневматическая пропитка), возбуждением в связующем акустического давления (пропитка с наложением механических колебаний), наложением на связующее центробежных сил (центробежная пропитка) и другими способами.

Необходимое содержание связующего в препреге обеспечивается последующим отжимом, который осуществляется роликами, ножами или эластичными губками.

Процесс сушки препрегов совмещают с пропиткой волокнистого наполнителя. Поскольку связующие представляют собой растворы

40-60% -й концентрации, а скорости пропитки довольно высоки, приходится за короткое время из препрегов удалить значительное количество растворителя.

При высоте сушильных камер от 2,5 до 4 м и 2-4 проходах препрегов через камеру со скоростью 1,0-10 м/мин время сушки составляет от 0,5 до 15 мин. В таких условиях обычная конвективная сушка оказывается малоэффективной, так как удаление растворителя идет только с поверхности, а образовавшаяся пленка связующего препятствует выходу растворителя. Для интенсификации процесса применяют инфракрасную сушку препрегов с принудительным отсосом паров растворителя. При инфракрасной сушке происходит прогрев препрега по всему объему, причем, наиболее интенсивно поглощает тепло волокнистый наполнитель. Поэтому поток тепла идет изнутри к наружной поверхности препрега, и твердая пленка на этой поверхности почти не образуется.

### **8.3.2. Контактная пропитка волокнистых наполнителей.**

Этот вид пропитки применяют в том случае, когда волокно изготовлено из высокомолекулярного материала (например, бора), имеет большой диаметр и поэтому не может быть пропущен через пропиточный тракт обычных установок, так как он снабжен перевалочными валками сравнительно малого диаметра. При огибании таких валков происходит разрушение волокнистого наполнителя.

Схема пропиточной ванны, установки для контактной пропитки представлена на рис. 8.4. В процессе пропитки движущийся под действием усилия протяжки  $N$  волокнистый наполнитель 1 приводится в контакт с поверхностью вращающегося ролика 2, покрытого слоем связующего 3. Непрерывный приток связующего в зону пропитки обеспечивается за счет вращения ролика, погруженного в ванну 4 со связующим.

Диаметр контактного ролика  $D$  подбирают таким образом, чтобы возникающие в волокнах напряжения не превышали допустимой величины  $[\sigma]_q$ :

$$D \geq \frac{E_\epsilon d_\epsilon}{[\sigma]_q}, \quad (8.14)$$

где  $E_\epsilon$  и  $d_\epsilon$  – модуль упругости и диаметр элементарных волокон наполнителя.

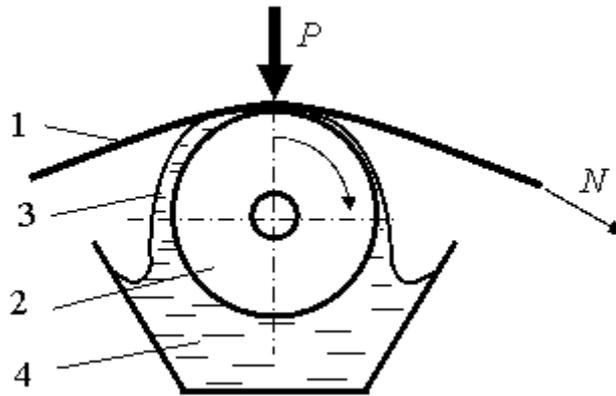


Рис. 8.4. Схема установки для контактной пропитки волокнистого наполнителя: 1 – волокнистый наполнитель; 2 – ролик; 3 – связующее; 4 – ванна

Проникновение связующего в межволоконное пространство наполнителя осуществляется под действием капиллярных сил и давления

$$p_N = 2 \frac{N}{D} . \quad (8.15)$$

$p_N$  создается нагруженным силой волокнистым наполнителем на покрытую связующим поверхность ролика.

**8.3.3. Пропитка напылением.** Пропитку напылением применяют в том случае, когда в течение короткого времени необходимо совместить со связующим большие плоские заготовки волокнистого наполнителя. Такая проблема возникает при изготовлении крупногабаритных изделий из листовых волокнистых наполнителей (тканей, матов) больших размеров, пропитываемых связующими холодного отверждения с ограниченным временем жизнеспособности.

На поверхность волокнистой заготовки напыляют слой связующего толщиной

$$\delta = HP , \quad (8.16)$$

где  $H$  – толщина пропитываемого пакета,  $P$  – относительная объемная пористость пакета.

Если нанесение связующего на поверхность наполнителя осуществляется распылением (рис. 8.5), имеющим производительность  $P_p$  (см/с),  $v$  – ширину факела напыляемого связующего,  $L$ ,  $B$ ,  $H$  – размеры пропитываемого пакета, то скорость движения распылителя  $V$  равна

$$V = \frac{\Pi_p}{HBL\Pi}, \quad (8.17)$$

а время напыления

$$\tau = \frac{HBL\Pi}{\Pi_p}. \quad (8.18)$$

Так же как и в предыдущем случае, проникновение связующего в межволоконное пространство осуществляется под действием капиллярных сил.

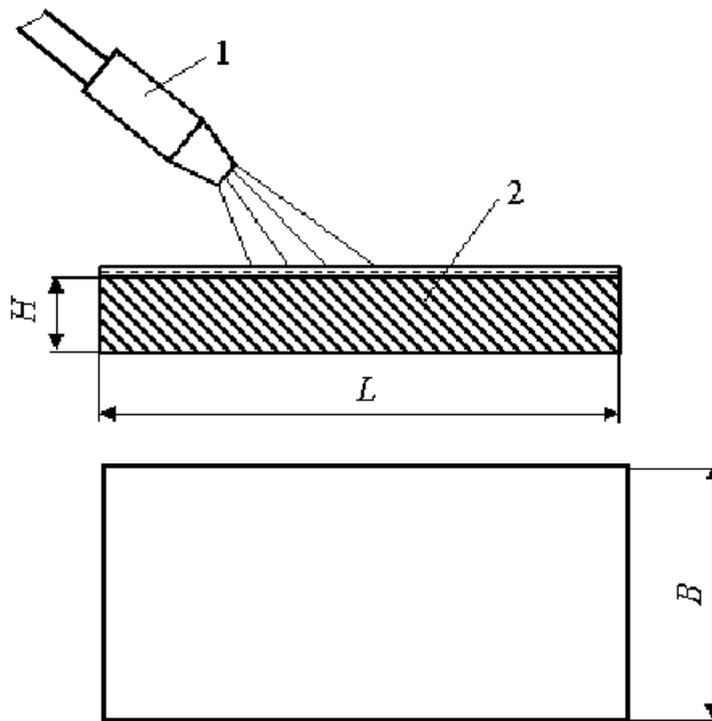


Рис. 8.5. Схема пропитки пакета волокнистого наполнителя напылением:  
1 – головка распылителя; 2 – пакет

**8.3.4. Вакуумная пропитка.** Одна из схем вакуумной пропитки представлена на рис. 8.6. Рулон тканого наполнителя (5) помещают в герметично закрывающуюся крышкой (2) камеру (1). В крышке камеры смонтирован вакуумметр (3). Трубопровод (4) соединяет внутреннюю полость камеры с вакуумной системой. Свободный конец ткани протягивают через фильеру (6), передняя часть которой опущена в ванну со связующим (8), перевалочный ролик (9), отжимные ролики (7) и далее соединяют с тянущим механизмом пропиточной установки. Скорость проникновения связующего в межволоконное пространство наполнителя в щели фильеры возрастает по сравнению с капиллярной пропиткой за счет действия добавочного давления  $P_q$ , равного

разности между атмосферным и остаточным давлением воздуха в вакуумированной камере. Для того чтобы связующее не попало в камеру (1), скорость протяжки тканого наполнителя через пропиточную ванну берут равной скорости движения связующего в межволоконном пространстве.

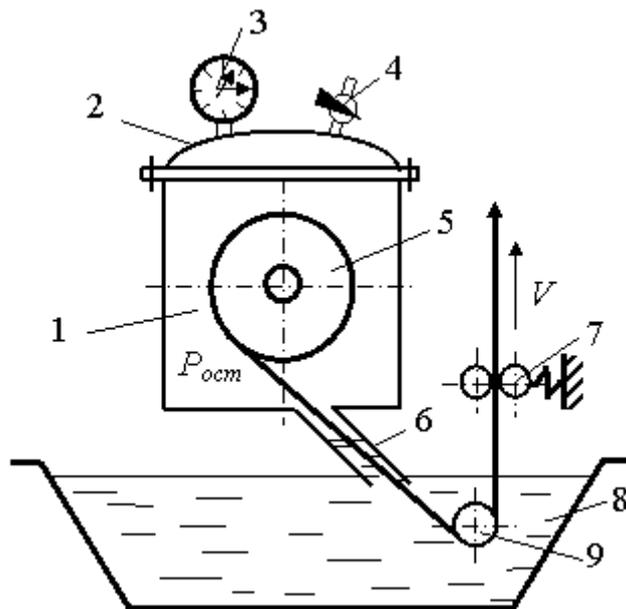


Рис. 8.6. Схема установки для вакуумной пропитки волокнистого наполнителя (обозначения в тексте)

**8.3.5. Пропитка под давлением.** Под давлением пропитывают пакеты, собранные из волокнистых наполнителей и уплотненные в жестких формах (рис. 8.7).

Рассмотрим задачу о получении пластины из стеклопластика с размерами  $L, B, H$ . Относительное объемное содержание связующего  $C_{св}$  и волокнистого наполнителя  $C_n$  в пластине равно  $I$  ( $C_{св} + C_n = I$ ). Для изготовления пластины применяем стеклянную ткань с массой единицы площади, равной  $\rho_s$ , и толщиной  $\delta$ . Для модельных пакетов, собранных из стеклоткани, экспериментально получены деформационная кривая  $h = f(p)$ , по которой расчетным путем найдена зависимость  $\Pi = f(p)$  (рис. 8.8, а, б).

Пакет из стеклоткани (1) (рис. 8.7) собирают в матрице (2) и уплотняют его пуансоном (5), создавая давление  $p_y$ . Через отверстие – источник (4) в матрицу под давлением  $q$  нагнетают связующее, которое сначала заполняет коллектор (3), а затем фильтруется через поры пакета и вытекает из матрицы через отверстие – сток (6).

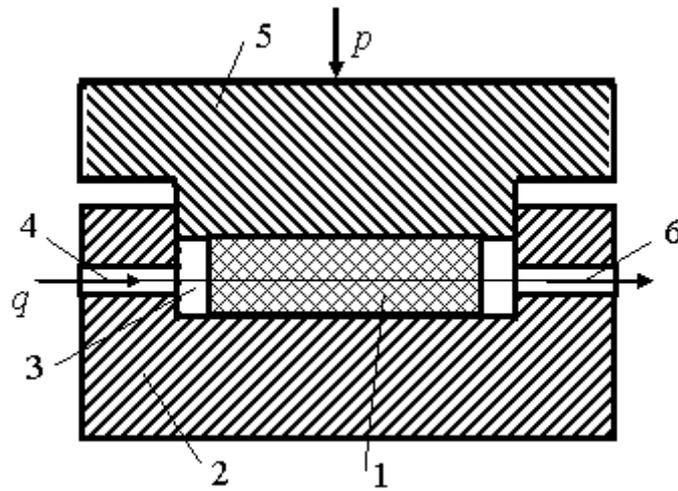


Рис. 8.7. Оснастка для пропитки волокнистого наполнителя под давлением (обозначения в тексте)

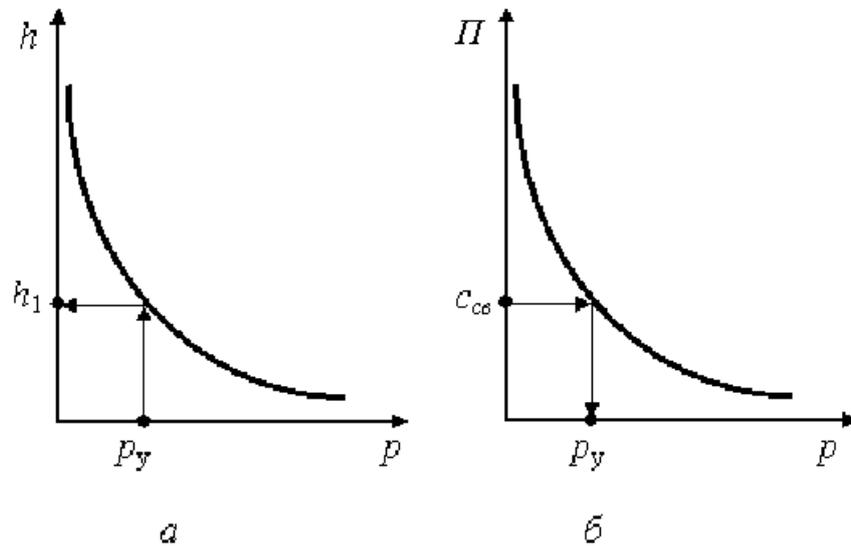


Рис. 8.8. Деформационные кривые уплотняемых пакетов.

Изменение относительной высоты пакета (а) и относительного объемного содержания в нем пор (б) в зависимости от давления уплотнения

Необходимо определить давление уплотнения  $p_y$ , давление пропитки  $q$  и время пропитки пакета  $\tau$ . Величина  $\Pi$  уплотненного пакета должна быть такой, чтобы после заполнения пор относительное объемное содержание связующего было равно заданной величине  $C_{cv}$ . Отложим  $C_{cv}$  на оси  $\Pi$  зависимости  $\Pi=f(p)$ , через полученную точку проводим линию, параллельную оси  $p$ , до пересечения с кривой. Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на ось  $p$ , определяем давление уплотнения  $p_y$ . Затем значение  $p_y$  откладываем на оси  $p$  зависимости  $h=f(p)$ , из полученной точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой. Через точку пересечения проводим

линию, параллельную оси  $p$ , находим  $h$ , а по нему и  $H_0$  – толщину, равную  $H_d$  детали, и заданную пористость  $\Pi$ .

Максимально допустимый градиент давления пропитки, не вызывающий смятие и перемещения пакета, определяют по формуле

$$\frac{dp_n}{d\ell} \leq \frac{2pf}{H}, \quad (8.19)$$

где  $f$  – коэффициент трения покоя – волокнистый наполнитель – материал формы, значение которого для пары стекловолокнистый наполнитель – сталь лежит в пределах 0,14-0,20.

Время пропитки плоского пакета  $\tau_{np}$  может быть определено по формуле [56]

$$\tau_{np} = \frac{L^2 \eta \Pi}{2 \Delta P_n K}. \quad (8.20)$$

**8.3.6. Центробежная пропитка.** Центробежную пропитку волокнистых наполнителей производят во вращающихся осесимметричных формах (рис. 8.9). Пакет наполнителя (3) собирают на формообразующей поверхности оснастки (2). Торцы оснастки закрепляют крышками (1) и приводят ее во вращение с частотой  $n_\omega$ . На поверхность пакета напыляют слой связующего (4), объем которого рассчитывают по формуле:

$$V_c = \pi(R_0^2 - R_n^2) L \Pi, \quad (8.21)$$

где  $R_0$  и  $R_n$  – радиусы внутренней поверхности оснастки и пакета соответственно;  $L$  и  $\Pi$  – длина и пористость пакета.

Для того чтобы связующее было распределено по поверхности пакета равномерным слоем, форма должна вращаться с частотой

$$n_\omega \geq 9,55 \sqrt{\frac{g}{R_c}}, \quad (8.22)$$

где  $R_c$  – внутренний радиус связующего.

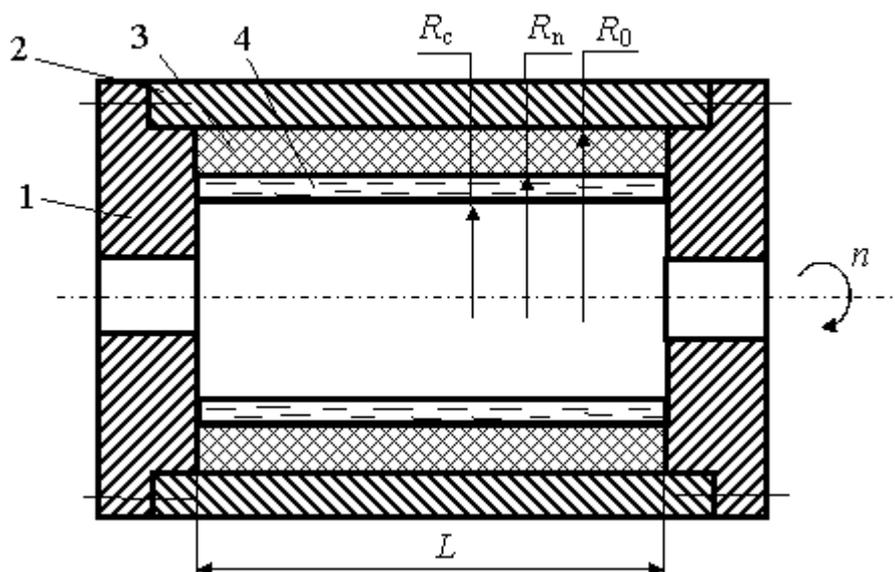


Рис. 8.9. Форма с горизонтальной осью вращения для центробежной пропитки волокнистых наполнителей (обозначения в тексте)

Время пропитки может быть определено из следующего соотношения:

$$\tau_{пр} = \Pi \frac{\eta \left[ R_0^2 \left( 2 \ln \frac{R_0}{R_n} - 1 \right) + R_n^2 \right]}{2,2k\rho_{св} (R_n^2 - R_c^2) n_{\omega}^2 \cdot 10^{-5}}. \quad (8.23)$$

### *Контроль качества препрегов*

В готовой продукции контролируют содержание связующего и степень его растворимости, содержание летучих веществ, липкость и гибкость препрега, размеры его поперечного сечения. В ряде случаев проверяют механические характеристики препрега на плоских или кольцевых образцах.

Жизнеспособность препрегов во время хранения в холодильнике или при комнатной температуре должна быть достаточно большой (от 7-10 суток до 3-6 месяцев). Препрег, намотанный на приемные катушки, должен сматываться с катушек без повреждения волокнистого наполнителя в течение всего гарантийного срока хранения.

В табл. 8.9 приведены некоторые характеристики отечественных препрегов.

Характеристики отечественных препрегов

Тип препрега	Ширина макс., мм	Содержание смолы, %	Толщина, мм
Стеклолента однонаправленная	50	20±2	0,1±0,02
Ткань стеклянная	1000	30±2	0,3±0,02
Лента углеродная ЛУ	250	40±5	0,12±0,02
Лента углеродная из волокна ВМН-4	50	37±3	0,3±0,03
Лента углеродная из волокна ВМН-РК	50	37±3	0,2±0,03
Ткань кремнеземная КТ-11	800	40±5	0,5±0,05

#### 8.4. Полуфабрикаты ПКМ, получаемые твердофазным совмещением компонентов

Этот вид полуфабрикатов характерен для полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе термопластичных связующих, имеющих по сравнению с отверждающимися олигомерными или мономерными связующими, на несколько порядков более высокую молекулярную массу. В результате, растворы термопласта даже при 3–6 %-й концентрации становятся студнеобразными, а избыток растворителя впоследствии невозможно полностью удалить из ПКМ.

Пропитка термопластами без растворения (то есть из расплава) еще более затруднена, поскольку вязкость ( $\eta$ ) при допустимых температурах достигает  $10^{10}$  -  $10^{11}$  Пас (для линейных полиамидов). Даже при специальном подборе термопластов (полиамиды, полиэфир, полисульфон и некоторые другие полимеры с  $\eta = 10^1$  -  $10^3$  Пас) скорость пропитки волокнистых наполнителей не превышает 2,5 - 5 см/мин и нередко стремится к нулю при отсутствии внешнего давления.

Сущность твердофазного совмещения компонентов заключается в предварительном приближении к поверхности наполнителя элементов полимерного связующего (исходные матричные элементы), чтобы при последующем плавлении во время переработки ПКМ в изделие протяженность течения расплава была минимальной, а пропитка наполнителя достигалась энергетически более выгодно – при меньших давлении и температуре. В качестве матричных элементов применяют порошки, пленки и синтетические волокна, что соответствен-

но определило название технологических методов изготовления полуфабрикатов ПКМ – порошок, пленочный и волоконный методы. Иногда предпочтение твердофазному совмещению компонентов отдают ввиду технологичности и экологической чистоты полуфабрикатов ПКМ [8, 16].

Порошковые матричные элементы могут быть как термопластичными, так и термореактивными. Среди последних наиболее часто применяют фенолформальдегидную смолу. Например, полуфабрикат из стеклянных дискретных волокон и матричного порошка с диаметром частиц 150 мкм пригоден для прессования и листовой прокатки при 140 °С.

Из числа термопластичных порошков чаще применяют полиэтилен, полиамиды, полистирол, сополимеры винилхлорида с винилацетатом и некоторые другие сополимеры. В табл. 8.10 даны свойства этих связующих при технологических режимах, применяемых при прессовании термопластичных материалов.

Порошковые матричные элементы в зависимости от их дисперсии и вида волокнистого наполнителя вводят в состав полуфабрикатов различными технологическими методами. В частности, при изготовлении композиций из дискретных хаотически распределяемых волокон (асбестовых, базальтовых и некоторых других) введение порошкообразных полимерных связующих осуществляют методом сухого смешения. Процесс проводят обычно в барабанных смесителях, где смешение происходит за счет циркуляции сыпучих компонентов под действием центробежных и гравитационных сил. Данный вариант смешения достаточно прост и обеспечивает хорошее качество полуфабрикатов, но процесс оказывается длительным и сравнительно энергоемким.

Для интенсификации сухого смешения используют другой вариант (в основном для изотропных материалов), предусматривающий создание псевдосжиженного слоя – воздушной взвеси компонентов. Эффект достигается за счет противотока сжатого воздуха, непрерывно подаваемого в смеситель. Недостатком полуфабрикатов (премиксов) в обоих случаях считается малая кажущаяся плотность, затрудняющая их подачу в формулирующий инструмент (пресс-форму, головку экструдера и т.д.), поэтому такие полуфабрикаты нередко подвергаются дальнейшему уплотнению, например, обработкой на вальцах или экструдированием с получением монолитных гранул.

Таблица 8.10

Динамическая вязкость расплавов промышленных термопластов  
при максимальных температурах переработки [8, 16]

Марка термопласта	Температура расплава при термостабильности 15 мин, °С	Вязкость расплава $\eta$ , Па с при скоростях сдвига	
		$\gamma' = 10^0, \text{с}^{-1}$	$\gamma' = 10^{-1}, \text{с}^{-1}$
1	2	3	4
Полиэтилен низкой плотности, ПЭН 10803-020	280	1050	405
Полиэтилен высокой плотности, ПЭВП 2108-075			
Полиамид - 6 ПА-6-210/310	280	2700	620
	270	120	120
Полиамид - 12 ПА-12-10	285	342	-
Полистирол общего назначения	280	1100	320
Поликарбонат: ПК - 1 ПК - 2 ПК - 3 Макролон 310	290	1500	1500
		625	625
		320	320
		650	650
Полиметилметакрилат ПММА	230	2300	1400
Полиформальдегид	220	1050	1050

Окончание табл. 8.10

1	2	3	4
Полиэтилентерефталат марка Б	270	200	200
Полибутилентерефталат			
Полифениленоксид	270	270	270
Полиакрилат, ДВ-105	280	8000	8000
	410	5000	5000
Полисulfон: марка А Р-1700 Р-3500	340	425	415
		790	790
		1700	1520

Дискретные волокнистые наполнители в виде матов или нетканых материалов, а также непрерывные армирующие волокна в ви-

де нитей, жгутов, тканей или лент совмещают с матричными порошками методом напыления. При этом находят применение различные технические исполнения метода. Различают варианты напыления матричных порошков в псевдосжиженном слое и струйным методом.

Псевдосжижения достигают с помощью тока воздуха (или какого-либо другого газа), вибрационным воздействием на массу матричного порошка или электровихревым способом воздействия на ионизированный порошок. Для равномерного осаждения и прочного закрепления матричного порошка на поверхности волокон наполнителя в процессе протягивания матов, тканей и т.п. через псевдосжиженную ванну рекомендуется непосредственно перед ней устанавливать проходную печь, нагретую на 50 – 150 °С выше температуры матричного порошка.

Струйный метод напыления матричных порошков также вариативен в аппаратурном оформлении. Применение в промышленности нашли такие виды напыления, как газопламенное (порошок в течение долей секунды проходит сквозь пламя газовой горелки с температурой около 1500 °С), плазменное (нагрев порошка ионизированным инертным газом в пламени вольтовой дуги с температурой 15000 – 20000 °С) и электростатическое, предусматривающее сообщение разноименного электрического заряда волокнистому наполнителю и матричному порошку, причем, последний обычно заряжается отрицательно, проходя через заземленную стационарную распылительную головку или ручной пистолет.

Во всех вариантах напыления для выравнивания концентрации матричного порошка по объему полуфабриката последний одновременно подвергают вибрационному воздействию с частотами, нередко достигающими значений порядка 20000 Гц. Вместе с тем, недостатками порошкового метода считают сложность равномерного распределения и удерживания матричных порошков в объеме полуфабриката ПКМ. На эти процессы влияют размеры полимерных частиц и их однородность, структура и плотность волокнистых наполнителей, поэтому обеспечить хорошее качество пропитки расплавом порошков весьма трудно.

Применение пленочных матричных элементов в производстве полуфабрикатов ПКМ основано на послойном чередовании тканей, жгутов или нитей с термопластичными или отверждающимися пленками, толщину которых выбирают из данного объемного соотноше-

ния компонентов в пластике. Обычно толщины пленок колеблются в интервале от 0,05 до 0,1 мм.

Наибольшее применение в отечественной промышленности данный вид полуфабриката нашел при изготовлении непрерывно армированных термопластичных углепластиков благодаря возможности максимально сохранить целостность и, следовательно, свойства углеродных волокон в процессе их переработки. Примером могут служить данные табл. 8.11, где представлены физико-механические характеристики трех видов термопластичных (поликапроамидных – ПА-6) углепластиков в сравнении с характеристиками отвержденного углепластика марки КМУ-3л, изготовляемого по обычной жидкофазной технологии. Пленочные полуфабрикаты углепластиков перерабатывали прессованием при температуре на 30-40 °С превышающей температуру плавления ПА-6, при давлении  $1,2 \pm 0,2$  МПа в течение 10 минут.

Пленочный полуфабрикат ПКМ, состоящий из пленок ПА-6 марки ПК-4 (ТУ 6-05-1775-76), чередующихся с углеродными лентами, может иметь схемы армирования соответственно заданным требованиям. Изменение свойств ПКМ при этом показано в табл. 8.12.

Аналогичным образом изготавливаются и перерабатываются полуфабрикаты ПКМ, в которых используются пленки из полиамидов ПА-66 и ПА-12, полиолефинов, поливинилхлорида и других термопластов, для которых оптимальная вязкость расплава при режимах переработки, как и для порошковых полуфабрикатов, должна составлять приблизительно 150 Пас.

Таблица 8.11

Физико-механические характеристики однонаправленных поликапроамидных углепластиков при 20 °С

Показатели свойств	Марка углеродной ленты			Отвержденный углепластик КМУ-3л
	ЭЛУР-0,Ш ТУ-6-06-31-212-78	ЛУ-0,2П ТУ-6-06-31-481-80	"Кулон" ТУ-6-06-31-485-84	
Объем армирования, %	60	61	59	55
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1400(0,7)	1420(0,7)	1510(1,3)	1400
Сопротивление срезу, МПа поперек волокон вдоль волокон	75	78,8(10)	80	-
	40	-	30	-
	В осевом направлении			
Разрушающее напряжение, МПа				

при растяжении	685(1,5)	588(3,6)	587(2,7)	650
при сжатии	340	210(19,5)	-	400
при изгибе	1320(13,2)	1070(4,2)	859(2,4)	1000
при сдвиге	31	28	-	29
Модуль упругости, ГПа				
при растяжении	128,5(1,1)	135,1(2,1)	151,1(5,2)	120
при изгибе	100(1,5)	97,5(8,2)	89,7(7,4)	100
В трансверсальном направлении				
Разрушающее напряжение, МПа				
при растяжении	38	44	49	14
при сжатии	130	133(7,1)	-	-

Примечание: В скобках указаны коэффициенты вариации показателей свойств в %.

Однако при использовании пленочных матричных элементов сокращение пути течения расплавов при последующей пропитке волокнистых наполнителей ограничено, поскольку расплав начинает свой путь с поверхности ткани, холста или жгута. Для более полного заполнения межволоконного пространства приходится увеличивать толщины пленок, что, с одной стороны, уменьшает объем армирования, а с другой, повышает жесткость полуфабриката ПКМ и затрудняет его выкладку по поверхности со сложными конфигурациями.

Таблица 8.12

Влияние схемы армирования полуфабрикатов на прочность и жесткость углепластиков на основе ПА-6

Марка углеродной ленты	Направления армирующих волокон	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Разрушающее напряжение, МПа
ЛУ-0,2П	0°	135,1(2,1)	588(3,6)
	90°	5,8	44
	±45°	39,2	100
	0°; 90°; ±45°	51,68	159
	0°; ±60°	61,3	143
" Кулон "	0°	151,1(5,1)	587(2,7)
	90°	9,8(3,2)	49(1,6)
	±45°	45,1(12,2)	153(5,7)
	0°; 90°; ±45°	82,2(6,0)	209(4,5)
	0°; ±60°	60,6(3,6)	188(2,1)

Примечание: В скобках - коэффициенты вариации в %.

Введение матричных термопластичных волокон в состав полуфабрикатов ПКМ осуществляется практически всеми известными технологическими способами производства нетканых и пленочных

материалов, ткачества и трикотажного производства в зависимости от требуемого состава и структуры ПКМ. Это обеспечивает возможность вынесения операции изготовления полуфабриката из основного технологического цикла производства изделий из ПКМ и может осуществляться на специализированных предприятиях ткацкой и химической промышленности, что по данным отечественных машиностроительных предприятий позволяет повышать производительность труда в 2 – 5 раз, сокращать энерго-, трудо- и фондозатраты до 60 – 80 %, высвобождая до 25 % производственных площадей и до 10 % производственных рабочих.

В отечественной промышленности ПКМ с использованием плавких матричных волокон – промышленно освоен метод так называемой "волоконной технологии". Ее основной принцип – максимальное сокращение пути течения расплава матрицы ( $\ell$ ) при пропитке армирующего наполнителя. В случае дискретных волокон это достигается равномерным смешением и уплотнением матов, при использовании непрерывных матричных и армирующих волокон – их регулируемым чередованием в составе полуфабриката ПКМ [12]. В составе полуфабриката нашли применение стекловолокна, органические волокна и углеродные волокна. В виде термопластичных нитей используют полипропилен, лавсан, капрон и др. Например, из дискретных волокон СВМ и капрона в объемном соотношении 1:1 изготавливается иглопробивной нетканый полуфабрикат толщиной 5 мм и с поверхностной плотностью 500 г/м<sup>2</sup>. Полуфабрикат универсального назначения обладает деформативностью до 20 %, которая достаточна для переработки штамповкой. При этом ПКМ имеет прочность при растяжении 124 МПа и ударную вязкость 75 кДж/м<sup>2</sup>.

Однако наиболее полное преимущество в сокращении пути течения расплава матрицы обеспечивается с помощью непрерывных матричных волокон, поддающихся автоматическому чередованию в объеме полуфабриката с армирующими волокнами с помощью трощения, плетения или намотки. Причем результат качества пропитки и степени реализации механических свойств армирующих волокон тем выше, чем совершеннее тот или иной из технологических методов в способности наиболее регулярно распределить их в сочетании с матричными волокнами. Доказательством тому могут служить теоретические модели "волоконной технологии" (рис. 8.10), которые в принципиальной форме воспроизводят элементарные ячейки полуфабри-

катов ПКМ с жидкофазным введением связующего (как пленочное (а), порошковое или дискретно-волоконное (б)), а также регулярно-чередующее в случае непрерывных волокон (в). Так, в полуфабрикате типа (а) связующее поступает извне и проходит максимально возможный путь  $\ell$ , равный постоянной толщине пакета из армирующих волокон. Этот путь заметно меньше в следующей модели (б), но минимума он достигает, когда волокна проходят через сечение полуфабриката с наибольшей периодичностью (в), причем тем чаще и равномернее, чем меньше диаметр матричных волокон.

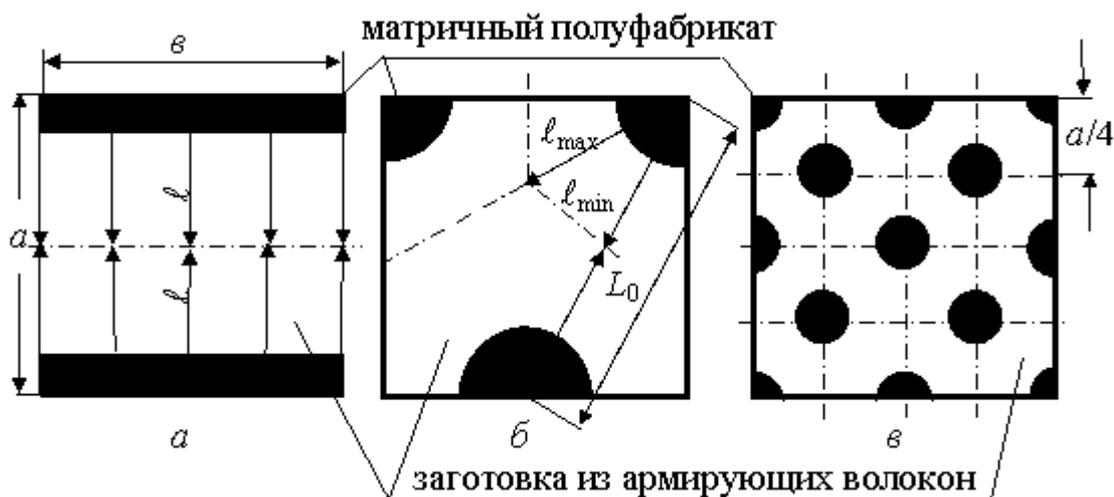


Рис. 8.10. Модели перемещения связующего в волокнистый наполнитель:  
 $a$  – от поверхности;  $b$  – от мест плавления при поверхностно расположенных частиц;  
 $e$  – от регулярно и равномерно расположенных волокон при постоянном соотношении фаз ПКМ

Расчеты показывают [12], что в полуфабрикатах ПКМ с объемом армирования, равным 70 %, величина  $\ell$  теоретически может быть сокращена более чем на 80 %. В свою очередь, это предопределяет возможность при прочих равных условиях переработки полуфабрикатов в изделия снижать давление, необходимое для пропитки, до 25 раз. На практике сокращение  $\ell$ , прежде всего, проявляется в снижении пористости термопластичных ПКМ с обычных 10-14 % до 0,25-2,0 % с соответствующим повышением их физико-механических показателей.

В этой связи наибольшие успехи достигнуты в области тканых волокнистых полуфабрикатов ПКМ. Разработанный расчетный аппарат позволяет определить необходимую структуру тканых полуфаб-

рикатов (ТП), исходя из задаваемых технологических режимов переработки в изделие, из необходимой глубины пропитки армирующих волокон, из возможной реализации свойств в ПКМ [16]. Взаимосвязь этих параметров показана в виде номограммы на рис. 8.11, где ТП характеризуется такими структурными характеристиками ткацкого производства, как соотношение числа армирующих и матричных нитей  $n_a/n_{mo}$  в основе ТП, соотношение их диаметров  $d_{mo}/d_a$ , плотность укладки нитей по основе  $n_0$ , количество  $n_{my}$  и диаметр  $d_{my}$  матричных нитей, расположенных по утку, по заданным свойствам пластиков (степень наполнения, коэффициент реализации прочности  $K$ , ориентировочное значение кажущейся толщины  $\delta$  монослоя ТП после плавления матричных волокон) и технологическими параметрами переработки ТП в изделия ( $T, P, \tau$ ). Номограмма состоит из основного поля, включающего конструкторскую (левую) и технологическую (правую) части и двух дополнительных шкал. Шкала А предназначена для определения диаметра  $d_{mo}$  матричных нитей, расположенных по основе ТП; шкала В – для определения количества матричных уточных нитей  $n_{my}$ .

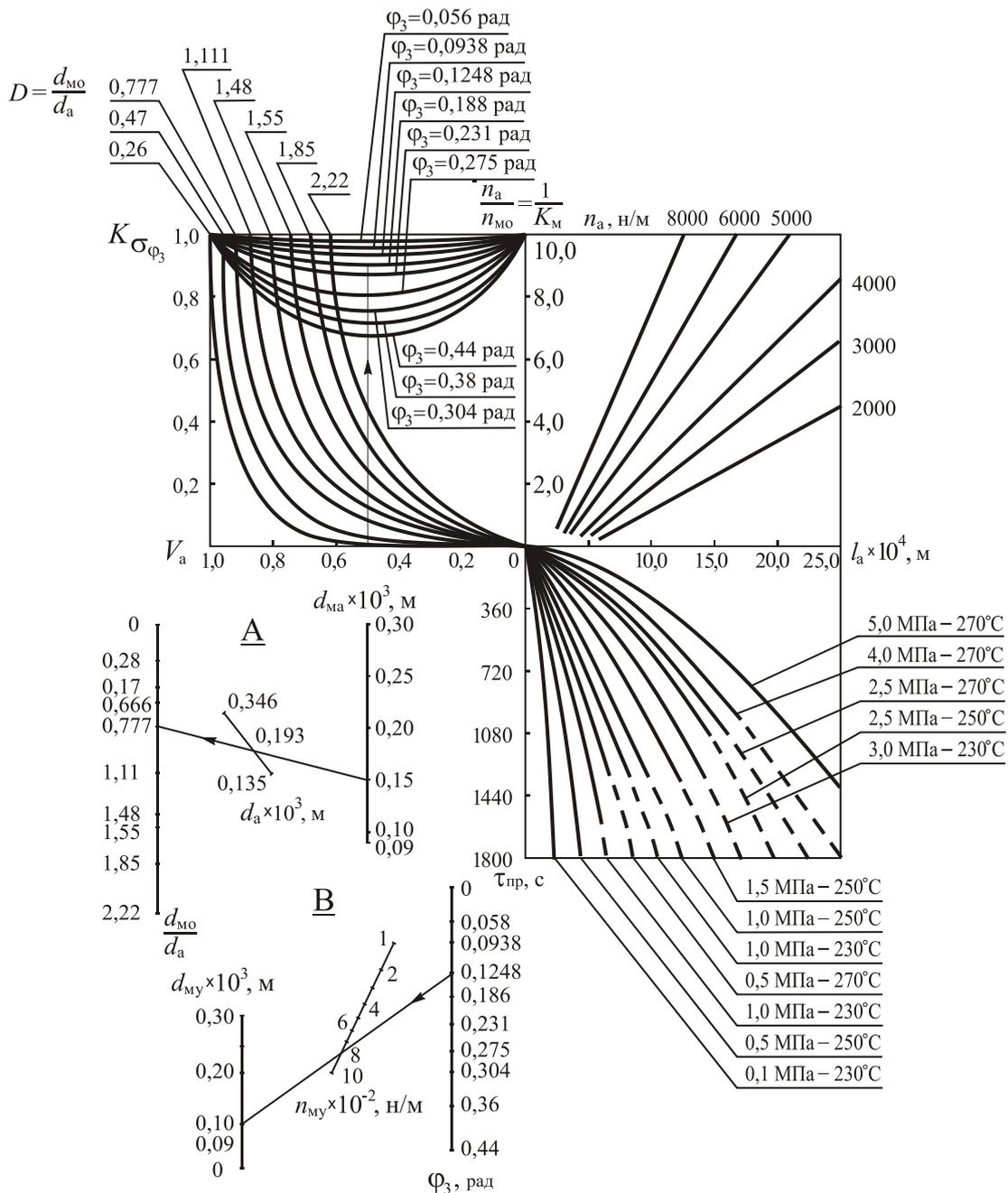


Рис. 8.11. Номограмма для определения текстильных параметров тканых препрегов по заданным эксплуатационным характеристикам ПКМ и технологическим режимам их переработки в изделия

Задаваясь степенью наполнения  $V_a$  композита и коэффициентом реализации прочности  $K_{\sigma_{\phi}}$  армирующих волокон в композите, определяют угловой параметр  $\phi$ , характеризующий искривленность армирующих нитей основы ТП нитями утка. Затем по шкале В, предварительно выбрав из серийно выпускаемых минимальный диаметр плавкой нити  $d_{my}$ , находят количество  $n_{my}$  матричных уточных нитей.

По технологическим параметрам переработки ( $T$ ,  $P$ ,  $\tau$ ) ТП в изделии определяют протяженность  $\ell$  течения расплава матричного полимера при пропитке армирующих нитей. Исходя из ориентировочного значения кажущейся толщины монослоя ТП после плавления матричных волокон, по каталогам выпускаемых нитей задается диаметр армирующей нити. Соблюдая условие  $d_a > d_{mo} > d_{my}$ , по каталогам выбирается диаметр матричной основной нити  $d_{mo}$ . По шкале А номограммы устанавливается соотношение диаметров матричной основной и армирующей нитей  $d_{mo}/d_a$ . Его значение и заданная степень армирования  $V_a$  позволяют установить соотношения  $n_a/n_{mo}$  (верхнее левое поле номограммы). По протяженности  $\ell$  течения расплава матричных волокон и соотношению  $n_a/n_{mo}$  определяют плотность укладки нитей по основе (верхнее правое поле).

Например, задано: толщина изделия 1,0 мм; прочность ПКМ при растяжении  $\sigma^+ = 250$  МПа, переработка ТП в изделие прессованием по режиму:  $T = 523$  К,  $P_{уд} = 21,0$  МПа,  $\tau = 900$  с. Путем анализа требований установлено, что требуемая прочность может быть достигнута при  $V_a = 0,5$ ;  $K_\sigma = 0,9$  (пусть  $\sigma^+ = 550$  МПа для нитей с линейной плотностью 29 текс). Тогда по номограмме для заданных  $V_a$  и  $K_\sigma$  находят  $\varphi = 0,1248$  рад (левое поле номограммы); затем по шкале В определяют параметры утка:  $d_{my} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м,  $n_{my} = 800$  нит/м, а по шкале А соотношение  $d_{mo}/d_a = 0,777$  при  $d_{mo} = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м и  $d_a = 0,193 \cdot 10^{-3}$  м. Исходя из значения  $d_{mo}/d_a$  и  $V_a$  на верхнем левом поле, находят  $n_a/n_{mo} = 0,5$ . По технологическим параметрам переработки устанавливаем  $\ell = 6,5 \cdot 10^{-4}$  м (нижнее правое поле). Затем по  $\ell$  и  $n_a/n_{mo}$  оказывается, что  $n_0 = 2400$  нит/м. Таким образом, с помощью номограммы удается установить конструкционные параметры ТП:  $d_{my} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м,  $n_{my} = 800$  нит/м,  $n_0 = 2400$  нит/м,  $d_{mo} = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_a = 0,193 \cdot 10^{-3}$  м,  $n_a/n_{mo} = 0,5$ .

Варианты тканевых полуфабрикатов (ТП) имеют 2 типа размещения армирующих нитей – основной и уточный. Причем последний более технологичен, позволяет упростить процесс набора основы, уменьшить трудоемкость этой ручной операции, заменив ее механизированной операцией прокладывания утка. Установлено, что разрывная прочность ТП в 1,2 раза выше в случае размещения армиру-

ющих нитей по основе, чем по утку. Это объясняется различием технологического натяжения нитей в процессе ткачества.

Благодаря многократному снижению пористости термопластичных ПКМ (до 0,5-1,0 %) коэффициент реализации механических свойств СВ при оптимизации ТП и условий переработки их в изделия приближается к 100 %, показатели ударной вязкости разрушения на порядок и более превосходят аналогичные показатели конструкционных металлов и в 1,5 раза – отверждающихся ПКМ.

Расчетный метод позволяет определить структуру ТП не только для изготовления органопластиков, но и для получения других ПКМ, например, стекло- и углепластиков. Все эти ТП характеризуются высокой технологичностью – имеют практически неограниченный срок хранения, легко раскраиваются на заготовки и пригодны как для выкладки, так и для намотки. Однако, в последнем случае эффективность полуфабрикатов ПКМ, получаемых непосредственно на оправке изделия намоткой с заданным чередованием матричных и армирующих волокон, может оказаться существенно выше.

При изготовлении намоточных волоконных полуфабрикатов ПКМ, во-первых, достигается более плотная укладка матричных и армирующих волокон, причем без лишних изгибов (извитости), что особенно важно для стекло-, базальто- и углепластиков. Во-вторых, коэффициенты реализации прочности и модуля упругости армирующих волокон могут оказаться существенно выше, чем при выкладке ТП (табл. 8.13).

Усадка, проявляемая натянутыми армирующими волокнами при плавлении матричных волокон, дополнительно способствует пропитке, обеспечивая положительный эффект. Однако, как и в случае переработки тканых полуфабрикатов, оптимальное значение вязкости матричного расплава составляет 300-350 Пас.

В настоящее время номенклатура полуфабрикатов ПКМ с твердофазным совмещением компонентов интенсивно увеличивается. Создаются новые виды полуфабрикатов на волоконной основе, например, с использованием **биволокон**, внешняя оболочка которых превращается в матрицу; в качестве матричных волокон используются нити из полимеров, отверждающихся после монолитизации матрицы ПКМ, а в качестве армирующих волокон – нити с химически активированной поверхностью, позволяющей осуществить безматричную монолитизацию в ходе перепрофилирования и уплотнения массы во-

локон. Последний вариант полуфабрикатов обеспечивает изготовление предельно армированных ПКМ [8].

Таблица 8.13

Реализация прочности и модуля упругости однонаправленных ПКМ, изготовленных из намоточных полуфабрикатов, сочетающих матричную нить капрон (линейная плотность - 80 текс) с армирующими нитями, натянутыми с усилием  $0,3 \sigma_{\sigma}^+$  (стекловолокно -  $0,1 \sigma_{\sigma}$ )

Состав полуфабриката		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{\sigma}^+$ , МПа	Коэффициент реализации волокна	$E^+$ , ГПа	Коэффициент реализации $E$ волокна
Армирующее волокно	$V_a$					
Фенилон						
29,5 текс	0,6	1270	490	1,2	7,7	1,03
СВМ 29, текс	0,55	1270	1100	0,96	50	1,04
Стекловолокно, диаметр филаментной нити 20 мкм	0,5	1750	1000	0,82	35	0,83

## 8.5. Методы формования изделий из волокнистых КМ

### *Основные параметры технологических процессов формования*

Формование изделий из волокнистых КМ, когда заготовка приобретает форму изделия и одновременно формируется структура КМ, является ответственным моментом в технологической цепочке производства изделий из КМ. При формовании в матрице происходит сложный физико-химический процесс, в течение которого изменяется ее физическое состояние, а в некоторых случаях и ее химическое строение и состав. Изменение физического состояния происходит не только в матрице, но и на границе взаимодействия матрицы и наполнителя. Поэтому параметры технологического процесса формования для конкретного композиционного материала (имеется в виду совокупность входящих компонент) должны выбираться из условия получения заданной структуры и свойств (механических, физических и др.) композиционного материала в отформованном изделии.

Например, композиционные материалы на термореактивных матрицах при нагревании их в процессе формования переходят из пластического состояния в термостабильное твердое или эластичное состояние. Этот переход термореактивного связующего из одного физического состояния в другое принято называть отверждением.

При формовании изделий из КМ на термопластичных матрицах при нагревании матрица переходит в пластическое состояние (сниже-

ние вязкости). Переход их в твердое состояние возможен только при их охлаждении до определенной температуры.

Технологические свойства и параметры формуемого материала определяются не только свойствами связующего (матричного материала), но и свойствами армирующего материала и других компонентов. Вид наполнителя и его количество изменяют степень пластичности формуемого материала при данной температуре.

В процессе формования изделий из волокнистых КМ необходимо обеспечить возможно более полное удаление из материала различных летучих продуктов – воздуха, побочных продуктов реакции отверждения, растворителей, влаги, которые снижают эксплуатационные качества изделий.

**Основными параметрами процессов формования изделий из волокнистых КМ являются температура, давление и время.**

*Нагревание* до определенной температуры необходимо, чтобы придать связующему необходимую вязкость, т.е. способность заполнить межволоконное пространство формуемого материала и обеспечить в отвержденном состоянии монолитность изделия.

Для терморезистивных материалов нагревание необходимо также и для того, чтобы перевести отформованный материал в термостабильное твердое состояние реакцией отверждения.

С повышением температуры пластичность большинства матричных материалов увеличивается. Однако возможность повышения температуры формования термопластичных материалов ограничена температурой их разложения (деструкцией).

*Давление* в процессе формования необходимо для того, чтобы разогретому формуемому материалу придать конфигурацию изделия. Давление на материал должно оказываться в течение всего времени отверждения и перехода его в твердое состояние. Способ осуществления давления определяет название всего метода формообразования (ручной выкладки, автоклавный, прессовый, пулльтрузионный, намотки).

*Время процесса формования* определяется скоростью разогревания связующего материала до состояния возможности пропитки волокнистого армирующего материала, скоростью проникновения связующего до каждого волокна (скорость пропитки), скоростью процесса формования и главным образом скоростью отверждения отформованного изделия, если материал терморезистивный, или скоро-

стью охлаждения до твердого состояния, если материал термопластичный.

Указанные три основных параметра процесса формования – температура, давление и время – взаимосвязаны. Изменение одного параметра влечет за собой изменение и других.

Например, повышение температуры формования изделий на терморезактивных связующих приводит к снижению вязкости и увеличению пластичности, но при этом одновременно увеличивается и скорость реакции отверждения. Поэтому повышение температуры формования терморезактивных материалов в большинстве случаев не позволяет уменьшить давление формования. Однако длительность формования сокращается по мере повышения температуры вследствие ускорения реакции отверждения.

Увеличение температуры формования изделий на термопластичных связующих снижает вязкость их расплава и, следовательно, уменьшает необходимое давление и длительность формования.

Основные параметры процесса формования связаны с составом формуемых материалов. Большое влияние на режим формования оказывают компоненты КМ – связующие, армирующий материал, активаторы, пластификаторы.

Параметры формования (температура, давление и время) находятся в тесной связи с конструкцией формуемых изделий и технологической оснасткой, в которой производится формование. Чем, например, сложнее формуемая из данного материала деталь, тем, как правило, большее давление нужно для формования.

Существует несколько методов формования изделий из волокнистых композиционных материалов. Выбор того или иного метода определяется формой, размерами, назначением формуемых изделий, а также технологическими свойствами исходных компонентов композиционных материалов.

Основными методами формования являются: ручная выкладка, формование с эластичной диафрагмой, формование с пропиткой под давлением, формование прессованием в формах, формообразование пультрузией, формообразование намоткой.

**8.5.1. Метод ручной выкладки.** Метод ручной выкладки (метод получения изделий в открытой форме и отверждение при нормальном давлении) является одним из первых методов изготовления изделий

из КМ. Тем не менее, и в настоящее время он широко применяется для изготовления крупногабаритных изделий (корпусов лодок, яхт, кузовов и кабин автомобилей, фюзеляжей вертолетов и самолетов и многое другое), в опытном производстве при создании авиационно-космической и ракетной техники.

Так как к качеству поверхности предъявляются высокие требования, первой стадией формования в формах открытого типа является нанесение на ее поверхность слоя специальной полимерной композиции, который называют наружным смоляным слоем (гелькоатом). После его отверждения в форму укладывают или напыляют слои стекловолокна и смолы с добавлением катализатора, а затем уплотняют материал в форме.

При формировании ручной выкладкой применяют армирующий материал в виде матов из рубленой стеклопряжи, ткани или ровнинговой ткани. Смолу и катализатор предварительно смешивают, после чего наносят кистью, валиком или распыляют.

К методу ручной выкладки относят и формование напылением, при котором стекловолокно предварительно измельчается на короткие волоконца (штапельки) и в процессе разбрызгивания перемешивается одновременно со смолой и катализатором. После того как смесь попадет в форму, ее уплотняют металлическими валиками. На практике часто комбинируют методы ручной выкладки и напыления, чередуя слои напыленного измельченного волокна со слоями ткани или тканного ровнинга.

### *Преимущества и недостатки метода формования ручной выкладкой*

#### Преимущества:

- универсальность;
- возможность изготовления изделий сложной формы и больших размеров;
- низкая стоимость оснастки;
- минимальные капиталовложения в оборудование;
- минимальная стоимость и длительность пускового периода;
- можно легко изменять конструкцию изделия;
- возможность изготавливать опытные партии изделий перед началом крупносерийного производства.

#### Недостатки:

- большие затраты ручного труда, низкая производительность;
- трудность обеспечения однородности физико-механических свойств материала в изделиях;
- изделия имеют гладкую поверхность только с одной стороны;
- можно использовать только для выпуска мелкосерийной продукции;
- качество изделий зависит от квалификации формовщика;
- образуется значительное количество отходов.

### *Стадии метода ручной выкладки*

#### *Подготовка форм*

При методе ручной выкладки используют открытые формы. Формы могут быть позитивные и негативные (рис. 8.12) в зависимости от того, какая поверхность должна быть гладкой – внутренняя или внешняя.

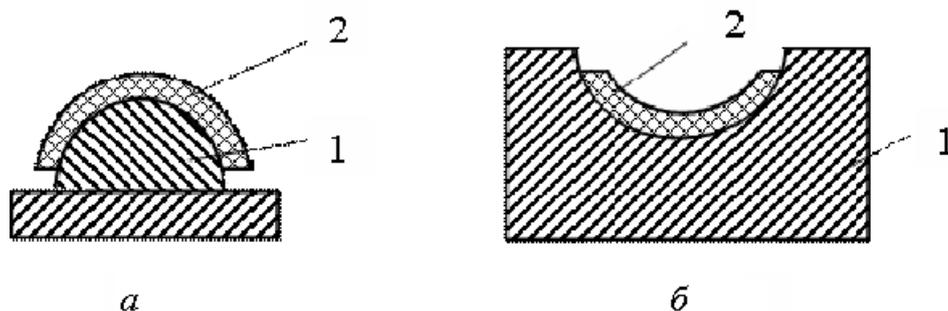


Рис. 8.12. Схема позитивной (а) и негативной (б) форм:  
1 – форма; 2 – формуемая заготовка

#### *Подготовка форм*

Первой стадией при изготовлении изделия в открытой форме является нанесение на ее поверхность антиадгезивного покрытия (смазки). Без антиадгезивного покрытия изделие будет прилипать к форме и разъединить их будет очень сложно.

Под терминами антиадгезивы, смазки, разделяющие вещества понимается широкий класс химических соединений, создающих барьер между расплавом и поверхностью, с которой расплав соприкасается. Существует два основных типа антиадгезионных смазок – внутренние и внешние. К внутренним антиадгезивам относятся те, которые вводятся непосредственно в связующие и являются как бы их составной частью. Внешние антиадгезивы наносятся на поверхность форм.

Оптимальным может считаться такой антиадгезив, который будет предотвращать повреждения, не взаимодействовать со связующим (расплавом). Его применение должно делать технологические процессы более быстрыми, экономичными и выгодными. Использование антиадгезивов должно сокращать время нахождения формуемого материала в форме.

Ручная выкладка требует применения внешних антиадгезивов. Внешние антиадгезивы не ухудшают свойств полимеров, но могут переноситься с формовочного оборудования на поверхность изделия, загрязняя последние. Следовательно, необходимо применять такие антиадгезивы, которые не переносятся на изделие.

Большинство внешних антиадгезивов наносятся на поверхность форм методом пульверизации или погружения. Тщательная подготовка поверхности формовочного оборудования (шлифование, полировка, промывание) является необходимым условием качественного нанесения покрытия антиадгезивом.

Антиадгезив наносят в несколько слоев. Каждый слой должен быть хорошо отполирован и выдержан до затвердевания.

Формы нужно полировать после каждого формования.

Число необходимых обработок антиадгезивами определяется абразивными свойствами композита формуемого изделия и конфигурацией форм. Армированные пластики обладают высокими абразивными свойствами. Поэтому после каждого формования нужно внимательно осматривать форму на предмет отсутствия антиадгезивного покрытия. Форма дополнительно обрабатывается только в тех местах, где обнаружено отсутствие антиадгезива. В соответствии с технологическими регламентными указаниями после определенного числа формований должна проводиться полная очистка формы от остатков материала формуемого изделия и антиадгезива. После этого наносится свежий слой антиадгезива. Необходимая прочность пленки и ее антиадгезивные свойства достигаются при строгом соблюдении технологии нанесения.

Обоснованный выбор антиадгезива зависит от целого ряда следующих факторов:

1. Безопасность применения внешних антиадгезивов для обслуживающего персонала.

2. Особенности взаимодействия полимерных композиций с антиадгезивом: степень проявления антиадгезивных свойств; влияние на поверхность готовых изделий.
3. Степень влияния антиадгезива на технологический процесс изготовления изделий (влияние на формующую оснастку, продолжительность технологического процесса, влияние антиадгезива на последующие операции окрашивания и склеивания деталей и др.).
4. Планируемое количество выпускаемых изделий (единичное производство, малая серия, крупномасштабное производство).
5. Экономичность.

В качестве антиадгезивов используются:

1. Воскообразные вещества. Чаще всего используются парафины, воски растительного и животного происхождения, синтетические воски.
2. Поливиниловый спирт. Используется для получения пленок из водных растворов путем напыления. Водорастворимый, одноразового использования с хорошими антиадгезивными свойствами.
3. Фторированные углеводороды (силаны, силоксаны). Наносятся напылением, имеют низкий коэффициент трения.

Тщательная подготовка формы – один из основных этапов цикла формования. Выполнение технологии подготовки формы – одно из важнейших условий получения хорошего внешнего вида изделия и извлечения его из формы.

#### *Нанесение наружного смоляного слоя*

Для получения внешней поверхности разной цветовой гаммы первой стадией формования в форме открытого типа является нанесение на поверхность специальной полимерной композиции, называемой наружным смоляным слоем (гелькоатом). Наружный смоляной слой состоит из смолы (чаще всего из полиэфирной), содержащей минеральные наполнители и пигменты, но без армирующих добавок. Эта композиция наносится сначала на поверхность формы. После его отверждения в форму укладывают или напыляют слои стекловолокна и смолы с катализатором и отвердителем с последующим уплотнением. Смоляной слой переходит на формуемое изделие, образуя наруж-

ный слой с декоративной глянцевой окрашенной поверхностью, которая не требует последующей отделки.

### *Ручная выкладка*

Очередной операцией после нанесения смоляного слоя является подготовка армирующих материалов для выкладки на формообразующую поверхность. Подготовка заключается в вырезке по шаблону или иным способом заготовок формируемого изделия. Затем готовится композиция связующего, состоящая из смолы, отвердителя, катализатора и других компонентов согласно технологии подготовки связующего к совмещению с армирующим материалом. Композицию можно наносить на заготовки армирующего материала как вне формы, так и внутри нее. Большое внимание следует уделить нанесению на отвержденный смоляной слой первого слоя.

Первый слой, состоящий, как правило, из тонкой стеклоткани, тщательно уплотняется для вытеснения воздушных включений.

После этого наносят необходимое число слоев тканого ровнинга, ткани или мата до достижения расчетной толщины. Если в структуре композита имеются слои из матов и ткани, то их следует чередовать для обеспечения хорошей межслойной прочности сцепления и получения максимальной прочности. Для уплотнения материала в форме и удаления пузырьков воздуха используют различного рода валики.

В стеклопластиках, полученных с использованием матов и тканого ровнинга, содержание стекловолокна находится в пределах 35 ... 40 %, а при применении только ткани – около 50 %.

### *Структура коррозионно-стойкого слоистого стеклопластика*

Коррозионно-стойкий стеклопластик имеет структуру, состоящую из слоев стеклоткани и стекломатов, пропитанных коррозионно-стойкой смолой. Для получения максимальной коррозионной стойкости требуется определенная последовательность слоев. Поверхностный слой, подвергающийся коррозионному воздействию, должен быть наиболее обогащен смолой (до 90 %). Толщина слоя (0,25 ... 0,5 мм и более) зависит от интенсивности коррозионной среды. На обогащенный смолой поверхностный слой наносят последовательно слои стекломатов, слои стеклоткани (ровницы) и тщательно пропитывают коррозионно-стойкой смолой, получая композит, состоящий из 70% по объему армирующего материала и 30 % смолы.

Каждый слой пропитывают смолой и тщательно прикатывают роликом для обеспечения полной пропитки волокон и вытеснения пузырьков воздуха.

### *Напыление короткорубленным волокном*

Данный метод представляет собой механизированный способ нанесения на поверхность формы рубленого короткого волокна, смешанного со связующим. Схема напыления показана на рис. 8.13.

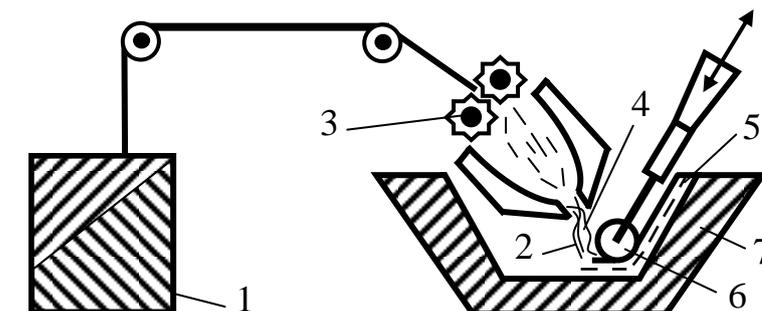


Рис. 8.13. Схема напыления коротко-рубленным волокном:  
1 – ровнинг; 2 – смола с катализатором; 3 – рубильное устройство;  
4 – смола с ускорителем; 5 – уплотненный слой; 6 – валик; 7 – форма

**8.5.2. Методы формования с эластичной диафрагмой.** Формованием с эластичной диафрагмой изготавливают многие детали и конструкции из слоистых композиционных материалов. К этим методам относятся вакуумное формование, автоклавное формование, формование под давлением. Диафрагмы представляют собой тонкие эластичные мембраны из эластичных материалов (различные каучуки и др.).

Конструкция изделия, структура компонентов и возможность использования метода формования с эластичной диафрагмой взаимосвязаны и определяются как технологическими возможностями и необходимостью минимизировать себестоимость изготовления, так и требованиями к изделию в процессе эксплуатации. Перечень требований, удовлетворение которых распределяется между изготовителями и конструкторами изделия, состоит из следующих основных пунктов:

- воспроизводимость, доступность и наличие необходимых технологических свойств у рекомендуемых материалов;
- требования к оборудованию и оснастке;

- обеспечение устройствами для монтажа, осмотра и контроля качества изделий.

#### **8.5.2.1. Вакуумное формование с эластичной диафрагмой.**

Технология вакуумного формования с эластичной диафрагмой (рис. 8.14) разработана для изготовления многих деталей и конструкций. Этим методом легко получать изделия сложной формы, в том числе и с двойным очертанием, а также сравнительно крупные детали. Процесс, в принципе, может быть использован и в тех случаях, когда нельзя применять высокие давления при формовании.

Основные стадии процесса: послойная укладка, подготовка системы выпускных отверстий и формование диафрагмой. Необходимое для послойной укладки количество слоев предварительно вырезают из препрега по размеру и по одному укладывают в форму (или в гнездо формы). Каждый слой отдельно обрабатывают для удаления захваченного воздуха и складок, чтобы обеспечить плотный контакт с предыдущим слоем.

На готовый слоевой пакет укладывается перфорированная разделительная пленка 3, которая отделяет заготовку от технологического пакета и пропускает связующее из заготовки в дренажный материал 2. Для этой цели может быть использована термостойкая пластиковая пленка с отверстиями диаметром 1 мм. Назначением дренажного материала, располагающегося над разделительной пленкой, является впитывание выходящего из заготовки под действием давления связующего и летучих составляющих. В качестве дренажного материала могут использоваться различные виды тканей, в том числе стеклянные. Количество этого материала должно быть достаточным, чтобы смола не выходила на диафрагму. Тем не менее, в целях предосторожности дренажный материал отделяется от диафрагмы сплошной (неперфорированной) температуростойкой пластиковой пленкой. И, наконец, сверху весь технологический пакет накрывается диафрагмой 1, герметизирующей по периферии с помощью клейких паст или клеев.

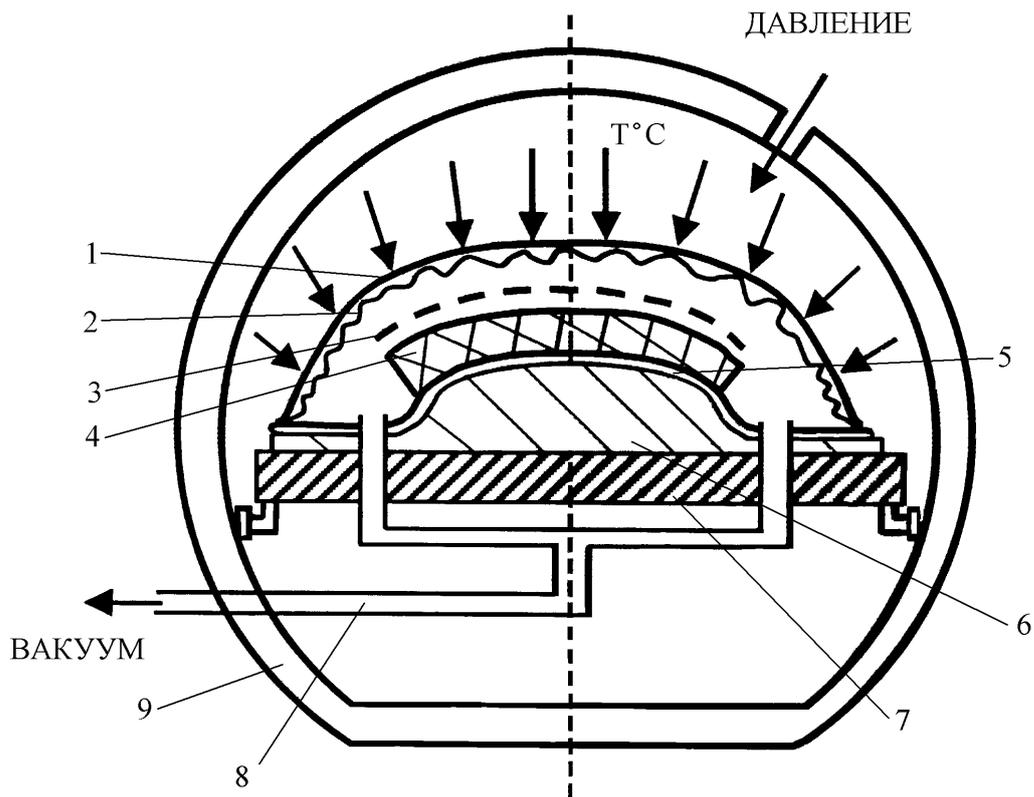


Рис. 8.14. Вакуумное формование с эластичной диафрагмой:

- 1 – эластичная диафрагма; 2 – дренажный материал; 3 – разделительная пленка перфорированная; 4 – заготовка; 5 – разделительная пленка; 6 – форма; 7 – стол-тележка; 8 – вакуумная проводка; 9 – стенка автоклава

Эластичную диафрагму, выкроенную по конфигурации формовой детали, размещают над пакетом листов, выпускной системой и деталями вакуумной линии и уплотняют по линии контакта с плитой формы. Обычно сначала создают небольшой вакуум, чтобы разгладить поверхность диафрагмы, а затем окончательно вакуумируют и нагревают систему. Из герметичной полости, образующейся между слоистым пластиком и диафрагмой, откачивают воздух, чтобы давление там было ниже, чем приложенное к диафрагме. Благодаря образующемуся перепаду давлений с разных сторон диафрагмы, происходит придание заготовке из слоистого пластика необходимой формы и уплотнение композиционного материала. Форму с эластичной диафрагмой переносят в печь для отверждения материала под полным вакуумом. В большинстве случаев вакуум поддерживается на протяжении всего цикла нагрева и охлаждения.

**8.5.2.2. Автоклавное формование.** Автоклавное формование (рис. 8.15) аналогично процессу вакуумного формования с эластичной диафрагмой, с той только разницей, что слоевой пакет помещается в автоклав и подвергается большему давлению для создания изделий с более плотной структурой.

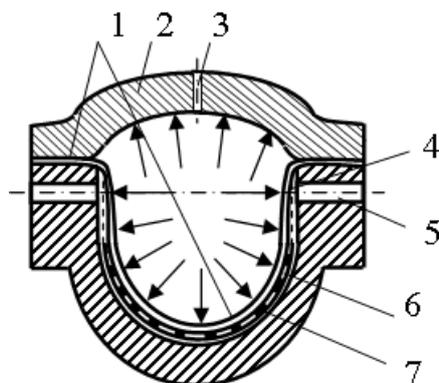


Рис. 8.15. Формование с эластичной диафрагмой под давлением (зажимы не показаны):

- 1 – эластичная диафрагма; 2 – крышка формы; 3 – канал для подачи сжатого газа;  
4 – боковое выпуклое отверстие; 5 – канал для соединения с атмосферой или вакуумом;  
6 – композиционный материал; 7 – вертикальное выпускное отверстие

Автоклавы представляют собой герметичные цилиндрические сосуды давления с полусферическими днищами и крышкой, заполняемые воздухом или азотом, снабженные электронагревателями или иными нагревательными устройствами. Требования по точности регулирования температуры и ее равномерности те же, что и для нагревательных печей. Автоклав обычно снабжается системой регулирования и сброса давления, вакуумной системой, системами регулирования температуры, устройством для загрузки технологической оснастки с заготовкой. Размеры автоклава определяются габаритами изготавливаемых элементов.

Слоевой пакет с эластичной диафрагмой отверждается в автоклаве при одновременном приложении давления и нагрева. В большинстве автоклавных процессов производится также вакуумирование материала для удаления захваченного воздуха и других летучих продуктов. Глубина вакуума и давление в автоклаве регулируются таким образом, чтобы обеспечить максимальное удаление воздуха, но при этом не вызвать чрезмерное течение смолы. Вакуум обычно прикладывается только на начальных стадиях цикла отверждения, в то время как давление в автоклаве поддерживается на протяжении всего цикла

нагрева и охлаждения. При отверждении давление обычно поддерживается на уровне 0,35-0,7 МПа. По сравнению с вакуумным формованием с эластичной диафрагмой этот процесс позволяет получать ламинаты с более точной толщиной и меньшим содержанием пор.

Более высокая стоимость оборудования для автоклавного формования может компенсироваться его более широкими возможностями для формования изделий сложной формы. Стеклопластики, которые обычно требуют повторного склеивания, часто экономически целесообразно **соотверждать** в автоклавах, так как амортизационные расходы на дорогостоящее оборудование снижаются при одновременном отверждении сразу многих изделий.

Методы формования с эластичной диафрагмой под давлением эффективны при получении как глубоких, так и мелких (неглубоких) изделий. К первым относятся обтекатели гидролокаторов (сонаров), обтекатели и кожухи антенн радиолокаторов, обтекатели самолетов.

### ***8.5.3. Прессование элементов из волокнистых композитов.***

Прессование является одним из наиболее распространенных методов формообразования деталей из композиционных материалов. Первоначально прессованием изготавливали преимущественно детали бытового, электро- и радиотехнического назначения. В настоящее время прессование используют и для серийного изготовления нагруженных деталей небольших и средних размеров, а также плоских плит и листов (обшивок). Прессование деталей из полимерных композиционных материалов осуществляется с помощью пресс-формы (рис. 8.16), в которой создаются необходимые давление и температура для формования заготовки и отверждения полимерной матрицы. Нагрев пресс-формы осуществляется с помощью электронагревателей, размещенных в плитах матрицы и пуансоне, или другими способами. Давление формования создается с помощью гидравлического пресса, на столе которого укрепляется матрица, а на подвижной плите – пуансон пресс-формы. Устройства, имеющиеся на прессе, позволяют задавать и выдерживать необходимые параметры (температуру пресс-формы, давление прессования) и весь цикл прессования.

Прессованием изготавливают детали из материалов с хаотическим и ориентированным расположением армирующих волокон. Исходными материалами при прессовании изделий с неориентированным расположением волокон могут быть короткие волокна, отрезки лент небольшой длины, гранулы из пучков волокон, предварительно

пропитанные связующим и соединенные в результате его частичного отверждения. Эти пресс-волокониты имеют рыхлую структуру, и перед загрузкой в форму их необходимо таблетировать для уменьшения объема. Давление таблетирования достигает 200 МПа. Перед прессованием обычно осуществляется предварительный нагрев таблеток до температуры 75 ... 85 °С.

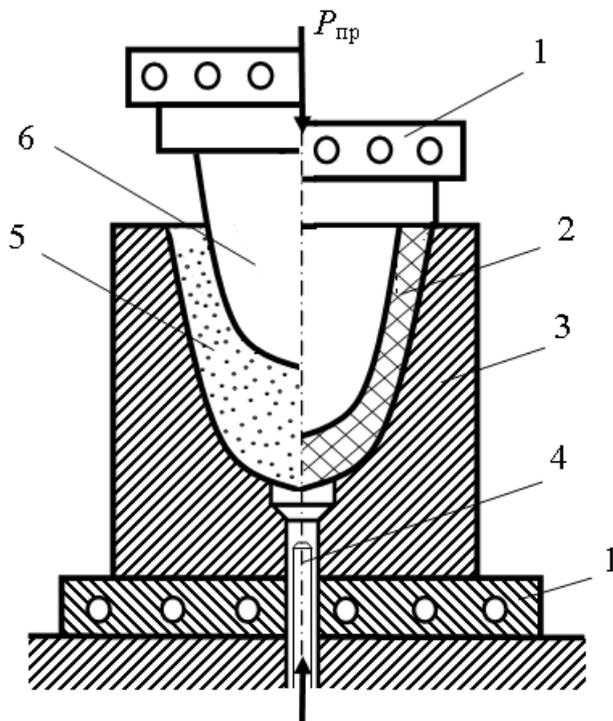


Рис. 8.16. Схема прессования: 1 – плита обогрева; 2 – отпрессованная деталь; 3 – матрица; 4 – выталкиватель; 5 – навеска полуфабриката; 6 – пуансон

При изготовлении деталей, в которых композит должен иметь слоистую структуру с определенной ориентацией волокон, используют заготовки из препрегов (лент или тканей). В этом случае укладке материала в пресс-форму предшествует операция раскроя. Раскрой полуфабриката (препрега) состоит в резке или вырубке исходного материала на заготовки требуемой конфигурации. Операция раскроя может выполняться с помощью ножа, ножниц или простых штампов.

В настоящее время для раскроя препрегов применяют также лазерные установки и устройства для резки струей воды.

Полученные заготовки укладываются в определенном порядке в пакет. Разделительная пленка, наносимая на препрег при его изготовлении, снимается с каждой заготовки непосредственно перед ее укладкой на предыдущий слой. Собранный пакет слегка спрессовывается или предварительно формируется в подогретом состоянии для

удаления воздуха и сохранения расположения слоев заготовки при укладки в полость матрицы пресс-формы.

Собранная слоистая заготовка помещается в предварительно нагретую пресс-форму и выдерживается там некоторое время. После прогрева, когда связующее размягчается и начинает переходить в вязкотекучее состояние, производится полное смыкание пресс-формы. Под действием создаваемого прессом давления волокнистая масса полностью заполняет объем между пуансоном и матрицей, т.е. происходит формование детали. При необходимости для обеспечения удаления летучих продуктов и лучшего размещения материала в форме вначале проводят несколько подпрессовок (размыканий и смыканий пресс-формы).

Материал в пресс-форме выдерживается при температуре отверждения определенное время, в течение которого происходит окончательное отверждение связующего, т.е. образование полимерной матрицы, фиксирующей конфигурацию и размеры детали. После выдержки детали под давлением производится поднятие пуансона и удаление детали с помощью имеющихся в пресс-форме выталкивателей.

Давление прессования определяется в основном типом связующего, толщиной стенок и конфигурацией детали, а также условиями предварительного нагрева материала и может изменяться от 0,2 до 10 МПа. Например, при прессовании в пресс-форме деталей из стеклотекстолита на основе эпоксифенолформальдегидных связующих давление порядка 2,0 МПа обеспечивает стабильность соотношения основных компонент композиции и ее прочность. С увеличением давления прессования прочность эпоксидных боропластиков и углепластиков сначала возрастает, а затем снижается. Максимальная прочность реализуется соответственно при давлении 1,5 и 2,0 МПа. Падение прочности при дальнейшем увеличении давления может быть объяснено дроблением хрупких волокон. Прессованием целесообразно изготавливать тонкостенные детали средней нагруженности – панели крыльев или управляющих поверхностей, крышки люков, конические или полусферические обтекатели, размеры которых позволяют размещать на столах гидропрессов пресс-формы для их изготовления.

**8.5.4. Пултрузия.** В последние годы широкое применение в летательных аппаратах находят профили, прутки, трубы и другие конструктивные элементы, изготавливаемые из волокнистых композитов на полимерной матрице путем непрерывного протягивания армиру-

ющего материала, пропитанного связующим и отверждаемого в профилирующей форме. Такой метод называется пултрузией. При пултрузии армирующий материал протягивается под действием внешнего усилия. Схема установки для получения конструктивных элементов пултрузией показана на рис. 8.17.

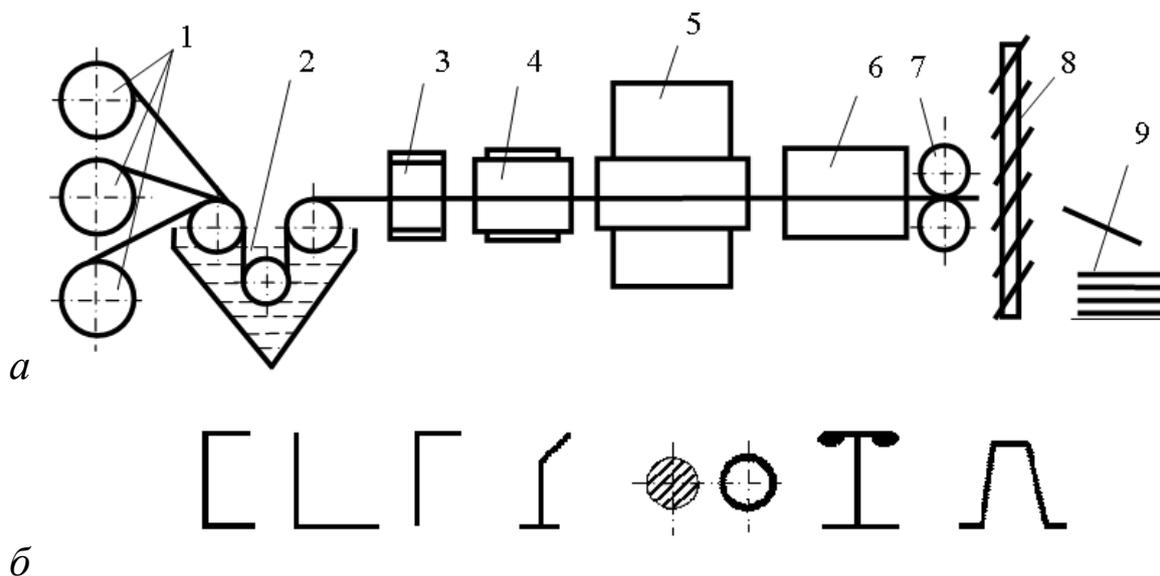


Рис. 8.17. Схема установки для изготовления элементов пултрузией (а) и некоторые профили, которые могут быть изготовлены этим методом (б):

- 1 – бабины или катушки с армирующим материалом; 2 – ванна с жидким полимерным связующим; 3 – устройство для контроля содержания связующего в пропитанном материале; 4 – предварительное формующее устройство; 5 – профилирующая форма с тепловым воздействием на формируемый материал; 6 – печь для термообработки; 7 – тянущее устройство; 8 – отрезное устройство; 9 – отрезанные детали

Армирующий материал (жгуты, холсты или тканые ленты) последовательно проходит через ванну с жидким связующим 2, пропитывается, идет далее в матрицу предварительного формования 4, затем в обогреваемую пресс-форму 5, где фиксируется требуемая конфигурация и отверждается полимерное связующее. В матрице предварительного формования плоская по форме лента пропитанного материала постепенно преобразуется по сечению к форме получаемого конструктивного элемента. Окончательно сечение сформируется в профилирующей матрице 5, где в результате нагрева производится частичное отверждение. Для завершения отверждения элемент после формования дополнительно термообрабатывают в печи 6. Формообразующие элементы, через которые протягивается материал, обычно изготавливаются из фторопласта.

Материал протягивается по всему тракту формообразования с помощью какого-либо тянущего устройства, например, фрикционной роликовой подачи, гусеничного механизма и т.п. Полученный профиль, труба или пруток, разрезается на части определенной длины и далее может использоваться при сборке конструкций.

Пултрузия является высокопроизводительным высокоавтоматизированным технологическим процессом, который может оказаться весьма пригодным для получения элементов внутреннего набора подкрепленных конструкций, например, стрингеров. Следует отметить, что блок формования можно спроектировать таким образом, чтобы можно было получать не только прямолинейные, но и криволинейные конструктивные элементы, например, круговые шпангоуты.

Кроме того, процесс пултрузии может оказаться пригодным для протягивания и отверждения жгутов высокомодульного композита через отверстия в экструдированных металлических профилях, для усиления полок металлических профилей плоскими слоями композитного материала.

**8.5.5. Намотка.** Намотка – это технологический процесс, в котором армирующий материал в виде жгута, нити, ленты, ткани наматывается на вращающуюся оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия. Специальные механизмы, которые перемещаются со скоростью, синхронизированной с вращением оправки, контролируют заданное направление и расположение армирующего материала на оправке. Последовательные слои наносятся до тех пор, пока не будет набрана необходимая толщина. Угол намотки может изменяться от продольного до окружного, включая любые углы спиральной намотки в этом диапазоне. После получения необходимой схемы армирования, толщины и структуры производится отверждение связующего и удаление оправки.

Намоткой на оправки изготавливаются изделия, имеющие форму тел вращения: баллоны давления, гладкие цилиндры, трубы, корпуса твердотопливных ракетных двигателей, лонжероны лопастей винтов вертолетов, головные части и отсеки ракет и т.д.

Технология изготовления изделий методом намотки позволяет наиболее полно реализовать в изделиях высокую прочность на растяжение волокон армирующего материала, реализовать высокую степень автоматизации технологического процесса.

Армирующий материал при намотке должен укладываться на оправку с некоторым натяжением, которое способствует увеличению давления формования и получению беспористой структуры композитного материала. Сжатие связующего и волокон предварительно растянутыми волокнами улучшает взаимодействие полимерной матрицы и армирующих волокон, что улучшает прочность, жесткость изделий. Оптимальные значения натяжения армирующего материала при намотке определяются в процессе опытных работ. Так при намотке стеклонитями оптимальные значения составляют 5 ... 15 % от предела прочности нити.

Увеличение натяжения выше оптимального приводит к обеднению композиции связующим, последующему расслоению, что снижает прочность композиции.

### *Виды и способы намотки*

В зависимости от схемы укладки армирующего материала на оправку имеют место следующие виды намотки: спирально-перекрестная (спирально-продольная, спирально-поперечная); спирально-винтовая; спирально-кольцевая; продольно-поперечная; планарная (полюсная, плоскостная, орбитальная); зональная; тетрамотка.

Рассмотрим лишь те, которые нашли наибольшее распространение. Более подробное описание дано в [7, 30].

**Спирально-перекрестная намотка.** В основу спирально-перекрестной намотки положен спиральный виток, представляющий собой пространственную кривую.

Основную разновидность спирали представляет геодезическая линия, являющаяся кратчайшим расстоянием между двумя точками на поверхности (прямая линия на плоскости, винтовая линия на цилиндре, все меридианы оболочек вращения).

Классическим видом намотки является геодезическая, при которой армирующий материал (нити, жгуты, ленты) укладываются на поверхность оправки по геодезическим линиям с расчетным углом укладки  $\varphi$ .

Методом геодезической намотки могут быть изготовлены изделия, имеющие различные геометрические формы: цилиндрические, конические, сферические, оваловиды, эллипсоиды, параболоиды, гиперболоиды, торовые поверхности, поверхности коробчатого сечения.

При намотке на цилиндрическую поверхность нить или лента укладывается на поверхность оправки по винтовой геодезической линии с постоянным углом укладки  $\varphi_D$ , определяемым из соотношения  $\sin \varphi_D = d/D$  (рис. 8.18,а). Раскладчик совершает возвратно-поступательные движения вдоль вращающейся с определенной скоростью оправки, в результате чего создается каркас взаимно пересекающихся витков армирующего материала. За прямой и обратный ход раскладывающего устройства формируется один спирально-перекрестный виток. При следующем проходе раскладывающего устройства лента укладывается встык к ранее намотанной.

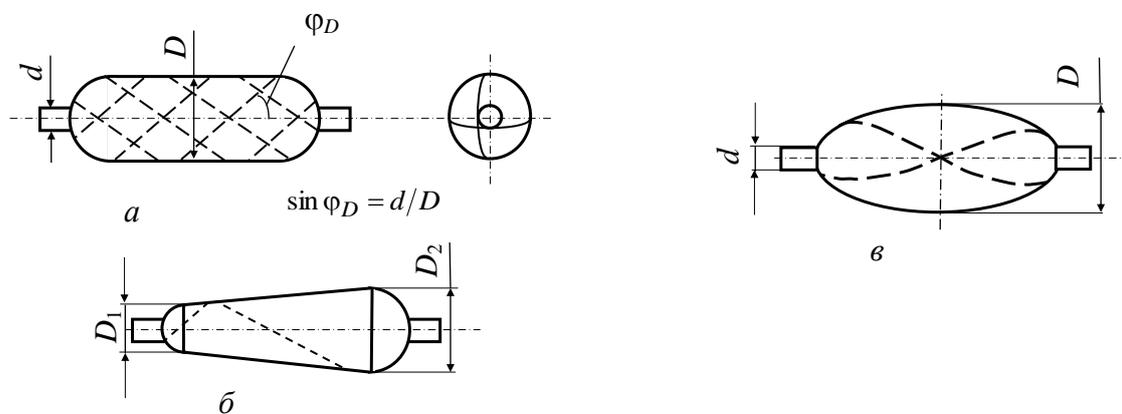


Рис. 8.18. Примеры поверхностей, образуемых геодезической намоткой: а – цилиндрическая с законцовками; б – коническая; в – оваловидная

Процесс намотки продолжают до тех пор, пока не будет закрыта вся поверхность оправки и сформирован полный двойной слой. Для получения заданной толщины стенки изделия проводят намотку необходимого из расчета числа слоев.

Геодезическая намотка конических оболочек (рис. 8.18,б) осуществляется при тех же кинематических движениях оправки и раскладчика, однако намотка на конические поверхности имеет некоторые особенности. Вследствие изменения диаметра оболочки при постоянном угле или шаге намотки толщина стенки конической оболочки будет увеличиваться от большого диаметра к меньшему. Для получения равномерной толщины используется переменный угол намотки.

Если оболочки в форме оваловидов (рис. 8.18,в) имеют два полюсных отверстия, то каждый геодезический виток касается окружностей отверстий. Диаметр отверстий выражается через диаметр эк-

ватора  $D$ , и угол намотки на экваторе  $\varphi_D$  по формуле  $d = D \cdot \sin \varphi_D$ . Геодезической намоткой можно произвести укладку армирующего материала и на торовую поверхность. Методом геодезической намотки формируются коробчатые конструкции прямоугольного сечения.

Одной из важнейших отличительных черт геодезической намотки является возможность изготовления сложных конструкций, составленных из цилиндров, конусов, овалов, без их сборки и соединений методом непрерывной геодезической намотки.

Соотношения геометрических параметров и размеров таких конструкций должны быть выбраны так, чтобы обеспечивалась непрерывность траектории нити. Таким образом, метод спирально-перекрестной намотки имеет большой диапазон возможностей по конструированию различных схем укладки волокнистого армирующего материала в соответствии с действующими нагрузками. Распределяя армирующий материал вдоль направления действия главных напряжений от действующих нагрузок, достигается максимальное использование прочности волокон в изделиях.

Плоская (полюсная, орбитальная, планарная) намотка осуществляется пряжей нитей, лентой, жгутом на неподвижную в плоскости намотки оправку (рис. 8.19), в то время как подающее ленту устройство вращается относительно продольной оси под заданным углом наклона.

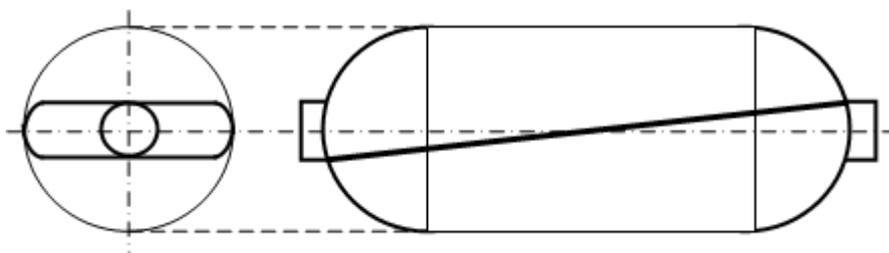


Рис. 8.19. Расположение нити (ленты) при однослойной полюсной намотке

После каждого его оборота оправка перемещается вперед на расстояние, соответствующее одной ширине ленты. Ленты укладываются впритык одна за другой. Готовый слой состоит из двух сложенных, направленных в противоположные стороны относительно угла намотки. При этом траектория укладываемого материала отклоняется от положения геодезической линии. Отклонения от геодезического положения витка при плоскостной намотке могут приводить к соскальзыванию укладываемого материала под действием технологи-

ческого натяжения ленты или нити. Чтобы исключить соскальзывание, необходимо обеспечить определенное значение коэффициента трения. Для равновесия ленты, нити нужно выполнить условие

$$\operatorname{tg}\theta \leq \mu,$$

где  $\theta$  – максимальный угол отклонения плоскостного витка от геодезического;  $\mu$  – коэффициент трения укладываемого материала по поверхности оправки.

Плоскостной намоткой можно, в принципе, изготовить те же изделия, которые получают геодезической намоткой.

**Продольно-поперечная намотка** является одной из первых схем изготовления цилиндрических оболочек узкими лентами, укладываемыми в продольном и кольцевом направлениях (рис. 8.20).

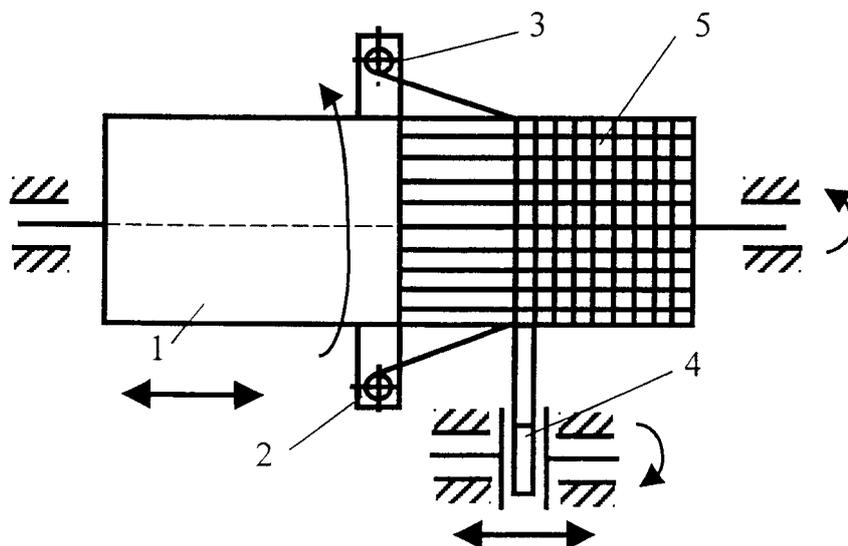


Рис. 8.20. Схема продольно-поперечной намотки:

- 1 – оправка; 2 – вертлюг катушек продольных лент; 3 – катушки продольной ленты; 4 – катушки кольцевой ленты; 5 – наматываемая оболочка

Вертлюг, на котором по периметру установлены катушки с лентой, вращается синхронно с вращением оправки и перемещается при этом вдоль оси оправки, укладывая продольные ленты. Одновременно с раскладчика спирально-винтовой намотки укладываются кольцевые слои ленточного армирующего материала, фиксирующие ленты продольной укладки.

Продольно-поперечная намотка применяется, как правило, при «сухой» намотке препрегом (лентой, предварительно пропитанной связующим). Метод имеет высокую производительность. Использо-

ется при изготовлении высокопрочных труб, работающих на внутреннее давление, товаров народного потребления (лыжных палок, удилищ и др.). Находят применение и другие методы намотки.

**Совмещенная спирально-кольцевая намотка.** Спиральные и кольцевые слои армирующего материала укладываются на оправку одновременно с двух раскладывающих устройств, движение которых согласованно задается вращением оправки. Необходимым условием данного способа является то, что начало намотки кольцевых слоев и спирально-перекрестных и их окончание в пределах одного спирально-кольцевого пакета должно быть осуществлено в одно и то же время. Метод применяют для изготовления сосудов давления, изделий цилиндрической и конической формы с углом конусности не более  $20^\circ$ .

**Зональная намотка.** В основном используется для намотки сферических сосудов давления. При намотке ленты, жгута на поверхность сферы каждый виток должен располагаться в плоскости, проходящей через центр сферы. Намотку ведут по зонам, внутри которых укладка армирующего материала производится с одним углом намотки (рис. 8.21). Для изготовления сферы число зон должно быть достаточно большим (порядка 10). Зоны различаются между собой углами намотки.

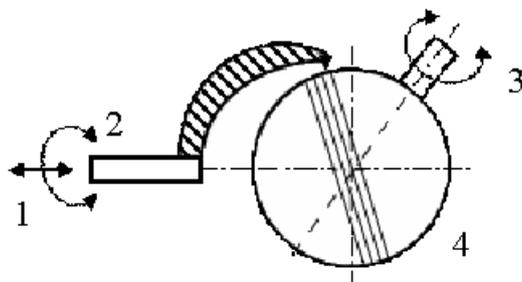


Рис. 8.21. Схема зональной намотки сферы: 1 – перемещение (шаг) веретена; 2, 3 – направление вращений; 4 – сферическая оправка с намотанной зоной

**Спирально-винтовая намотка.** Лента, нить волокнистого материала укладывается на поверхность оправки по винтовой линии. Витки плотно прилегают между собой или имеют строго постоянный нахлест.

Этот метод используют для усиления в местах, где требуется повышенная кольцевая прочность и жесткость (упрочнение дисков компрессоров ГТД, металлических трубопроводов и др.).

**Тетранамотка.** Для цилиндрических и конических оболочек, подвергающихся действию интенсивных сжимающих нагрузок, при высокой изгибной жесткости используют сетчатую структуру оболочек.

Сетчатая структура оболочки изготавливается методом тетранамотки, заключающаяся в том, что армирующая лента укладывается в предварительно нарезанные канавки в резиновом слое оправки. Углы укладки, количество ячеек, геометрию ячеек, высоту ребер жесткости предварительно рассчитывают. Кольцевую намотку наружного слоя оболочки осуществляют непосредственно на сетчатую оболочку обычным способом.

## **8.6. Изготовление изделий из углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ)**

Для изготовления элементов, испытывающих в процессе эксплуатации высокие температуры ( $>2000\text{K}$ ), тепловые удары, химические воздействия, в настоящее время используются композиционные материалы, представляющие собой углеродосодержащую матрицу (либо графитовую), армированную углеродным волокном.

УУКМ обладают высокой теплостойкостью, термopрочностью, стойкостью к тепловому удару и облучению, химической стойкостью, малой плотностью и целым рядом других ценных свойств, позволяющих применять их в термонагруженных конструктивных элементах.

Свойства углерод-углеродных композиционных материалов, как и других волокнистых КМ, зависят от расположения волокнистых армирующих элементов. Из наиболее часто используемых схем армирующих каркасов можно выделить три класса: с хаотичной ориентацией волокон (фетры и войлоки); с расположением волокон в двух направлениях (ткани 2D армирование); с ориентацией в трех и более направлениях, т.е. с пространственным расположением волокон.

Наиболее перспективным видом армирования углерод-углеродных композитов конструкционного назначения является многонаправленное, пространственное армирование, когда армирующие компоненты располагаются в трех, четырех и более направлениях. Такие

образования называются пространственными армирующими структурами. Более подробное рассмотрение достоинств и недостатков тех или иных пространственных структур армирующих каркасов УУКМ и их получение дано в [18].

### *Получение углерод-углеродных КМ (УУКМ)*

Наибольшее применение нашли следующие способы получения УУКМ.

Первый способ заключается в том, что в начале создается заготовка углепластика на полимерной матрице, в качестве которой применяются органические смолы, дающие высокий коксовый остаток. Чаще всего для этой цели применяют фенолформальдегидные, фурановые смолы и нефтяные пеки вследствие их технологичности и низкой стоимости. Далее заготовку подвергают высокотемпературному воздействию в неокисляющейся среде (инертный газ) до температуры 1073К. В процессе высокотемпературного воздействия происходит термодеструкция матрицы с образованием кокса (карбонизация), потеря массы, образование большого числа пор, снижение физико-механических свойств композита. Процесс карбонизации сопровождается удалением испаряющихся смолистых соединений и газообразных продуктов с образованием твердого кокса. Поэтому в процессе карбонизации ключевым моментом является выбор температурно-временного режима, который должен обеспечивать максимальное образование коксового остатка из матрицы, так как прочность карбонизированного композита зависит в том числе и от количества и плотности образовавшегося кокса. Стадией карбонизации углепластика завершается процесс получения пористых, низкоплотных УУКМ. Для устранения пористости и повышения плотности карбонизированный материал вновь пропитывается связующим и карбонизируется. Этот цикл может повторяться до тех пор, пока не будет получен материал с необходимыми механическими свойствами. Повторная и последующая пропитки проводятся в автоклавах в режиме «вакуум-давление», т.е. сначала заготовка нагревается в вакууме, после чего вводится связующее и создается избыточное давление до 0,6 – 1,0 МПа. Пористость композита с каждым циклом «пропитка-карбонизация» уменьшается, а прочность увеличивается.

Этим методом можно получать УУКМ с плотностью до 1800 кг/м<sup>3</sup> и выше. Несмотря на сравнительную простоту метода, необходимость многократных циклов уплотнения значительно удли-

няет и удорожает процесс получения изделий из УУКМ, что является серьезным недостатком указанного метода.

Второй способ получения УУКМ заключается в осаждении пироуглерода из газовой фазы. Газообразный углеводород (метан, бензол, ацетилен и т.д.) диффундирует через углеволокнистый пористый армирующий каркас, где под действием температуры происходит разложение углеводорода на нагретой поверхности волокна. Осаждающийся углерод постепенно создает соединительные мостики между волокнами. Скорость осаждения и структура получаемого пироуглерода зависит от температуры, скорости потока газа, давления, типа и содержания волокна, схемы армирования и др. Процесс осаждения проводится в вакууме или под давлением в индукционных печах или печах сопротивления при температуре 1173-1423К и давлении 130-2000КПа. Уменьшение температуры приводит к снижению скорости осаждения и увеличению продолжительности процесса. Увеличение температуры ускоряет осаждение пироуглерода, но при этом углеводородный газ не успевает диффундировать в объем заготовки и происходит поверхностное наложение углерода. Продолжительность процесса достигает сотни часов. Существуют способы (неизметрический метод), существенно ускоряющие процессы осаждения углерода из газовой фазы. Более подробно об этих методах смотрите в [7].

## **8.7. Технология получения композиционных материалов с металлической матрицей**

В композитах с металлической матрицей сочетаются достоинства конструкционных металлических материалов с достоинствами композитов вообще. Для них характерны высокие значения прочностных характеристик, модулей упругости, вязкости разрушения, ударной вязкости; эти материалы сохраняют стабильность своих характеристик в более широких температурных интервалах, чем материалы с полимерными матрицами; они обладают также высокой тепло- и электропроводностью, малой чувствительностью к тепловым ударам и поверхностным дефектам. Им свойственны воспроизводимость характеристик, обусловленная этим же качеством конструкционных металлических материалов, в сочетании с высокой технологичностью, а также высокие значения временного сопротивления при растяжении в направлении, нормальном к оси волокон, прочности

при сдвиге. Последние из перечисленных достоинств позволяют в большинстве случаев применять наиболее простую одноосную схему армирования; гораздо менее распространены схемы послойно-перекрестного (ортогонального или более сложного характера плоского армирования) расположения волокон.

Металлические матрицы обладают высокой реакционной способностью в жидкофазном состоянии и высоким сопротивлением деформированию в твердофазном состоянии, поэтому проблемы химической и механической совместимости для композитов этого типа весьма серьезны, их решение требует комплексных подходов, тщательной научной и практической проработки процессов. Для конструктивных композитов преобладающими являются твердофазные процессы, когда матрица находится в состоянии высокой пластичности и ограниченной реакционной способности.

### **Металлические матричные материалы**

Для конструктивных композитов в качестве матричных составляющих преимущественно применяются алюминий, титан, сплавы на основе этих металлов, а также магниевые сплавы [20, 47].

*Матричные материалы на основе алюминия.* Эти материалы имеют при нормальных условиях широкий спектр прочностных характеристик (временное сопротивление разрыву от 60 – 80 до 700 – 750 МПа), обладают низкой плотностью, высокой пластичностью, хрупкостью оксидной пленки, технологичностью при различных видах механической обработки, высокой свариваемостью, коррозионной стойкостью, способностью к релаксации напряжений. В качестве матричной составляющей таких композитов применяются технический алюминий, сплавы марок АМц, АМr2, АМr6, АД33, АВ, 1201, Д20, Д16, В95 и др.

Алюминий и сплавы на его основе при комнатной температуре характеризуются модулем упругости  $E = (68 - 73,5)$  ГПа, модулем сдвига  $G = (26,5 - 27)$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\nu_p = 0,32 - 0,33$ .

В практике получения композитов на основе алюминия широко применяют методы предварительного совмещения составляющих, например, плазменное напыление матричного материала, которое существенно изменяет его структуру и свойства. В этом случае матрица формируется в результате высокоскоростного перемещения расплавленных мелких частиц, соударения их с поверхностью, на которую производят напыление. Поэтому матрица в указанных услови-

ях формируется в виде скопления тонкопластинчатых частиц размером 5 – 10 мкм, по границам которых наблюдаются сплошные либо дискретные тончайшие оксидные пленки (отдельные мельчайшие оксидные вкрапления наблюдаются и внутри пластин, их содержание зависит от атмосферы, в которой производят напыление). Кроме того, содержание легирующих элементов и примесей после плазменного напыления изменяется. В совокупности перечисленные факторы существенно изменяют и структуру, и механические свойства алюминиевых матриц.

Наличие в плазменно-напыленных матрицах дисперсных оксидных вкраплений и оксидных пленок по границам частиц вызывает смещение в сторону более высоких температур интервалов состояния высокой пластичности и параметров (температура и давление) формирования прочного соединения составляющих композитов.

*Титановые и магниевые матрицы.* Магниевые и титановые матричные составляющие композитов имеют ряд достоинств (магниевые матрицы обладают малой плотностью, титановые – сохраняют высокие прочностные характеристики при повышенных температурах), однако по технологичности (и особенно при горячем деформировании) они заметно уступают алюминиевым матрицам.

В качестве матричных составляющих применяются магниевые сплавы марок МА2-1, МА5, МА8 и некоторые другие. Горячее деформирование, хорошая свариваемость, способность длительно сохранять высокие прочностные характеристики (360 МПа и выше) при повышенных температурах (300 – 450 °С).

Однако эти материалы даже при повышенных технологических температурах сохраняют высокое сопротивление деформации.

**8.7.1. Получение композиционных материалов с металлической матрицей методом жидкофазного совмещения.** Выбор технологического метода получения того или иного металлического композиционного материала определяется в основном следующими факторами: видом исходных материалов матрицы и упрочнителя; возможностью введения упрочнителя в матрицу без его повреждения, создания прочной связи на границе раздела упрочнитель-матрица и максимальной реализации в материале свойств матрицы и упрочнителя, получения необходимого распределения упрочнителя в матри-

це, совмещения процессов получения материала и изготовления из него детали; экономичностью процесса.

Существенную роль при выборе метода часто играет также наличие того или иного вида оборудования.

*Пропитка волокон расплавом матрицы.* Этот метод получения композиционных материалов заключается в пропитке расплавленным материалом матрицы упрочнителей в виде отдельных волокон, пучков волокон, либо матов, состоящих из волокон или нитевидных кристаллов, уложенных в определенном порядке или произвольно.

Большим преимуществом этого метода является возможность получения без дополнительной механической обработки изделий практически любой конфигурации, а также возможность использования в ряде случаев существующего литейного оборудования.

Однако чрезвычайно высокая реакционная способность большинства армирующих материалов в контакте с металлическими расплавами значительно сужает возможности практического применения метода пропитки. Другим важным моментом, играющим существенную роль в процессе получения композиционного материала пропиткой, является необходимость хорошей смачиваемости упрочняющих волокон жидкой матрицей, поскольку при невыполнении этого условия значительно усложняется технология получения материала.

Существует несколько разновидностей метода, различающихся между собой условиями пропитки: 1) пропитка расплавом при нормальном давлении; 2) вакуумное всасывание; 3) пропитка расплавом под давлением; 4) комбинированные методы пропитки.

Пропитка волокон расплавом матрицы при нормальном давлении и разновидность этого метода – пропитка пучка волокон протяжкой их через расплав, или, как иногда его называют, метод непрерывного литья композиционных материалов, является оптимальным способом изготовления изделий сложной формы и полуфабрикатов в виде прутков, труб, профилей и др. Этот метод применим в тех случаях, когда волокна термодинамически и химически стабильны в расплавленной матрице или слабо с ней взаимодействуют, количество волокон в объеме получаемого изделия не превышает определенных значений, волокна хорошо смачиваются расплавом матрицы.

Самый простой вариант метода пропитки заключается в укладке волокон в литейную форму и заливке в нее под действием силы тяже-

сти расплавленного или полурасплавленного металла матрицы. При этом могут быть применены литейные формы, используемые для изготовления изделий из обычных металлических сплавов, и стандартное литейное оборудование. Существенным недостатком такого метода является наличие после заливки в материале пустот, сильно снижающих прочность композиционного материала. Образование таких пустот связано с тем, что при большом (40 – 80 об. %) содержании упрочняющих волокон, уложенных в литейной форме, расстояния между ними чрезвычайно малы, и давления заливаемого металла, обусловленного только весом металла, оказывается недостаточно для полной пропитки волокон.

Перспективной и значительно более широко применяемой разновидностью метода пропитки расплавом при нормальном давлении является непрерывная пропитка пучка волокон. Схема такого технологического процесса показана на рис. 8.22. Пропитываемые волокна поступают в ванну с расплавленным металлом, не соприкасаясь друг с другом, затем они проходят через фильеру, формирующую прутки, который вытягивается с определенной скоростью, обеспечивающей на выходе отверждение матрицы с волокном. При вытягивании прутки может иметь различную степень закрутки на единицу длины. Такая технология позволяет изменять содержание волокна, обеспечивая при этом равномерное распределение волокон в поперечном сечении. Виды и формы изделий, которые можно получить этим методом, показаны на рис. 8.23.

Схема установки для получения композиционных материалов методом пропитки в инертной атмосфере показана на рис. 8.24. Установка состоит из плавильного тигля 1 и заливочной камеры 5, выполненных из графита, заключенных в контейнер 10. Снаружи контейнера расположен нихромовый нагреватель 9 мощностью 5 кВт, изолированный от контейнера термоизоляционным цементом. Нижняя часть плавильного тигля имеет коническую форму, соответствующую форме запорного плунжера 2. Между плавильным тиглем и заливочной камерой установлен графитовый фильтр 3 с отверстиями небольшого диаметра и графитовая пробка 4 с коническим коллектором и двумя питателями. Сверху установка закрыта крышкой 11, а в нижней ее части расположен холодильник 7 с проточной водой. Подача

инертного газа – аргона осуществляется через отверстие в запорном плунжере. Температура расплава измеряется в тигле термопарой 12.

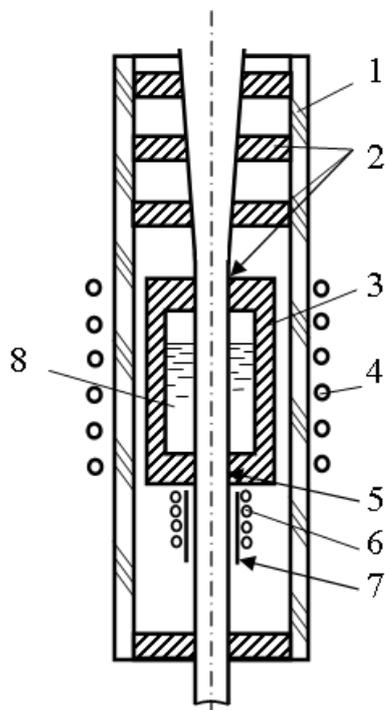


Рис. 8.22. Схема установки для непрерывной пропитки пучка волокон: 1 – кварцевая трубка; 2 – коллиматоры волокна; 3 – тигель; 4 – индуктор; 5 – формирующее отверстие; 6 – холодильник; 7 – трубка кристаллизатора; 8 – расплав

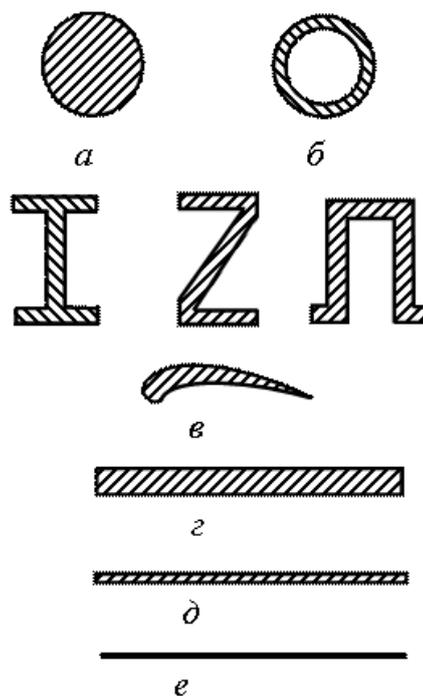


Рис. 8.23. Виды изделий, полученных пропиткой пучка волокон: а – пруток; б – труба; в – профили; г – плита; д – лист; е – лента

Установка работает следующим образом. В заливочную камеру устанавливается заготовка из армирующего материала. В контейнер устанавливается графитовая пробка и плавильный тигель. В тигель, нижнее отверстие которого закрыто запорным плунжером, загружается материал матрицы. Контейнер закрывается крышкой, и через отверстие в плунжере его полость заполняется аргоном. Затем осуществляется нагрев и расплавление матричного материала, после чего плунжер поднимается вверх, и матрица, заполняя заливочную камеру, пропитывает заготовку из армирующего материала.

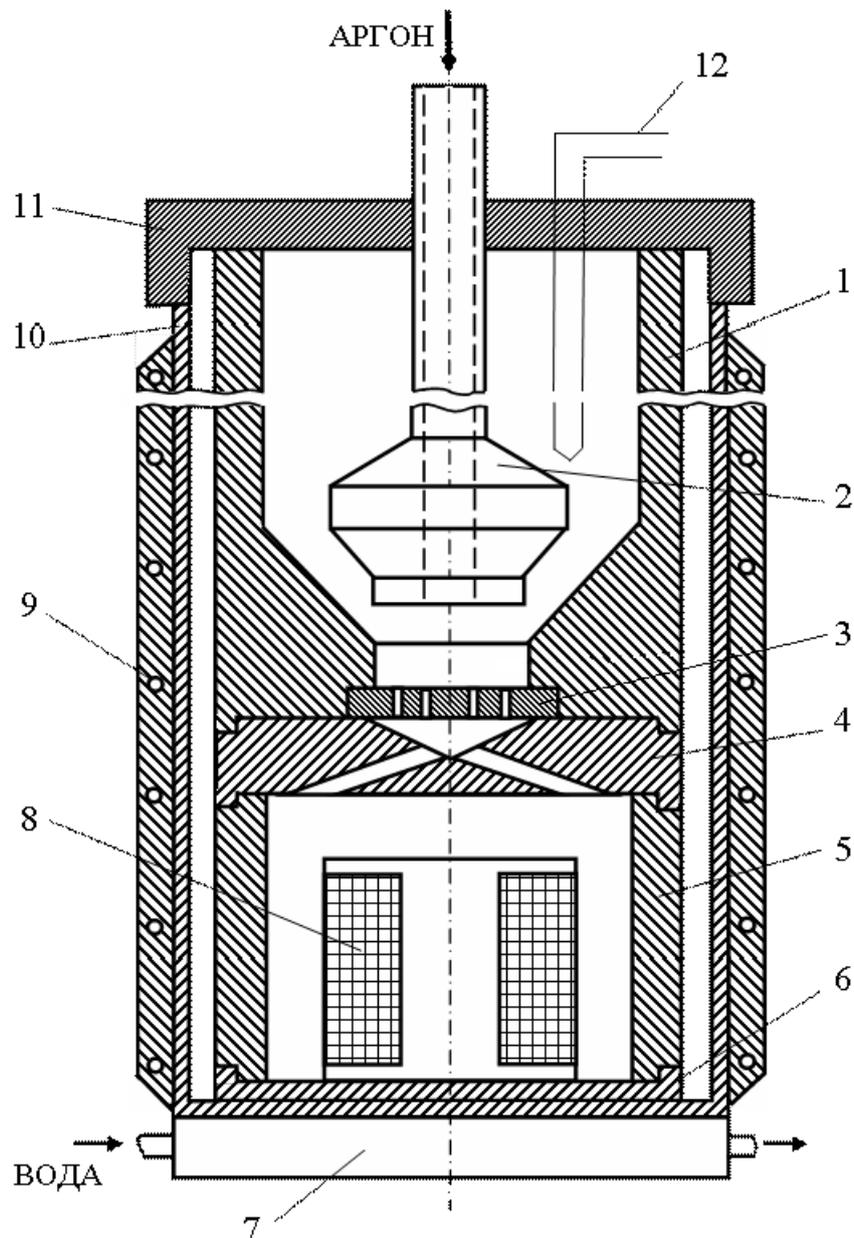


Рис. 8.24. Схема установки для пропитки в инертной среде:

- 1 – графитовый тигель; 2 – запорный плунжер; 3 – фильтр (графит);  
 4 – пробка с коллектором и питателями (графит); 5 – заливочная камера (графит);  
 6 – дно (графит); 7 – холодильник (коррозионно-стойкая сталь); 8 – заготовка  
 из армирующего материала; 9 – нагреватель (нихром); 10 – контейнер  
 (коррозионно-стойкая сталь); 11 – крышка (графит); 12 – термопара

Метод пропитки в промышленном масштабе применяют для производства боралюминиевой ленты. Это стало возможным в результате разработки процесса покрытия борного волокна нитридом бора, надежно защищающим борное волокно от взаимодействия с расплавленным алюминием и предотвращающим деградацию волокон. Выпускаемый полуфабрикат, известный под маркой нитборал, представляет собой монослойную ленту шириной 6,35 мм, содержа-

щую 65 – 75 об. % упрочнителя в виде борного волокна диаметром 142 мкм, покрытого нитридом бора и пропитанного расплавленным алюминием.

Схематически процесс получения такой ленты показан на рис. 8.25. Процесс заключается в пропускании борных волокон, сматываемых с нескольких катушек, через реактор с окислительной атмосферой с целью образования на их поверхности борного ангидрида, а затем через реактор с атмосферой аммиака, где осуществляется азотирование волокон. Затем волокна, покрытые нитридом бора, пропускаются через расплавленный алюминий и в виде ленты наматываются на бобину.

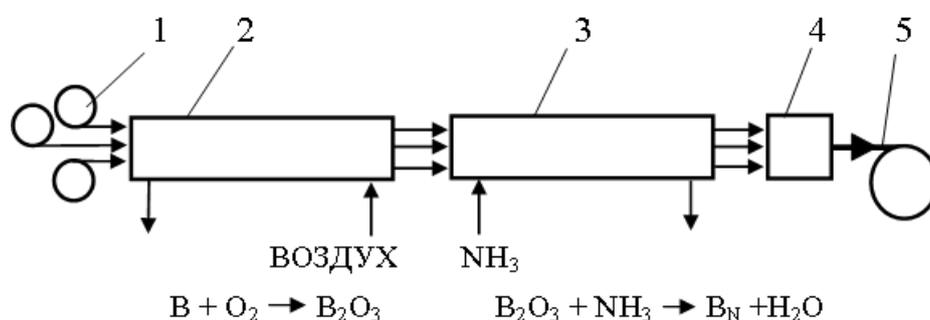


Рис. 8.25. Схема получения ленты из борного волокна методом пропитки алюминием: 1 – шпули с борными волокнами; 2 – реактор окисления; 3 – реактор азотирования; 4 – расплавленный алюминий; 5 – пропитанная лента

*Пропитка в вакууме.* Большинство материалов, применяющихся в качестве упрочняющих волокон или нитевидных кристаллов, при температурах пропитки в большей или меньшей степени склонно к окислению, в результате которого могут значительно снизиться их свойства. Кроме того, образование окисной пленки на поверхности упрочняющихся волокон изменяет условия смачиваемости волокон расплавом матрицы и влияет на величину и характер прочности связи на границе раздела матрица-волокно, поэтому изготовление композиционных материалов методом пропитки расплавом осуществляется главным образом либо в защитной атмосфере, либо в вакууме. Причем вакуум во многих случаях является более предпочтительной средой, активирующей поверхность пропитываемых волокон и улучшающей условия смачиваемости.

Вакуумирование объема, занятого перед заливкой упрочняющими волокнами или нитевидными кристаллами, применяется не только для их защиты от окисления, но иногда и для использования

атмосферного давления в качестве силы, осуществляющей принудительную пропитку упрочнителя расплавленным металлом.

Получение композиционных материалов методом пропитки в вакууме может производиться в промышленных вакуумных плавильных печах с нагревательными устройствами различного типа (индукционные, высокочастотные, электронно-лучевые и др.), оснащенных устройствами для заливки форм в вакууме. Применяются для этой цели и специально сконструированные установки. Схема одной из таких установок показана на рис. 8.26.

Установка представляет собой кварцевую трубу 7, в которой на керамической опоре 8 помещен графитовый цилиндр. Верхняя часть этого цилиндра 4 служит тиглем для приготовления расплава матрицы, а нижняя часть 9 – формой для укладки упрочняющих волокон. Нижняя часть тигля сообщается с формой цилиндрическим каналом, расширяющимся вблизи верхней части формы и играющим после заливки роль прибыльной части. До заливки отверстие в дне тигля закрыто графитовой пробкой 5, выполненной в виде штока постоянного диаметра с утолщением в верхней части, опирающимся на стальное кольцо 14, через которое пропущен шток. При помощи этого кольца и постоянного магнита 1 шток может подниматься и открывать отверстие в дне тигля. Верхняя и нижняя части кварцевой трубы заглушены резиновыми пробками 2. Нагрев тигля и расплавление металла осуществляются индуктором 12, расположенным поверх кварцевой трубы на уровне графитового тигля. Верхняя и нижняя резиновые пробки изолируются от горячего тигля специальными теплозащитными экранами 6. Технологический процесс получения композиционного материала описан ниже.

Форма с уложенным в ней упрочнителем вставляется в нижнюю часть графитового цилиндра. В тигель, отверстие в дне которого закрыто графитовым штоком, заливается металл матрицы. Система вакуумируется, и включается нагрев. После расплавления матрицы шток поднимается при помощи магнита, и расплавленный металл заполняет форму. Для обеспечения минимального количества воздуха в установке в процессе вакуумирования ее несколько раз промывают аргоном.

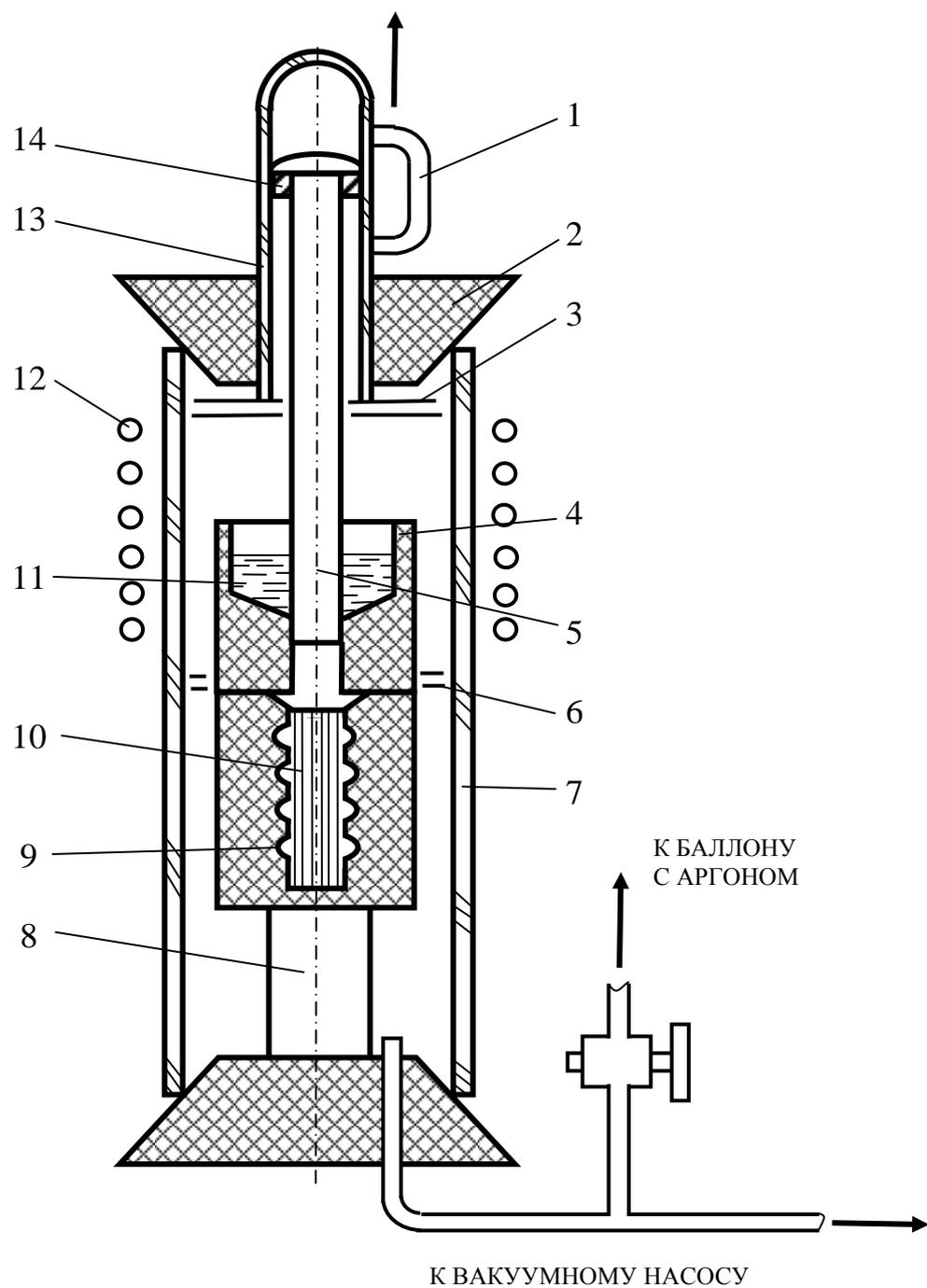


Рис. 8.26. Схема установки для пропитки волокон жидким металлом в вакууме:

- 1 – магнит; 2 – резиновая пробка; 3 – тепловой экран; 4 – графитовый тигель;
- 5 – графитовый шток; 6 – тепловой экран; 7 – кварцевая труба;
- 8 – керамическая опора; 9 – графитовая форма; 10 – волокна; 11 – расплав матрицы;
- 12 – индуктор; 13 – кварцевый колпак; 14 – стальное кольцо

Методом пропитки в вакууме получают композиционные материалы на основе алюминия и магния, упрочненные борными волокнами и нитевидными кристаллами; на основе никелевых сплавов, армированные вольфрамовой проволокой и др.

**8.7.2. Методы твердофазного совмещения металлической матрицы и волокон.** В методах твердофазного совмещения компонентов матричный материал используется в виде листов, фольги, проволоки или порошка. Технологический процесс заключается в получении компактного материала одним из следующих приемов: диффузионной сваркой пакета под давлением, деформационной обработкой под давлением, сваркой взрывом, прессованием и спеканием (порошковой металлургией) и др.

**8.7.2.1. Диффузионная сварка под давлением.** Диффузионная сварка является промышленным способом соединения различных однородных и разнородных металлов и сплавов. Процесс сварки происходит без расплавления основного металла в результате нагрева и сдавливания соединяемых деталей. В месте сварки деталей происходит диффузия одного металла в другой. Обычно при соединении деталей методом диффузионной сварки их поверхности тщательно зачищают и подгоняют, а сам процесс сварки осуществляют в вакууме. Основой процесса диффузионной сварки является взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга вследствие теплового движения атомов вещества. Для получения сцепления физически чистых поверхностей в вакууме достаточно лишь их соприкосновение. Сварка происходит за счет наличия открытых атомных связей, образовавшихся в результате разрушения кристаллической решетки при механической обработке соприкасающихся поверхностей. Надежность соединения и равная прочность соединительной зоны с основным материалом достигаются лишь тогда, когда зона соединения расширяется и приобретает объемный характер. Чтобы осуществить диффузионную сварку поверхностей, необходимо создать некоторое сжимающее давление. Величина давления должна быть достаточной для того, чтобы поверхности сблизилась на расстояние, определяемое радиусом взаимодействия межатомных сил.

На качество соединения влияют следующие основные технологические параметры процесса: методы и качество подготовки соединяемых поверхностей; температура нагрева; давление на контактирующие поверхности; разрежение над соединяемыми поверхностями; время выдержки соединяемых деталей при температуре и давлении.

Для получения надежного соединения методом диффузионной сварки необходимо оптимальное сочетание всех указанных факторов, подбираемое экспериментально для каждой пары свариваемых материалов.

В качестве методов подготовки поверхностей свариваемых деталей могут применяться различные методы механической обработки: точение, шлифование, полирование; различные способы удаления с поверхностей масел, пыли, жиров, краски, грязи, адсорбированных пленок: протирка спиртом, ацетоном, четыреххлористым углеродом, нагрев в вакууме; обработка травлением.

Температура нагрева, давление и время выдержки при сварке являются взаимосвязанными параметрами, и увеличение или уменьшение одного из них неизбежно вызывает необходимость соответственно уменьшения или увеличения другого параметра, если хотим получить кондиционное соединение без ухудшения свойств основного материала.

Существенное влияние на качество диффузионной сварки оказывает степень разряжения над соединяемыми поверхностями. При нагреве в вакууме происходит интенсивная очистка поверхностей от органических загрязнений и окислов. Кроме того, из металла и в первую очередь из его поверхностных слоев выделяются газы. Этот процесс технологически очень полезен, так как приводит к залечиванию микропор и микрощелей, имеющих в металле, и повышению пластичности получаемых соединений.

#### *Особенности процесса диффузионной сварки применительно к изготовлению композиционных материалов*

Процесс диффузионной сварки под давлением является одним из наиболее часто применяемых методов изготовления металлических композиционных материалов. Однако этот процесс несколько отличается от процесса диффузионной сварки как метода соединения двух деталей из однородных или разнородных материалов по параметрам технологического процесса и по его аппаратурному оформлению.

В данном случае назначение процесса состоит в том, чтобы из нескольких разнородных по составу, форме и размерам элементов, составляющих матрицу и упрочнитель композиционного материала,

получить компактный материал. Иногда конечной целью процесса является изготовление из указанных элементов готовой детали.

Поскольку в состав композиционного материала обычно входят пластичная, малопрочная матрица и упрочнитель, обладающий, как правило, более высокой твердостью по сравнению с твердостью матрицы, то этот упрочнитель в процессе диффузионной сварки под давлением может разрушать окисные слои, покрывающие поверхность металлической матрицы, облегчая тем самым процесс диффузионной сварки. В связи с этим, если для процесса соединения двух деталей методом диффузионной сварки почти всегда необходимым условием является наличие вакуума над поверхностями соединяемых деталей, то для изготовления этим методом композиционных материалов или деталей из них наличие вакуума не всегда является необходимым, и процесс может проводиться в инертной, а иногда и в воздушной атмосфере. Следует отметить, что и в случае получения композиционных материалов методом диффузионной сварки под давлением наличие вакуума является фактором, интенсифицирующим процесс и улучшающим его качество.

Другим важным отличительным признаком этого процесса является то, что процесс получения композиционного материала обычно связан с пластическим течением матрицы, необходимым для заполнения пространства между элементами упрочнителя, происходящим обычно в замкнутом объеме и имеющем небольшую величину. При соединении деталей диффузионным методом пластическая деформация отсутствует.

Возможность изготовления методом диффузионной сварки различных полуфабрикатов и деталей из композиционных материалов вызывает необходимость создания специального оборудования и оснастки; применение мощных прессов, автоклавов, изостатов и другого оборудования.

Необходимость пластической деформации в процессе изготовления композиционного материала связана со значительным повышением технологических параметров процесса – температуры, давления и времени выдержки при прессовании по сравнению с аналогичными параметрами процесса соединения диффузионной сварки двух деталей.

В целом, однако, технологическому процессу изготовления композиционных материалов диффузионной сваркой под давлением присущи все основные показатели, характеризующие собственно процесс диффузионной сварки двух деталей, такие как подготовка соединяемых контактирующих поверхностей, нагрев соединяемых элементов, приложение к ним давления, необходимая выдержка при этих условиях и др.

### *Основные операции процесса диффузионной сварки*

Принципиальная схема изготовления этим методом композиционных материалов представлена на рис. 8.27. Основными операциями технологического процесса являются подготовка поверхности контактирующих материалов, изготовление предварительных заготовок, раскрой и сборка пакетов для прессования и прессование.

**Исходные материалы.** Матрицу в исходном состоянии чаще всего применяют в виде фольги металлов или сплавов. Иногда матрица может быть применена в виде слоев, нанесенных на упрочнитель тем или иным методом. В качестве упрочнителей применяют нитевидные кристаллы, волокна и проволоки из различных металлов или сплавов. Нитевидные кристаллы, волокна и проволоки могут быть применены как в виде отдельных кристаллов, моноволокон и проволок, так и в виде различного вида полуфабрикатов: матов, жгутов, тканей, сеток и др. Кроме того, упрочнители часто применяют в виде своеобразного предварительного композиционного материала, представляющего собой отдельные кристаллы, волокна или проволоки, заключенные в матрицу. При этом материал матрицы может наноситься на упрочнитель методами плазменного напыления, химического и электрохимического осаждения, осаждения из газовой фазы, протяжки волокна через расплав матрицы и др. Более подробно технология изготовления таких предварительных композиционных материалов описана в соответствующих разделах по технологии изготовления композиционных материалов.

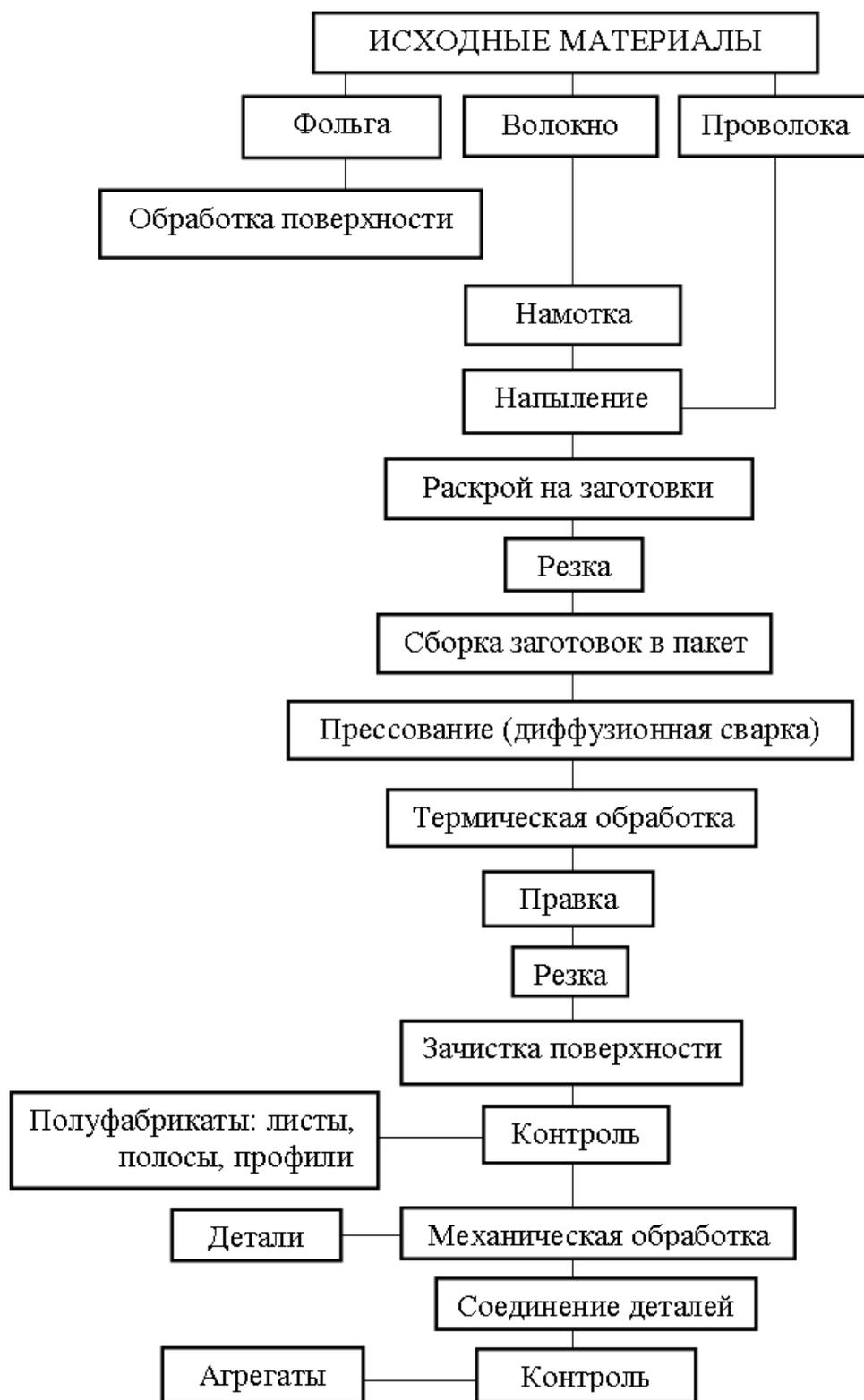


Рис. 8.27. Технологическая схема производства полуфабрикатов и изделий из бoroалюминиевого композиционного материала ВКА-1

**Подготовка поверхности контактирующих материалов.** В основе технологического процесса получения композиционных материалов методом диффузионной сварки под давлением лежат процессы диффузии элементов, входящих в состав матрицы и упрочнителя, а диффузионные процессы, способствующие образованию компактного материала из компонентов матрицы и упрочнителя, протекают, главным образом по границам раздела матрица-уплотнитель и матрица-матрица, т.е. практически по поверхностям матрицы и упрочнителя. В связи с этим, существенное влияние на качество процесса и качество полученного методом диффузионной сварки композиционного материала оказывает состояние контактирующих поверхностей матрицы и упрочнителя.

Волокна, проволоки и нитевидные кристаллы, применяемые в качестве упрочнителей, перед процессом диффузионной сварки чаще всего подвергают поверхностной очистке химическими методами. Это связано с наличием на поверхности упрочнителей различного вида замасливателей, смазок, применяемых в процессе изготовления волокон и проволок, тонких слоев окислов и др. Такая очистка осуществляется в щелочных или кислотных травителях. С целью повышения прочности связи на границе раздела упрочнителя с матрицей на поверхность волокон и нитевидных кристаллов в некоторых случаях наносят покрытие из металла или соединений методами химического, электрохимического осаждения, осаждения из газовой фазы и др.

Как было отмечено выше, при изготовлении композиционных материалов методом диффузионной сварки под давлением матрица применяется чаще всего в виде фольги. Поверхность фольги из металлов и сплавов может быть загрязнена различными смазками, применяемыми в процессе ее изготовления, может быть покрыта слоем окисла, затрудняющим протекание диффузионных процессов. Наличие такой плотной пленки окисла особенно характерно для фольги из алюминия и его сплавов. К основным методам подготовки поверхности материала матрицы относятся промывка, обезжиривание, механическая очистка, химическая обработка.

Промывку применяют главным образом для очистки поверхности фольги от различного вида поверхностных загрязнений и осу-

ществляют в спирте, горячей и холодной воде, в различных моющих средствах. Обезжиривание применяют в тех случаях, когда поверхность фольги загрязнена маслами, чаще всего входящими в состав смазок, применяемых при прокатке. Обезжиривание производится в бензине, ацетоне, четыреххлористом углероде, дихлорэтане и в специальных растворителях, в состав которых входят обычно перечисленные выше вещества.

Механическая обработка является более радикальным средством очистки поверхности фольги, поскольку этот метод связан с удалением части поверхностного слоя на небольшую глубину. Механическая обработка позволяет удалить не только вещества, загрязняющие поверхность фольги, но и удалить слой окисла, обнажить внутренние, не окисленные и поэтому более активные в отношении прохождения диффузионных процессов, слои матрицы. Механическую обработку можно производить при помощи шлифовальной бумаги, металлических щеток, абразивного инструмента. Для удаления частиц металла и абразива, оставшихся на поверхности фольги после такой обработки, обычно применяют промывку.

Химическая обработка также сопровождается удалением на некоторую толщину поверхностных слоев материала матрицы. Обычно эта обработка включает операции обезжиривания, щелочное или кислотное травление, и иногда сочетание того и другого, пассивирование поверхности. После каждой из перечисленных операций обязательно применяется промывка. Реактивы для химической обработки подбирают индивидуально для каждой матрицы. Технологические параметры процесса химической обработки, включающие концентрацию травителей, температуру и время обработки, определяют экспериментально из условий обеспечения необходимого качества поверхностных слоев, сохранения этого качества в течение некоторого времени (включающего промежуток между операциями химической обработки и диффузионной сварки) и съема поверхностных слоев матрицы заданной толщины. Последнее условие связано с тем, что в качестве матрицы обычно применяют фольги малой толщины (0,007- 0,1 мм), и удаление с поверхности слоя в несколько микрон в дальнейшем может значительно изменить соотношение матрицы и упрочнителя в композиционном материале.

**Изготовление предварительных заготовок.** Изготовление композиционного материала методом диффузионной сварки под давлением осуществляется в результате прессования при определенной температуре и давлении пакета, состоящего из чередующихся слоев матрицы и упрочнителя. В связи с этим одной из основных операций, предшествующих процессу прессования, является изготовление слоев упрочнителя (предварительных заготовок упрочнителя). Назначение этой операции – уложить упрочняющие волокна, проволоки или нитевидные кристаллы определенным образом и закрепить их так, чтобы иметь в дальнейшем возможность обращения с ними как с компактным материалом.

Наиболее простым путем получения предварительных заготовок является изготовление из материалов-упрочнителей тканей и сеток различного плетения. Однако изготовление такого рода полуфабрикатов возможно главным образом из металлических волокон и волокон типа стекловолокна и графита, т.е. волокон, которые можно подвергать ткацким методам переработки и плетению. Изготовление тканей и сеток из высокопрочных и высокомодульных волокон, обладающих повышенной хрупкостью, типа волокон бора или карбида кремния, если и возможно, то связано с большими трудностями.

При изготовлении композиционных материалов различными методами значительный объем применяемых предварительных заготовок составляют заготовки, полученные из моноволокон. Одним из методов получения таких заготовок является метод намотки волокна на оправку и закрепления его либо нанесением на волокно слоя матрицы, либо проклеиванием его легко выгорающими и не загрязняющими матрицу клеями. Такая технология позволяет зафиксировать волокно в положении, достигнутом намоткой на прецизионных намоточных машинах, и, в случае нанесения слоя матрицы, связать вместе волокна и матрицу.

В качестве примера получения предварительной заготовки методом намотки и нанесения на поверхность волокон слоя матрицы плазменным напылением можно привести метод изготовления ленты из композиционного материала на основе алюминия, упрочненного борными волокнами.

Разработанный процесс позволяет изготавливать композиционные материалы из монослойных лент, полученных намоткой с последующим плазменным напылением. Этот метод дает возможность изготавливать в одинаковых условиях каждый слой (т.е. обладает хорошей воспроизводимостью), позволяет получать композиционный материал с хорошей равномерностью распределения волокон в матрице.

Намотка волокна производится на модифицированном универсальном станке с использованием ходового винта для точной укладки борного волокна. Волокно наматывается на металлическую оправку с обернутой вокруг нее алюминиевой фольгой. Конструкция такой оправки достаточно подробно описана и показана на рис. 8.28. Оправка цилиндрическая, разрезная, состоит из двух полуцилиндров 1, скрепленных с одной стороны между собой шарниром 2. Обе половины оправки могут раздвигаться до необходимой степени при помощи двух пружин 3 и закрепляться запорной скобой 4. В вырез в запорной скобе входит винт, закрепляющий оправку в положение подпружиненного. Подпружиненное состояние оправки позволяет скомпенсировать разницу в термическом расширении между волокном и подложкой из фольги при нагреве их в процессе плазменного напыления и обеспечивает легкий съем напыленной ленты с оправки. Схематически процесс намотки показан на рис. 8.29, а процесс плазменного напыления – на рис. 8.30.

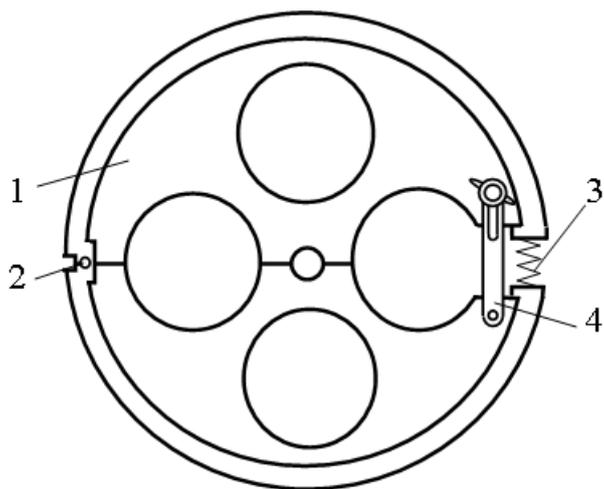


Рис. 8.28. Схема оправки для намотки борного волокна:  
1 – полуцилиндр; 2 – шарнир; 3 – пружины; 4 – запорная скоба

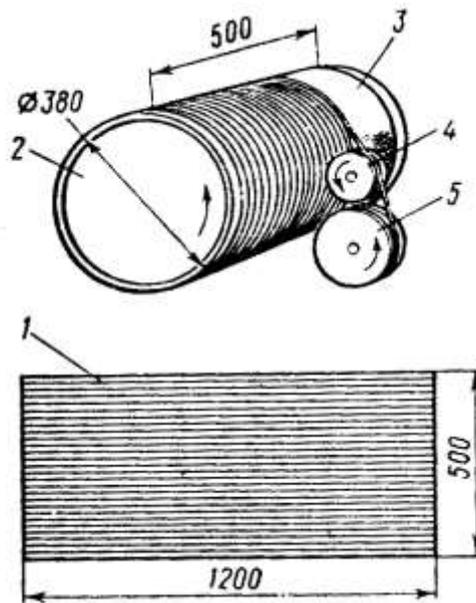


Рис. 8.29. Схема процесса намотки волокна на оправку:  
 1 – заготовка; 2 – барабан; 3 – фольга; 4 – ролик направляющий; 5 – бобина с волокном

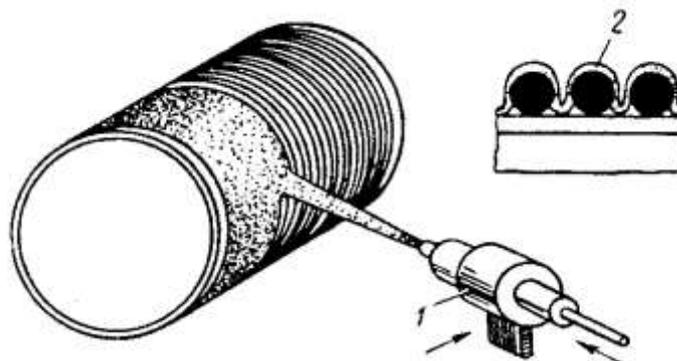


Рис. 8.30. Схема процесса плазменного напыления:  
 1 – горелка; 2 – напыленный слой

Преимуществами процесса получения композиционных материалов с использованием таких лент является простота и дешевизна процесса, возможность точной и размерной укладки волокна и распределение его в готовом материале, так как оно остается на оправке до тех пор, пока не будет закреплено плазменным напылением, достижение хорошей связи между матрицей и волокном без деградации волокна. Использование монослойных лент в качестве промежуточного продукта позволяет также изготавливать гнутые полуфабрикаты. Предварительные заготовки, получаемые таким методом, могут достигать довольно больших размеров в зависимости от диаметра оправки.

Применение процесса плазменного напыления на поверхность намотанных на оправку волокон матрицы преследует, таким образом, две цели: закрепление уложенного волокна и предварительное распределение его в матрице. Наряду с этим процессом волокно на оправке может быть закреплено проклеиванием. При этом клей, разумеется, не входит в состав матрицы, поэтому применяют такие клеящие вещества, преимущественно органические, которые при последующем прессовании в процессе нагрева превращаются в летучие соединения, испаряются и не оставляют в матрице твердых составляющих. При изготовлении изделий из композиционного материала на основе титана, упрочненного волокнами борсик, применяются предварительные заготовки из титана и волокна борсик, закрепленного клеем на основе полистирола. Для производства листов из боралюминиевого композиционного материала применяют предварительные заготовки из однонаправленного борного волокна, закрепленного акриловой смолой.

Преимущество процесса закрепления волокон проклеиванием по сравнению с плазменным напылением состоит в том, что при проклеивании свойства волокна не меняются, в то время как при плазменном напылении из-за контакта с расплавленным металлом, наносимым на поверхность волокон, последние в большей или меньшей степени разупрочняются. Недостатком проклеивания является вероятность загрязнения материала посторонними примесями из-за неполного выгорания клея. С целью уменьшения количества клея проклеивание волокон может осуществляться не по всей поверхности волокон, а отдельными участками. При этом расстояние между проклеенными участками не должно быть очень велико, чтобы исключить смещение отдельных волокон в процессе дальнейшей обработки заготовок.

Как уже было отмечено выше, из волокон, обладающих достаточно высокой пластичностью, таких как стальная проволока, проволока из тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена и др., предварительные заготовки могут быть изготовлены в виде сеток различного плетения. Из волокон, способных подвергаться подобной переработке, таких, например, как волокна графита, окиси кремния и др., предварительные заготовки получают в виде тканей.

Ранее говорилось о методе изготовления ленты из борного волокна, покрытого нитридом бора и пропитанного расплавленным

алюминием. Такая лента в дальнейшем может применяться в качестве предварительной заготовки при получении композиционного материала методом диффузионной сварки. К такого же рода полуфабрикатам относятся одиночные волокна или пучки из нескольких волокон, полученные пропиткой расплавленным матричным металлом. В качестве примера таких заготовок можно привести кварцевые волокна и волокна бора, пропитанные алюминием.

Для изготовления заготовок в виде отдельных волокон или пучков волокон, покрытых слоем металла матрицы, применяют также процессы химического и электрохимического осаждения материала матрицы на поверхность волокон. Таким методом, например, получали предварительные заготовки из углеродного волокна, покрытого никелем, алюминием, медью, из вольфрамовой проволоки, покрытой медью и др.

**Раскрой и сборка пакетов для прессования.** Наиболее распространенным видом предварительных заготовок, применяемых для изготовления композиционных материалов методом диффузионной сварки, являются плоские элементы, состоящие из одного слоя упрочнителя, закрепленного тем или иным способом. В связи с этим в дальнейшем операции раскроя заготовок и сборки их в пакеты рассмотрим на примере предварительных заготовок, полученных методом намотки с последующим закреплением волокон плазменным напылением или проклеиванием. Схематически эти операции представлены на рис. 8.31. Из монослойных заготовок вырезают ножницами, гильотинными ножницами, вырубают в специальных штампах либо получают другими методами механической обработки элементы более или менее сложной конфигурации, являющиеся слоями – сечениями изделия. Число этих заготовок определяется толщиной готового изделия, количеством упрочнителя и матрицы в предварительных заготовках, если упрочнитель связан матрицей, либо количеством упрочнителя и толщиной фольги матрицы, если упрочнитель связан клеем. На рис. 8.31 показан типовой раскрой двух видов изделий; плоского полуфабриката в виде листа и изделия более сложной формы – лопатки двигателя. Поскольку наряду с одноосноармированным композиционным материалом в технике применяют изделия из материала, в котором имеется волокно, ориентированное, в соответствии с возникающими в этом изделии в процессе его работы напряжениями, в различных направлениях, при раскрое необходимо учитывать и

направление укладки упрочняющих волокон. Различные схемы ориентации волокон в набранном из заготовок пакете показаны на рис. 8.32.

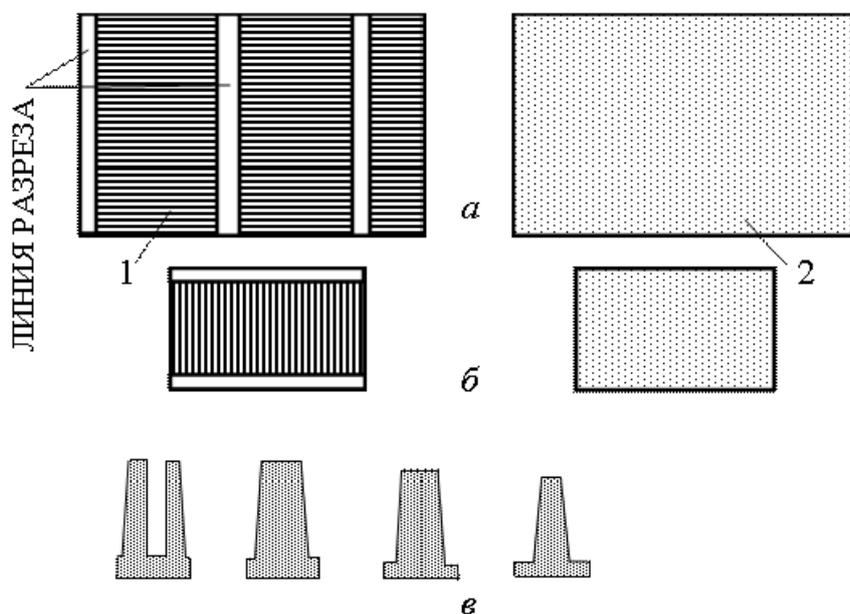


Рис. 8.31. Схема операций раскроя заготовок:  
 а – заготовки; 1 – заготовка с проклейкой; 2 – заготовка с напылением;  
 б – раскрой на карточки; в – раскрой заготовок для лопаток (по шаблонам)

**Прессование.** Основной операцией процесса изготовления композиционных материалов методом диффузионной сварки под давлением является прессование. Именно в процессе этой операции происходит соединение отдельных элементов предварительных заготовок в компактный материал (формирование изделий). В отличие от прессования как метода обработки давлением металлов и сплавов, заключающегося в выдавливании металла из замкнутой полости через отверстие в матрице и связанного с большими степенями деформации обрабатываемого материала, данный процесс по своему существу ближе к процессу прессования порошковых материалов, применяемому в порошковой металлургии. Прессование заготовок композиционных материалов в большинстве случаев осуществляется в замкнутом объеме (в пресс-формах, состоящих из матрицы и двух пуансов типа пресс-форм, применяемых для получения изделий из металлических порошков) и с незначительной пластической деформацией материала матрицы, необходимой только для заполнения пространства между волокнами упрочнителя и максимального уплотнения самой матрицы. При этом, как и в процессе горячего прессования порошков, наряду с пластической деформацией матрицы, на границе раздела

между слоями или частицами матрицы, т.е. границе матрица-матрица, а также на границе матрица-волокно протекают диффузионные процессы, обеспечивающие прочную связь на этих границах и, в конечном счете, необходимую прочность композиционного материала.

Основными технологическими параметрами прессования композиционных материалов являются давление прессования, температура, время выдержки и среда.

По технологическому оформлению можно выделить четыре разновидности процесса прессования: прессование в замкнутых пресс-формах и между обогреваемыми плитами; ступенчатое прессование; изостатическое, или автоклавное прессование; динамическое горячее прессование.

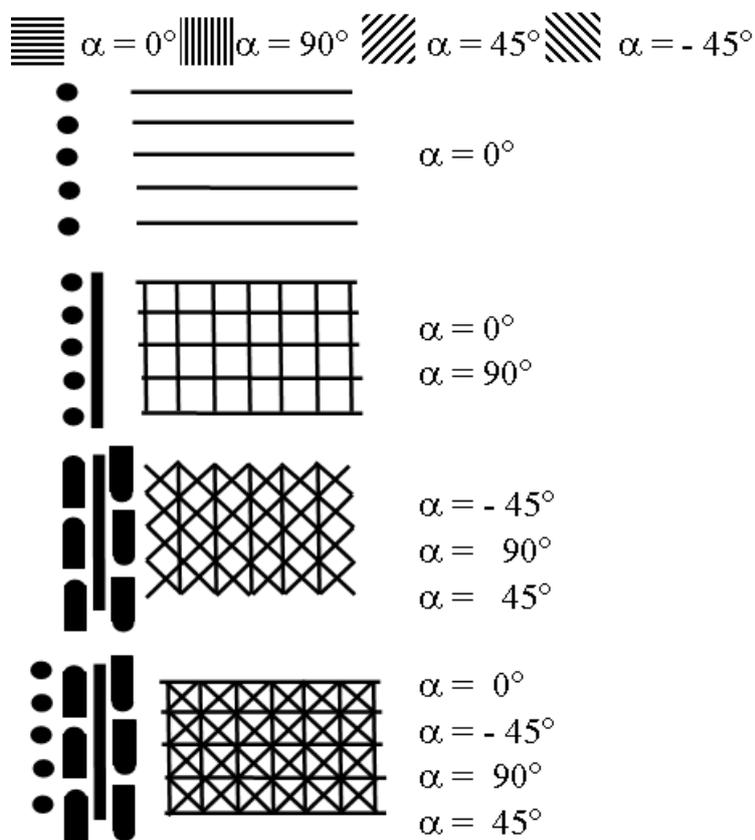


Рис. 8.32. Схема различных вариантов укладки борных волокон

**Прессование в пресс-формах и между обогреваемыми плитами.** Этот вид прессования композиционных материалов может осуществляться на обычных гидравлических прессах различной мощности, применяемых для обработки металлов давлением, в порошковой металлургии, в производстве пластмасс. Необходимым условием, обеспечивающим пригодность пресса для процесса диффу-

зионной сварки, является возможность поддержания заданного давления на нем в течение длительного времени. Прессование изделий из композиционных материалов на таких прессах производится в специальных пресс-формах, нагреваемых тем или иным способом до нужной температуры. Диффузионная сварка осуществляется на воздухе, в вакууме и в защитной атмосфере. В зависимости от этого пресс, на котором ее проводят, может быть оснащен камерой для создания вакуума или необходимой атмосферой.

В качестве примера одной из таких установок, применяемой для получения методом диффузионной сварки композиционных материалов на основе нихрома, упрочненного волокнами молибдена и вольфрама, можно привести установку, показанную на рис. 8.33. Установка представляет собой гидравлический пресс с вакуумной камерой. Нижняя часть разъемного корпуса камеры через сильфон связана со штоком пресса, на который устанавливается пакет из заготовок композиционного материала. В верхнюю часть корпуса вмонтирован индуктор. В рабочем состоянии, т.е. при сомкнутых верхней и нижней частях корпуса, пакет располагается внутри индуктора. Для предотвращения нагрева деталей пресса и корпуса камеры пакет изолирован от штока пресса и упора верхней части корпуса изоляционными огнеупорными плитами из хромомagnesита. Для обеспечения равномерного нагрева пакета между ним и огнеупорными плитами устанавливали более массивные, по сравнению с пакетом, молибденовые пластины, в результате чего основная часть магнитного потока, создаваемого индуктором, поглощалась этими плитами. Для предотвращения схватывания композиционного материала с молибденовыми пластинами на их поверхность предварительно наносили тонкий слой суспензии окиси алюминия в спирте. Прессование проводили в вакууме  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  мм рт. ст. Схематически процесс прессования листов на прессе между обогреваемыми плитами показан на рис. 8.34.

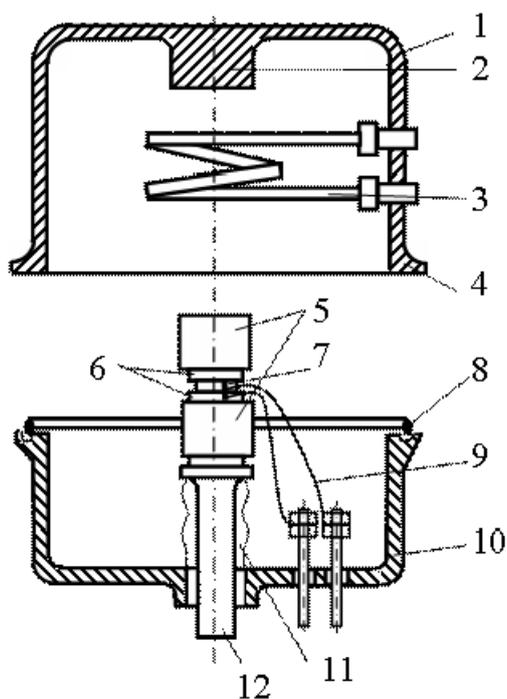


Рис. 8.33. Схема установки для горячего прессования:

1 – корпус камеры; 2 – упор; 3 – индуктор; 4 – плоскость разъема камеры;  
 5 – огнеупорные плиты; 6 – пластины; 7 – прессуемый пакет; 8 – уплотнительная резина;  
 9 – термопара; 10 – стол; 11 – сильфон; 12 – шток прессы

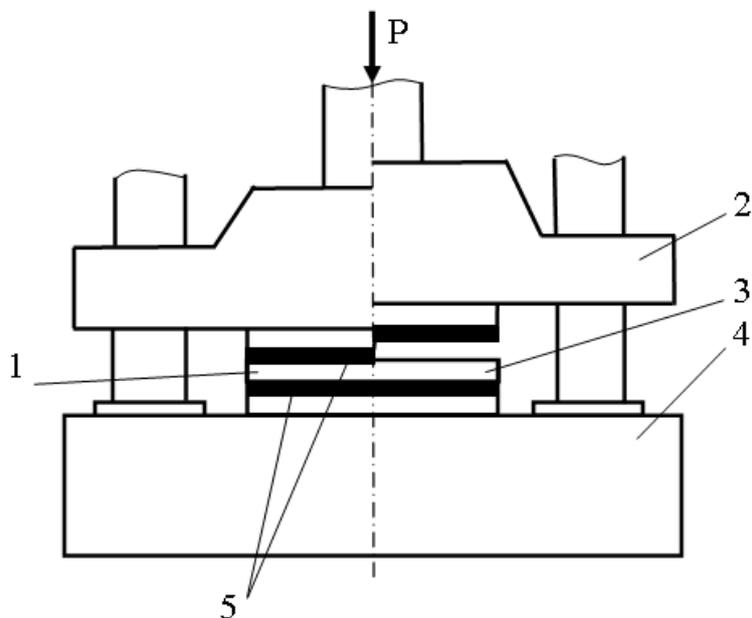


Рис. 8.34. Схема изготовления листов из боралюминия:

1 – лист; 2 – верхняя траверса; 3 – пакет; 4 – нижняя траверса; 5 – обогреваемые плиты

**Ступенчатое прессование.** Разновидностью процесса прессова-

ния между обогреваемыми плитами пресса является ступенчатое прессование. Особенностью этого процесса является возможность получения полуфабрикатов в виде листов, полос, лент, профилей и др. большой длины из композиционных материалов на прессах с небольшими размерами прессующих плит. При этом процессе прессования пакета из заготовок композиционного материала большой длины осуществляется периодически: вначале подпрессовывается участок, ближайший к одному из концов пакета, затем пакет передвигается между плитами пресса таким образом, что непосредственно между плитами оказывается часть ранее пропрессованного участка и еще не подвергавшаяся прессованию часть. Таким образом постепенно прорабатывается весь пакет. При ступенчатом прессовании только ширина изделия определяется шириной прессующих плит, длина же его практически не ограничена. Схема процесса ступенчатого прессования показана на рис. 8.35. Очевидна перспективность получения этим методом листов из композиционного материала алюминий-бор шириной 1,2 м и длиной до 9 м. Недостатком ступенчатого прессования является сравнительно невысокая производительность процесса, связанная с необходимостью выдержки каждого из прессуемых участков пакета при заданном давлении и температуре в течение промежутка времени, нужного для пластической деформации и процессов диффузии.

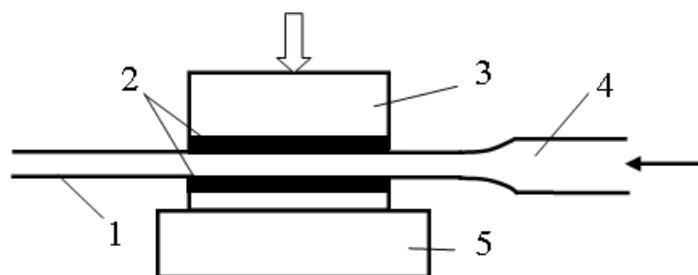


Рис. 8.35. Схема ступенчатого прессования длинномерных полуфабрикатов (полос, профилей и т.д.) из боралюминия:  
1 – полоса; 2 – обогреваемые плиты;  
3 – верхняя траверса; 4 – пакет; 5 – нижняя траверса

**Изостатическое, или автоклавное прессование.** Процесс изостатического горячего прессования известен сравнительно недавно.

Процесс изостатического горячего прессования является процессом, сочетающим в себе воздействие на тело температуры и давления газа. Обычно тело, на которое оказывается воздействие, заключают в вакуумированный герметичный контейнер, способный деформироваться при температуре процесса. Установка для изостатического горячего прессования чаще всего состоит из трех основных агрегатов: сосуда высокого давления, или автоклава, системы для создания давления и системы обеспечения температуры.

Сосуд высокого давления может быть выполнен либо в виде оболочки, подкрепленной намотанной на нее проволокой, либо толстостенным, монолитным. Давление в установках создается компрессорами. В качестве рабочего газа используют гелий, аргон, азот или воздух. Схема изготовления профиля из композиционного материала в изостате представлена на рис. 8.36.

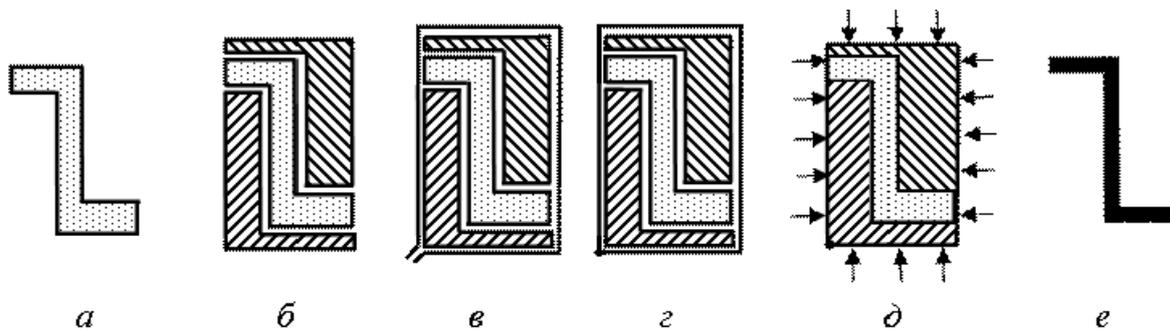


Рис. 8.36. Схема изготовления профиля из композиционного материала в изостате:

- а* – заготовка; *б* – сборка заготовки с формирующими элементами;
- в* – заключение сборки в пластичный металлический контейнер и вакуумирование контейнера; *г* – заваривание контейнера;
- д* – нагрев и подача давления; *е* – готовый профиль

На рис. 8.37 представлены виды профилей из композиционных материалов на основе титана и алюминия, упрочненных борными волокнами и стальной проволокой, а также схемы приспособлений, необходимых для изготовления указанных на рисунке профилей.

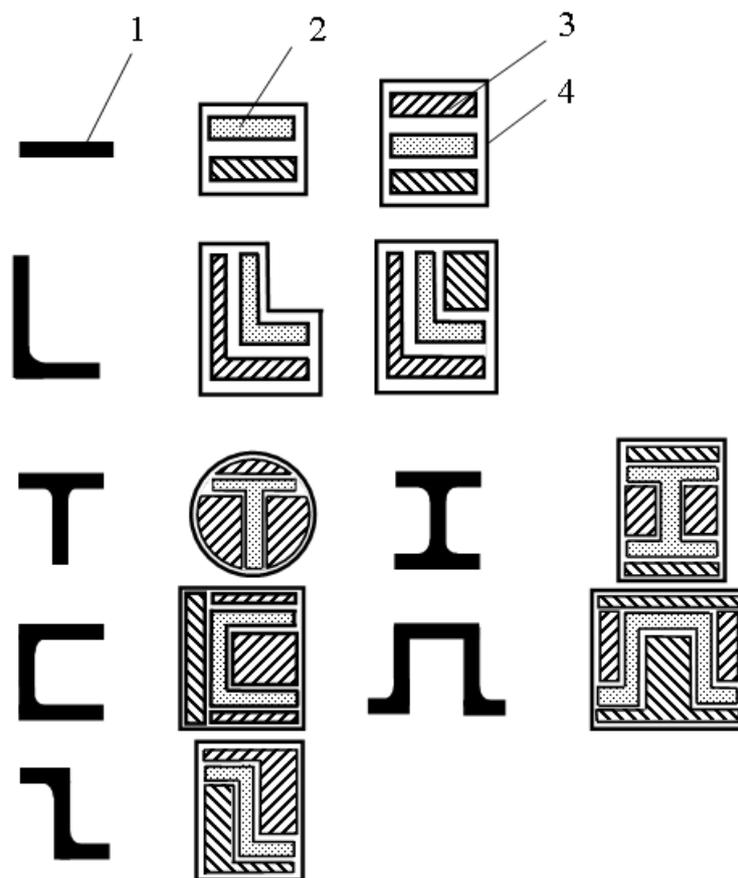


Рис. 8.37. Возможные виды полуфабрикатов и схемы их получения в изостате:

1 – готовый полуфабрикат; 2 – заготовка; 3 - формирующий элемент; 4 – контейнер

Вышеперечисленные технологические процессы не исчерпывают всех методов изготовления изделий из композиционных материалов. Дальнейшее расширение применения композиционных материалов в различных областях техники востребует совершенствование уже имеющихся и развитие новых технологических процессов изготовления изделий из композиционных материалов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные этапы включает технологический процесс изготовления изделий из КМ?
2. В чем заключается подготовка связующего и армирующего материалов к совмещению?
3. В чем состоит жидкофазное совмещение связующего и армирующего материалов?
4. Какие виды пропиток Вам известны?

5. В чем состоят основные достоинства термопластичных связующих, используемых при создании изделий из КМ?
6. Укажите основные отличия технологии формообразования изделий из КМ на основе термопластичных матриц от технологии изготовления изделий из реактопластов.
7. В чем заключается аппретирование волокнистых армирующих материалов?
8. Укажите основные этапы твердофазного совмещения компонентов КМ.
9. Что такое гелькоат (смоляной) слой и на каком этапе технологического процесса он используется?
10. Назовите альтернативные технологические способы изготовления обтекателя головной части ракеты.

## Список литература

1. *Аболиньш, Д. С.* Тензор податливости однонаправленно армированного упругого материала // *Механика полимеров*. 1965, № 4. – С. 47 – 52.
2. *Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые спеченные и литейные сплавы / под ред. Ф. И. Квасова и И. Н. Фридляндера.* М.: *Металлургия*, 1984. 528 с.
3. *Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / под ред. В. И. Елагина, В. А. Ливанова.* М.: *Металлургия*, 1984. - 408 с.
4. А.С. 1440973 СССР, МКИ<sup>4</sup> Д03 Д/ 1 / 00, 15 / 00. Тканый препрег. Г. С. Головкин, В. П. Дмитриенко, Н. В. Салиенко и др. // *Бюл. № 44.* Оpubл. 30.11.1988.
5. *Армированные пластики / В. Н. Бунаков, Г. С. Головкин, Г. П. Машинская и др./ под ред. Г. С. Головкина, В. И. Семенова.* М.: *Изд-во МАИ*, 1997. 404 с.
6. *Бор: получение, структура, свойства.* М.: *Наука*, 1974. 266 с.
7. *Буланов, И. М., Воробей, В. В.* Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по спец. «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов». М.: *Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 1998. 516 с.
8. *Бунаков, В. А., Головкин, Г. С., Машинская, Г. П. и др.* Армированные пластики / под ред. Г. С. Головкина, В. И. Семенова. М.: *Изд-во МАИ*, 1997. 404 с.
9. *Биргер, И. А.* Круглые пластинки и оболочки вращения. М.: *Оборонгиз*, 1961. 366 с.
10. *Ванин, Г. А.* Микромеханика композиционных материалов. Киев: *Наукова думка*, 1985. 302 с.
11. *Васильев, В. В.* Механика конструкций из композиционных материалов. М.: *Машиностроение*, 1988. 272 с.
12. *Васильев, В. В.* Расчет и проектирование балок и стержней из композиционных материалов. М.: *Машиностроение*, 1989. 40 с.
13. *Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. / М.: Наука*, 1976. 214 с.
14. *Волоконная технология переработки термопластичных композиционных материалов / Г. С. Головкин, В. А. Гончаренко,*

- В. П. Дмитриенко и др./ под ред. Г. С. Головкина. М.: Изд-во МАИ, 1993. 232 с.
15. *Воробей, В. В., Сироткин, О. С.* Соединения конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1985. 166 с.
  16. *Головкин, Г. С., Гончаренко, В. А., Дмитриенко, В. П. и др.* Волоконная технология переработки термопластичных композиционных материалов / под ред. Г. С. Головкина. М.: Изд-во МАИ, 1993. 232 с.
  17. *Гуняев, Г. М.* Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
  18. *Калиничев, В. А., Макаров, М. С.* Намотанные стеклопластики. М.: Химия, 1986. 272 с.
  19. *Калинчев, Э. Л., Саковцева, М. Б.* Свойства и переработка термопластов: справочное пособие. Л.: Химия, 1983. 288 с.
  20. Композиционные материалы: Справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др./ под общей ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1992. 512 с.
  21. Композиционные материалы / под ред. А. Н. Манохина. М.: Наука, 1981. 305 с.
  22. Композиционные материалы. В 8 т. / пер. с англ./ под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т.5: Разрушение и усталость. / под ред. Л. Браутмана. М.: Мир, 1978. 504 с.
  23. Композиционные материалы. В 8 т./ пер. с англ./ под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т.1: Поверхности раздела в металлических композитах. / под ред. А. Меткалфа. М.: Мир, 1978. 240с.
  24. Композиционные материалы. В 8 т./ пер. с англ./ под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т.6: Поверхности раздела в полимерных композитах. / под ред. Э. Плюдемана. М.: 1978. 294 с.
  25. *Кудрявцев, Г. И., Шейн, Г. И.* Успехи в области получения и применения высокопрочных синтетических волокон // Химические волокна. 1978. № 2. С. 5 - 15.
  26. *Лехницкий, С. Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
  27. Магниево-алюминиевые сплавы. В 2 т. / под ред. М. Б. Альтмана и др. М.: Металлургия, 1978. Т1. 238 с. - Т2. 296 с.
  28. *Малмейстер, А. К., Тамуж, В. П., Тетерс, Г. А.* Соппротивление жестких полимерных материалов. Рига: «Зинатне», 1972. 500 с.

29. Наполнитель для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие / под ред. Г. С. Каца и Д. В. Милевски. М.: Химия, 1981. 672 с.
30. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов: учеб. пособие / Васильев В. В., Добряков А. А., Дудченко А. А. и др. М.: Изд-во МАИ, 1985. 218 с.
31. *Образцов, И. Ф., Васильев, В. В., Бунаков, В. А.* Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
32. *Перепелкин, К. Е.* Структура и свойства волокон. М.: Химия, 1985. 324 с.
33. Пластики и эласты. Классификация конструкционных полимерных материалов и назначение компонент, входящих в их состав: учеб. пособие / Е. Б. Тростянская, Ю. А. Михайлин, М. И. Степанова. М.: Изд-во МАТИ, 1991. 85 с.
34. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / под ред. Е. Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. 304 с.
35. Практикум по полимерному материаловедению / под ред. П. Г. Бабаевского. М.: Химия, 1980. 297 с.
36. Производство стеклянных волокон и тканей / под ред. М. Д. Ходаковского. М.: Химия, 1973. 312 с.
37. *Первушин, Ю. С., Жернаков, В. С.* Проектирование и прогнозирование механических свойств однонаправленного слоя из композиционного материала: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2002. 127 с.
38. *Работнов, Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
39. Связующее на основе эпоксидных смол: учеб. пособие / Е. Б. Тростянская, Ю. А. Михайлин, С. Г. Кулик, М. И. Степанова. М.: Изд-во МАТИ, 1990. 65 с.
40. *Скудра, А. М., Булавс, Ф. Я.* Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 213 с.
41. *Скудра, А. М., Булавс, Ф. Я.* Структурная теория армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 192 с.
42. *Скудра, А. М., Булавс, Ф. Я., Роуенс, К. А.* Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1971. 252 с.

43. Соппротивление жестких полимерных материалов / А. К. Малмейстер, В. Н. Тамуж, Г. А. Тетерс. Рига: Зинатне, 1972. 500с.
44. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн.1 / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. М.: Машиностроение, 1988. 448 с.
45. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 2 / под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. 584 с.
46. Структура и свойства композиционных материалов / К. И. Портной, С. Е. Салимбеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубаров. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
47. *Семин, М. И.* Расчет соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность. М.: ЛАТМЭС, 1997. 287 с.
48. Термо-, жаростойкие и негорючие волокна. М.: Химия, 1978. 423с.
49. Термоустойчивость пластиков конструкционного назначения / под ред. Е. Б. Тростянской. М.: Химия, 1980. 240 с.
50. Тканые конструкционные композиты: пер. с англ. / под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. М.: Мир, 1991. 432 с.
51. *Тимошенко, С. П.* Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1963. 444 с.
52. *Тендлер, В. М.* Исследование процессов пропитки при изготовлении изделий из стеклопластиков / Пластические массы, 1963. №10. С. 24 – 29.
53. Технология производства препрегов для полимерных композиционных материалов: учебное пособие / В. М. Виноградов, А. И. Горохович, В. А. Гречишкин и др. Уфа: УГАТУ, 1995. 92 с.
54. Требования к матрицам конструкционных полимерных композиционных материалов: учебное пособие / Ю. А. Михайлин, И. П. Мийченко, Ю. С. Первушин. Уфа: УГАТУ, 1996. 70 с.
55. *Хилл, Р.* Теория механических свойств волокнистых композиционных материалов // Механика / Сб. переводов. 1966. № 2. С. 131 - 149.
56. *Циплаков, О. Г.* Научные основы технологии композиционно-волокнистых материалов: Часть 1 / Пермское книжное изд., 1974. 316 с.

57. *Kalnin, I.L.* Evaluation of unidirectional glass – graphite fiber epoxy resin composites //Composite materials: Testing and design.- 2 ud conf. ASTM STP 497, Amer. Soc. Testing and Materials. 1972. P. 551-563.

Учебное издание

ПЕРВУШИН Юрий Сергеевич  
ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Редактор

Подписано в печать . Формат 60×84 1/6.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. 12,4. Усл. кр.-отт. 12,4. Уч.-изд.л. 12,3.  
Тираж 100 экз. Заказ № ...

**Ю. С. ПЕРВУШИН, В. С. ЖЕРНАКОВ**

**ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**УФА 2008**