

Министерство образования Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

А.А. БАТАЕВ, В.А. БАТАЕВ

# КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СТРОЕНИЕ, ПОЛУЧЕНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ

УЧЕБНИК



НОВОСИБИРСК  
2002

УДК 620.22-419.8(075.8)

Б 28

*Федеральная программа книгоиздания России*

Рецензенты: *В.Г. Атапин*, д-р техн. наук, проф.

*В.В. Муравьев*, д-р техн. наук, проф.

*В.А. Неронов*, д-р техн. наук, вед. науч. сотр. ИТПМ  
СО РАН

**Батаев А.А., Батаев В.А.**

Б 28 Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с. – (Серия «Учебники НГТУ»)

ISBN 5-7782-0315-2

Приведены классификация и особенности строения традиционных и современных композиционных материалов различного назначения. Особое внимание уделено металлическим и полимерным композитам, показаны достоинства и недостатки композиционных материалов, отражены их структура и механические свойства.

Учебник адресован студентам технических вузов, обучающимся по направлению «Материаловедение и технология новых материалов», а также инженерам-материаловедам, технологам и конструкторам.

УДК 620.22-419.8(075.8)

ISBN 5-7782-0315-2

© А.А. Батаев, В.А. Батаев, 2002 г.

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2002 г.

## ВВЕДЕНИЕ

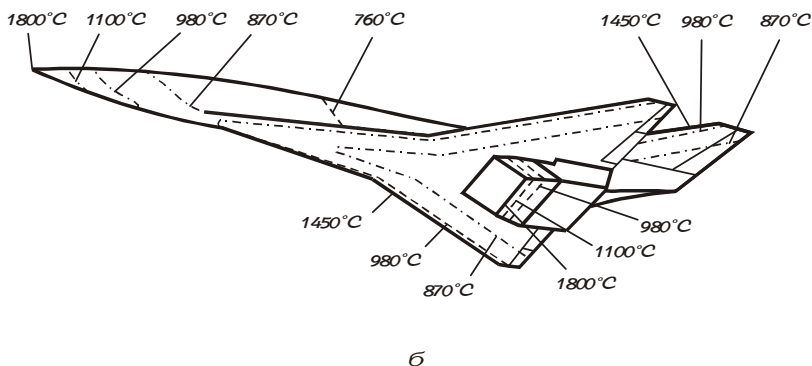
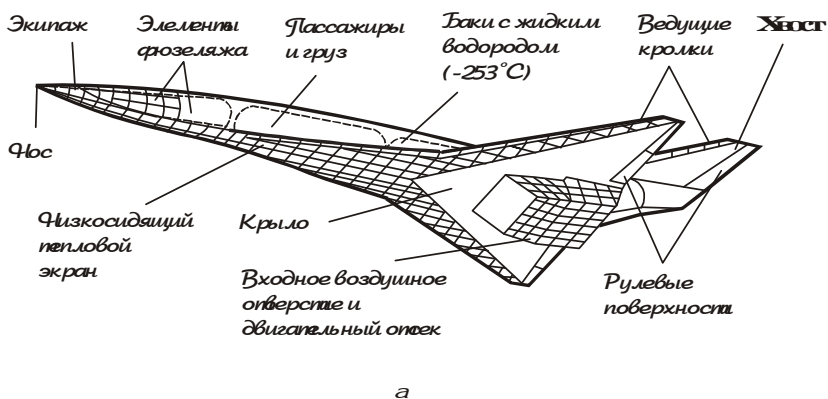
Основным классом материалов, удовлетворяющих таким жестким, часто противоречащим друг другу требованиям, как обеспечение минимальной массы конструкций, максимальной прочности, жесткости, надежности и долговечности при работе в тяжелых условиях нагружения, в том числе при высоких температурах и в агрессивных средах, являются композиты [1–27].

Современная наука о композиционных материалах обязана своему динамичному развитию в течение последних десятилетий, главным образом, применению композитов в ракетной технике и самолетостроении. Условия эксплуатации тяжело нагруженных узлов и элементов конструкций разрабатываемых самолетов и ракет не позволяют использовать для их изготовления традиционные металлические материалы и композиты. Каждая новая конструкция, обеспечивающая рост технических характеристик, как правило, требует разработки новых композиционных материалов.

В качестве примера можно привести необходимость решения проблем, связанных с реализацией в США проекта разработки аэрокосмических аппаратов для заатмосферных полетов. Предполагается, что летательный аппарат, названный «Восточный экспресс» (рисунок), сможет взлетать и садиться на обычных взлетных полосах современных аэродромов [5]. Полет с западного побережья США в страны Азии будет длиться менее двух часов. Во время полета некоторые элементы конструкции самолета будут нагреваться до 1800 °С. Естественно, для изготовления конструкции аппарата подобного типа не могут применяться металлические материалы. Эффективное решение может быть достигнуто только при использовании новых высокопрочных, легких, жестких, высокотемпературных композиционных материалов. Такие материалы разрабатываются в передовых лабораториях развитых стран.

Потребность в разработке новых материалов лежит в основе постоянного совершенствования технологических процессов их производства, создания принципиально новых технологий и обо-

рудования для их реализации. В течение относительно короткого времени новые конструкторские и технологические решения, появившиеся при разработке уникальных материалов, распространяются в различных отраслях производства и становятся привычными для специалистов. В то же время разрабатываются новые конструкции, производство и эксплуатация которых невозможны без новых материалов. Таким образом, разработка новых материалов, в том числе и композитов, стимулирует развитие техники и технологии во многих развитых странах мира.



Затмосферный пассажирский самолет «Восточный экспресс» (США):

а – общий вид; б – температуры разогрева основных элементов самолета в полете



В последние десятилетия темпы роста производства композиционных материалов постоянно возрастают. Двадцать лет назад общая стоимость композитов, производимых только в США, превышала 6 млрд. долл. в год, общий годовой объем производства композиционных материалов различного типа составлял 3,6 млн. т [4].

Как правило, стоимость композиционных материалов очень высока, что связано со сложностью технологических процессов их производства, высокой ценой используемых компонентов. Однако следует подчеркнуть возможность экономии при производстве сложных конструкций за счет уменьшения количества технологических разъемов, уменьшения количества деталей, сокращения числа сборочных операций. Трудоемкость производства изделий из композиционных материалов можно снизить в 1,5...2 раза по сравнению с металлическими аналогами [5].

Композиты эффективно конкурируют с такими конструкционными материалами, как алюминий, титан, сталь. К отраслям, активно использующим композиционные материалы и являющимся заказчиками для разработки и производства новых материалов и изделий из них, относятся авиация, космонавтика, наземный транспорт, химическое машиностроение, медицина, спорт, туризм, образование. Композиты используются для производства автомобилей, объектов железнодорожного транспорта, самолетов, ракет, судов, яхт, подводных лодок, емкостей для хранения различного рода жидкостей, трубопроводов, стволов артиллерийских орудий. Материалы, разработка которых первоначально осуществлялась по заказам военных ведомств, в первую очередь для применения в летательных аппаратах, внедрены во многих отраслях гражданской промышленности.

Специалистами отмечается особенность ситуации, в которой находится материаловедение, ориентированное на проблемы современных композиционных материалов [4]. Она заключается в том, что из-за высокой потребности в новых материалах, появления их в большом количестве при разработке современных конструкций темпы изучения свойств этих материалов практически не успевают за их созданием. Исследование свойств новых композиционных материалов – дорогостоящая и трудоемкая задача. Не менее сложна задача конструирования изделий из композиционных материалов. Чтобы в совершенстве овладеть процессом конструирования изделий из композитов, специалистам требуется 15...20 лет [4].

Хорошо известно, что эффективность создаваемых конструкций определяется уровнем конструкторских решений, свойствами

используемых материалов и особенностями технологических процессов изготовления элементов конструкций из выбранных материалов. В традиционном машиностроении довольно редки примеры тесного взаимодействия конструкторов, производителей материалов и технологов при создании какого-либо оборудования. При создании современных КМ такой подход неприемлем. Принцип, сформулированный в начале 80-х гг. XX в., предусматривает комплексное решение вопросов выбора композиционных материалов, проектирования из них конструкций и разработки технологических процессов. Это три стороны единой проблемы [5]. Таким образом, во многих случаях одновременно разрабатываются новая конструкция, композиционный материал для ее изготовления и технологический процесс получения детали.

Данное учебное пособие подготовлено в соответствии с планами обучения студентов механико-технологического факультета Новосибирского государственного технического университета по направлению 551600 – Материаловедение и технология новых материалов и специальности 120800 – Материаловедение в машиностроении. Рассматриваются строение композиционных материалов, их производство, свойства и применение. Различные аспекты этих проблем отражены во многих научных монографиях и литературе учебного характера [1–45]. Наиболее полно материал рассмотрен в учебниках [1,5] и научных монографиях [3,4,6,7,21,24,32].

Авторы учебного пособия благодарны друзьям и коллегам за помощь, оказанную при подготовке рукописи, а также студентам и аспирантам кафедры «Материаловедение в машиностроении» НГТУ за помощь в оформлении графического материала.



# **1. КОМПОЗИТЫ КАК МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

## **1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В настоящее время в различных отраслях производства используется множество композиционных материалов. Термин «композиционный материал» применяется в материаловедении, машиностроении, самолетостроении, ракетостроении, медицине, электронике. Для того чтобы этот термин однозначно воспринимался специалистами из различных областей науки и техники, необходимо определить, что же понимается под композиционным материалом.

Слово «композиция» широко применяется в художественной литературе, музыке, скульптуре, графике. Происходит это слово от латинского *compositio* – составление, связывание. Исходя из этого говорят, например, о литературно-музыкальной композиции или о музыкальной композиции, состоящей из различных произведений и отрывков. Если перенести эти рассуждения на понятие «композиционный материал», то в самом общем случае можно отметить, что КМ является материалом, состоящим (составленным) из каких-либо различных частей.

Иногда к композиционным материалам относят конструкционные материалы с нанесенными на них защитными покрытиями. Так, например Доминик В. Росато считает, что композитами являются покрытые поливиниловой пленкой изделия, используемые в летательных аппаратах, ламинированные металлопластиковые облицовки и другие материалы и изделия подобного рода [4, с. 19].

Достаточно известно определение, согласно которому композиты – это материалы, состоящие из двух или более компонентов (армирующих элементов и скрепляющей их матрицы) и обладающие свойствами, отличными от суммарных свойств компонентов [4]. При этом предполагается, что компоненты, входящие в состав композита, должны быть хорошо совместимыми и не растворяться или иным способом поглощать друг друга.

Широта толкования слова «композиционный» породила множество определений термина «композиционный материал». В широком смысле композиционный материал – это любой материал с гетерогенной структурой, т. е. со структурой, состоящей минимум из двух фаз. Такое определение позволяет отнести к КМ абсолютное большинство металлических материалов, поскольку они либо намеренно создаются многофазными, либо считаются однофазными, но в них есть неметаллические включения. Типичным примером гетерофазного металлического материала является сталь со структурой пластинчатого перлита, представляющего собой механическую смесь в виде пластин феррита и цементита. С учетом отмеченного определения полимерные материалы также можно отнести к композитам, поскольку кроме основного компонента (смолы) в них присутствуют различные наполнители, красители и др.

Если проанализировать структуру окружающих нас материалов природного происхождения, то и их с учетом отмеченного определения можно отнести к КМ. Это касается материала костей человека и животных, древесины, различных минералов. Например, древесина представляет собой композицию из пучков целлюлозных волокон трубчатого строения, скрепленных матрицей из органического вещества – лигнина. Минерал нефрит состоит из игольчатых кристаллов, скрепленных между собой по поверхностям раздела.

Впервые КМ начали создаваться задолго до появления понятия «композиционный материал». В качестве примеров можно назвать изготовленные из глины и упрочненные соломой кирпичи, предназначенные для постройки жилищ, или алебастр, армированный бычьим волосом.

Первыми примерами научного подхода к созданию искусственных композиционных материалов считают появление железобетона и стеклопластиков. Железобетон относится к числу первых образцов армированной керамики. Этот композит состоит из бетона и стальной арматуры. Бетон отлично воспринимает сжимающие нагрузки и очень плохо сопротивляется растягивающим напряжениям. По этой причине перекрытия зданий нельзя изготавливать из обычного бетона, поскольку при воздействии на них внешней нагрузки неминуемо хрупкое разрушение конструкции. При сочетании бетона и металла в виде стальных прутков, определенным образом расположенных в изделии и хорошо воспринимающих растягивающие нагрузки, получается железобетон, соединяющий достоинства обоих компонентов.

Первый патент на композиционный полимерный материал (синтетическая смола, армированная природными волокнами) выдан в 1909 г. Следует отметить при этом, что древние египтяне строили речные суда из тростника, пропитанного горной смолой [5].

Для того чтобы как-то выделить КМ искусственного происхождения, подчеркнуть их характерные особенности предпринимались попытки дать более четкое научное определение этих материалов. Однако отмечается [2], что в настоящее время однозначного и общепринятого определения нет. Наиболее полным считается определение, согласно которому к композитам относятся материалы, обладающие рядом признаков:

- 1) состав, форма и распределение компонентов материала «запроектированы заранее»;
- 2) материал не встречается в природе, а создан человеком;
- 3) материал состоит из двух или более компонентов, различающихся по химическому составу и разделенных выраженной границей;

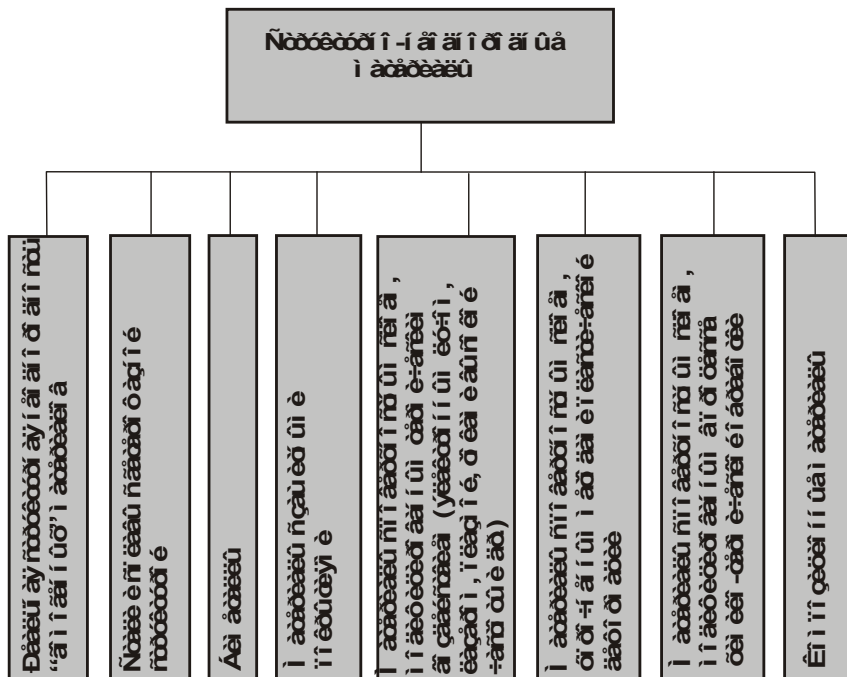


Рис. 1.1. Виды структурной неоднородности в металлических материалах

4) свойства материала определяются каждым из его компонентов, которые в связи с этим должны присутствовать в достаточно больших количествах (больше некоторого критического содержания);

5) материал обладает такими свойствами, которых не имеют его компоненты, взятые в отдельности;

6) материал неоднороден в микромасштабе и однороден в макромасштабе.

По мнению К.И. Портного и др., шестой признак не позволяет отнести к композиционным материалам биметаллы и материалы с покрытиями, поскольку в макромасштабе они не являются однородными. Эти материалы не характеризуются повторяющейся геометрией или равномерным распределением компонентов по отношению друг к другу [2].

Таким образом, композиционные материалы характеризуются рядом отмеченных выше признаков, в соответствии с которыми их следует особо выделять из широкой совокупности структурно-неоднородных материалов. Графически место композитов в группе широко используемых конструкционных металлических материалов, обладающих структурной неоднородностью, отражено на рис. 1.1. При желании эта схема может быть дополнена древесинной, полимерными, керамическими и другими материалами.

## **1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В настоящее время отрасли науки и производства, связанные с разработкой новых композиционных материалов, развиваются наиболее динамично. Специалистами разработано и исследовано огромное количество композиционных материалов. Анализ перспектив развития производства композитов показывает, что в ближайшее время номенклатура этих материалов будет стремительно расширяться. Для того чтобы систематизировать КМ по различным признакам, грамотно реализовать процедуру выбора КМ для изготовления различных деталей, упорядочить терминологию в области материаловедения композитов, необходима обоснованная классификация этих материалов.

Единой общепринятой классификации композиционных материалов нет. Это объясняется рядом причин. Одна из них заключается в том, что КМ представляют самый широкий класс материалов, объединяющий металлы, полимеры и керамики. Современные технологии позволяют реализовать различные, считавшиеся ранее экзотическими, сочетания исходных материалов. Разнообразие ис-

ходных материалов, сложность реальных структур в ряде случаев затрудняют классификацию получаемых композиционных материалов. К тому же вызывает трудности определение понятия «композиционный материал».

В настоящее время разработано несколько подходов к классификации композиционных материалов. Деление композитов может осуществляться по ряду признаков. Определенное влияние на классификацию материалов, естественно, оказывает и субъективный фактор.

Наиболее часто используется классификация композиционных материалов, в основу которой положено их деление по материаловедческому признаку. На рис. 1.2 приведен один из наиболее простых вариантов разделения композитов по типу матричного материала. В соответствии с этой классификацией композиционные материалы делятся на полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), керамические (ККМ), углерод-углеродные (УУКМ) и гибридные (ГКМ). Гибридные композиты представляют собой материалы с матрицей смешанного типа.

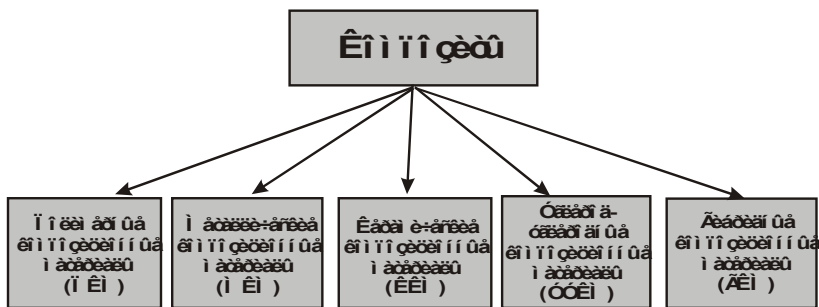


Рис. 1.2. Классификация композиционных материалов

В основу классификации КМ, предложенной К.И. Портным и др. [2], положены три признака:

- 1) геометрия компонентов композиционных материалов;
- 2) пространственное расположение компонентов (схема армирования);
- 3) природа компонентов композиционных материалов.

### Классификация КМ по геометрии компонентов

По геометрии компонентов КМ подразделяются на три основные группы (рис. 1.3):

- 1) материалы с нульмерными компонентами;

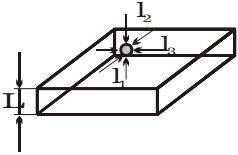
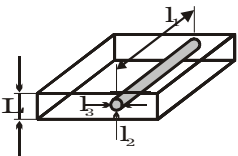
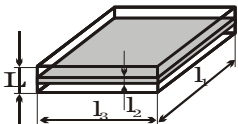
Í àèí àí ààí èà èí ïí á à à	Àá ï ààèèèí ïíí á à	Ñí ò í òá èá èàè àá à
Í ààí àá úé		$\frac{l_1}{L} \ll 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1$
Î áí ï àá úé		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1$
Àáàá àá úé		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \sim 1$

Рис. 1.3. Классификация композиционных материалов по геометрии компонентов

2) материалы с одномерными компонентами;

3) материалы с двумерными компонентами.

Классификация КМ по данному признаку основана на понятии элементарного образца КМ, т. е. такого минимального объема материала, который характеризуется всем комплексом основных признаков КМ. В самом общем случае элементарный образец КМ должен иметь все три размера, существенно превосходящие минимальный размер компонентов.

В КМ с нульмерными компонентами все три размера компонента являются величинами одного и того же порядка. Нульмерные компоненты не имеют ни одного размера, соизмеримого с характерным размером элементарного образца КМ. В качестве примеров композитов такого типа можно привести дисперсно-упрочненные сплавы, металлы и сплавы, армированные частицами и материалы на основе керамики, содержащие короткие нитевидные кристаллы, длина которых много меньше характерного размера элементарного образца.

КМ с одномерными компонентами содержат армирующие компоненты, один из размеров которых значительно превышает два других размера и соизмерим с характерным размером элементарного образца КМ. Примеры КМ этой группы: волокнистые композиционные материалы на основе металлов и полимеров, армиро-



ванные керамическими, борными, углеродными, стеклянными волокнами.

КМ с двумерными компонентами содержат компоненты, имеющие два размера, значительно превосходящие третий размер и соизмеримые с характерным размером элементарного образца КМ. Примерами композиционных материалов этой группы являются слоистые КМ, состоящие из чередующихся слоев титана и алюминия и их сплавов.

Для обозначения нульмерных, одномерных и двумерных компонентов приняты соответствующие индексы: 0\*, 1 и 2.

Кроме КМ с нульмерными, одномерными и двумерными компонентами созданы комбинированные КМ, содержащие два или три компонента различной размерности. Примером такого КМ может служить пластик на основе эпоксидной смолы, армированный углеродными волокнами (одномерный компонент) и короткими нитевидными кристаллами карбида кремния (нульмерный компонент).

### **Классификация КМ по расположению компонентов**

По расположению компонентов, т. е. по схеме армирования КМ делятся на три группы (рис. 1.4):

1. КМ с одноосным (линейным) расположением армирующего компонента. В этих КМ армирующие компоненты в виде волокон или ориентированных цепочек нитевидных кристаллов располагаются в матрице параллельно друг другу, что достигается с помощью нульмерных или одномерных компонентов. Обозначение этой схемы следующее: 0\*:0:0 и 1:0:0 (нульмерный 0\* или одномерный компонент расположен вдоль оси  $x$ ).

2. КМ с двухосным (плоскостным) расположением армирующего компонента. Армирующие компоненты в виде волокон, фольг, матов из нитевидных кристаллов расположены в матрице в плоскостях, параллельных друг другу. Такая схема армирования создается с помощью нульмерных, одномерных или двумерных компонентов и обозначается 0\*:0\*:0, 1:1:0 и 2:2:0 соответственно (компоненты расположены в плоскостях  $xy$ ).

3. КМ с трехосным (объемным) расположением компонентов. В этой схеме армирования невозможно выделить одно или два преимущественных направления в материале. Такая схема может быть реализована с помощью нульмерных (0\*:0\*:0\*) или одномерных (1:1:1) компонентов.

На рис. 1.4 показаны схемы армирования композиционных материалов компонентами одинаковой размерности (нульмерными,

Ααι αββγ εηηηθ δα		ΕΒη η εββ εαβ ηηη θ δ α					
		Γ αηηηηα(εεη ββηηα)		Ααββηηα(ηεη ηεηηηα)		Οεββηηα(ηαα ηηηα)	
Ι ββ η ηη- ββ η η	Γ αη η α- η η η η	Νοα α	Γ αη η α- η η η η	Νοα α	Обозна- чение	Νοα α	Γ αη η α- η η η η
Ι οεη η ββ η η	0		0:0:0		0:~:0:0		0:0:~:0
Γ αη η η ββ η η	1		1:0:0		1:1:0		1:1:1
Ααββ η ββ η η	2	—	—		2:2:0	—	—

Рис. 1.4. Классификация композиционных материалов по расположению компонентов (по схеме армирования)

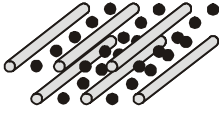
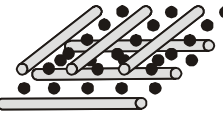
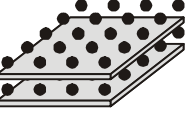
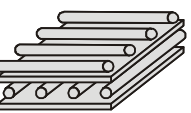
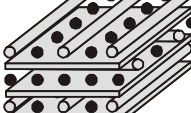
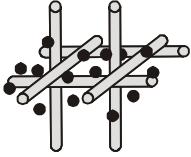
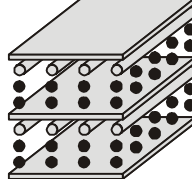
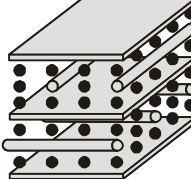
Данная таблица	Виды сочетаний и расположения			
	0,1	0,2	1+2	0,1+2
Исходная		—	—	—
Аналогичная				
Объединенная			—	

Рис. 1.5. Классификация комбинированных композиционных материалов по видам сочетаний и расположению компонентов

одномерными или двухмерными). Для комбинированных КМ, т. е. материалов, армированных одновременно компонентами различной размерности, возможны следующие сочетания компонентов:  $0_*+1$ ;  $0_*+2$ ;  $1+2$ ;  $0_*+1+2$ . Наиболее сложные варианты армирования комбинированных композиционных материалов показаны на рис. 1.5. На этом рисунке трехосная схема армирования сочетанием нульмерных и одномерных компонентов показана в виде  $(0_*+1):(0_*+1):(0_*+1)$ . В то же время возможны еще два варианта:  $(0_*+1):0_*:0_*$  и  $(0_*+1):(0_*+1):0_*$ .

### Классификация КМ по природе компонентов

По природе компонентов КМ делятся на группы по количеству компонентов (например, на две группы – по природе матрицы и по природе армирующего компонента). Каждая группа, в свою очередь, делится на четыре подгруппы, имеющие компоненты из:

- металлов и сплавов;
- неметаллических материалов (например, углерода);
- неорганических соединений (окислов, карбидов, нитридов и т.п.);
- органических соединений.

В соответствии с этим признаком композиционный материал углерод-углерод относится по природе матрицы к группе КМ с матрицей из неметаллических элементов, по природе армирующего компонента – к группе КМ со вторым компонентом из неметаллических элементов. Углепластики относятся по природе матрицы к группе КМ с матрицей из органических соединений, по природе армирующего компонента – к группе КМ со вторым компонентом из неметаллических элементов.

Дополнениями к рассмотренным группам являются полиматричные и полиармированные КМ. Полиматричные КМ состоят из чередующихся слоев двух или более КМ с матрицами различного химического состава (рис. 1.6, а). Полиармированные КМ содержат два или более различных по составу армирующих компонента, равномерно распределенных в матрице (рис. 1.6, б).

Полиармированные КМ могут быть «простыми», если содержат армирующие компоненты различной природы, но одинаковой размерности, и комбинированными, если содержат армирующие компоненты различной размерности и различной природы. Например, стеклоуглепластик является простым полиармированным КМ, а бороалюминий с прослойками из титановой фольги – комбинированным полиармированным КМ.

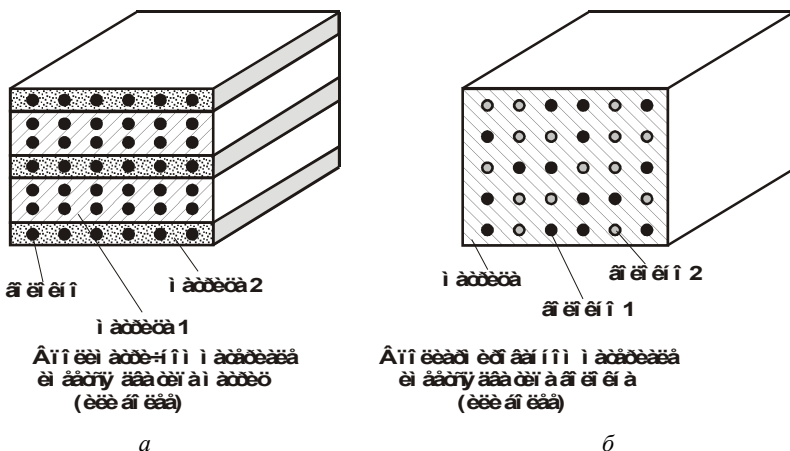


Рис. 1.6. Примеры композиционных материалов:

*a* – полиматричный; *b* – полиармированный

Разделять композиционные материалы по другим признакам авторы данной классификации считают нецелесообразным.

Ниже приводится трактовка принципов классификации КМ, изложенных в работах Д.М. Карпиноса и др. [1, 3].

### Классификация КМ по материалу матрицы (материаловедческий принцип)

В соответствии с представлениями, изложенными в работах [1, 3], одним из наиболее важных признаков классификации КМ является материал матрицы и армирующих элементов. Общее название КМ, как правило, происходит от материала матрицы. КМ с металлической матрицей называют металлическими композиционными материалами (МКМ), с полимерной матрицей – полимерными композиционными материалами (ПКМ), с неорганической – неорганическими композиционными материалами. КМ, содержащие два и более различных по составу матричных материала, называют полиматричными.

Название полимерных КМ обычно состоит из двух частей. В первой части называется материал волокна, во второй приводится слово «пластик», или «волокнит». Например, ПКМ, армированные стекловолокном, называются стеклопластиками, или стекловолокнитами. Если при изготовлении ПКМ использовали металлические волокна, КМ называют металлопластиком (металловолокнитом). Соответственно композиционные материалы носят такие названия, как органо-

пластики (органоволокниты), боропластики (бороволокниты), углепластики (углеволокниты), асбопластики (асбоволокниты).

Для характеристики металлических композиционных материалов чаще используют двойное обозначение: вначале пишут материал матрицы, затем – материал волокна. Например, обозначение медь-вольфрам (Cu-W) соответствует композиционному материалу, в котором матрицей является медь, а волокнами – вольфрам.

Для неорганических КМ характерно такое же обозначение, как и для МКМ, т. е. в двойном наименовании первое слово относится к матрице, а второе – к волокну. Например, обозначение окись алюминия-молибден ( $Al_2O_3$ -Mo) соответствует композиционному материалу с матрицей из окиси алюминия и молибденовыми волокнами.

В некоторых случаях для обозначения КМ используется одно сложное слово, например бороалюминий или углеалюминий. В этом случае первая часть слова соответствует материалу волокна, а вторая – материалу матрицы.

### **Классификация КМ по геометрии армирующих элементов**

В соответствии с геометрией армирующих элементов (порошки или гранулы, волокна, пластины) КМ делятся на порошковые (гранулированные), волокнистые и пластинчатые. К первой группе относят дисперсно-упрочненные КМ, ко второй – КМ, армированные непрерывными и дискретными волокнами, например композиция алюминий-борные волокна. К третьей группе относятся КМ, армированные непрерывными и дискретными пластинами, например слоистые КМ, состоящие из чередующихся фольг стали, алюминия и титана.

### **Классификация КМ по структуре и расположению компонентов**

В соответствии с классификацией по структуре и расположению компонентов КМ делятся на группы с каркасной, матричной, слоистой и комбинированной структурой. К КМ с каркасной структурой относятся, например, псевдосплавы, полученные методом пропитки. Матричную структуру имеют дисперсно-упрочненные и армированные КМ. К материалам со слоистой структурой относятся композиции, полученные из набора чередующихся фольг или листов материалов различной природы или состава. Комбинированную структуру имеют материалы, содержащие комбинации первых трех групп. Например, псевдосплавы, каркас ко-

торых упрочнен дисперсными включениями, относятся к КМ, сочетающим каркасную и матричную структуры.

**Классификация матричных КМ по схеме армирования (конструкционный принцип)**

По ориентации и типу арматуры все КМ можно разделить на две группы – изотропные и анизотропные. Изотропными называют материалы, которые имеют одинаковые свойства (например, прочностные) во всех направлениях. Свойства анизотропных материалов зависят от направления в исследуемом объекте. Анизотропия КМ конструкционна: ее специально предусматривают при проектировании материала для того, чтобы обеспечить необходимый уровень свойств изделия.

КМ с матричной структурой делятся на хаотично-армированные и упорядоченно-армированные (рис. 1.7). Хаотично-армированные КМ содержат армирующие элементы в виде дисперсных включений, дискретных или непрерывных волокон. Эти материалы являются изотропными или квазиизотропными. Термин «квазиизотропный» означает, что КМ является анизотропным в микрообъеме, но изотропным в объеме всего изделия. Упорядоченно-армированные КМ подразделяются на однонаправленные, т. е. односно-ар-

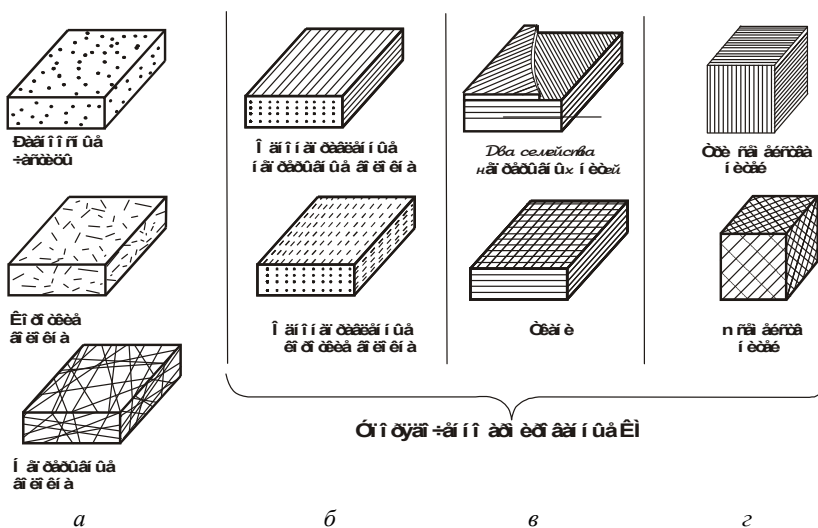


Рис. 1.7. Классификация композиционных материалов по конструкционному признаку: хаотично-, одномерно- и пространственно армированные КМ (а – г соответственно)

мированные, двухосно-армированные (с плоскостным расположением арматуры) и трехосно-армированные (с объемным расположением арматуры).

**Классификация КМ по методам получения** (технологический принцип)

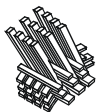
В соответствии с этой классификацией КМ делятся на материалы, полученные жидкофазными и твердофазными методами, а также методами осаждения – напыления, комбинированными методами. К жидкофазным методам относятся пропитка (пропитка арматуры полимерами или расплавленными металлами) и направленная кристаллизация сплавов. К твердофазным методам получения КМ относятся прокатка, экструзия, ковка, штамповка, уплотнение взрывом, диффузионная сварка, волочение и др. Композиционные материалы, получаемые твердофазными методами, используются в виде порошка или тонких листов. Композиционные материалы, заготовка которых представляет набор чередующихся слоев матрицы в виде тонких листов (фольг) и армирующих элементов, уложенных в заданной последовательности, иногда называют композициями типа сэндвича.

При получении КМ методами осаждения – напыления матрица наносится на волокна из растворов солей или других соединений, из парогазовой фазы, из плазмы и т.п. Комбинированные методы заключаются в последовательном или параллельном применении нескольких методов. Например, в качестве предварительной операции может использоваться плазменное напыление, а в качестве окончательной операции – прокатка или диффузионная сварка.

**Классификация КМ по назначению** (эксплуатационный принцип)

Следует отметить, что классификация КМ по назначению достаточно условна, поскольку часто композиты являются многофункциональными материалами. Тем не менее среди множества КМ выделяют материалы общеконструкционного назначения (несущие конструкции судов, самолетов, автомобилей и др.), жаропрочные материалы (лопатки турбин самолетов, камеры сгорания), термостойкие материалы (изделия, работающие в условиях частых теплосмен), фрикционные материалы (тормозные колодки), антифрикционные материалы (подшипники скольжения), ударопрочные материалы (броня самолетов, танков), теплозащитные материалы, материалы со специальными свойствами (магнитными, электрическими и т.п.) [1].





## 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕХАНИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1. МОДУЛИ УПРУГОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Важнейшими характеристиками механического поведения композиционных материалов служат модули упругости. Модули упругости представляют собой коэффициенты в зависимостях, связывающих деформации и приложенные механические напряжения.

Модуль упругости, характеризующий жесткость материала в условиях действия нормальных напряжений, носит название модуля Юнга (модуля нормальной упругости)  $E$ :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – растягивающее (сжимающее) напряжение;  $\varepsilon$  – относительное удлинение (сжатие).

Жесткость материала в условиях действия сдвигающих напряжений характеризуется модулем Гука (модулем сдвига)  $G$

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2.2)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение;  $\gamma$  – сдвиговая деформация.

Связь между напряжениями, действующими на тело и упругими деформациями, возникающими в нем, устанавливает закон Гука. В том случае если тело является изотропным, а на него действует только растягивающее или сжимающее напряжение, закон Гука имеет вид

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (2.3)$$

Кроме одноосного растяжения или сжатия возможны такие схемы приложения сил, в результате которых изотропное тело будет находиться в плоском и в объемно напряженном состоянии. В об-

щем случае для изотропного материала закон Гука, устанавливающий связь между напряжениями и деформациями, имеет форму:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}; \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz}; \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{G} \tau_{xz}.\end{aligned}\tag{2.4}$$

Наиболее простым является анализ упругого поведения изотропных материалов. Число модулей упругости при описании поведения анизотропных материалов достигает 21 (в зависимости от симметрии объекта). Большинство композиционных материалов являются анизотропными. В этой связи задача описания их поведения в упругой области деформации, как правило, достаточно сложна.

При описании закона Гука для анизотропных тел, в том числе и для композитов, часто используют тензорную и матричную форму записи [3]. Для описания упругого поведения анизотропных тел с высокой степенью симметрии может быть использована техническая форма записи закона Гука. Так, например, для ортотропного материала закон Гука в технической форме имеет вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_z; \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zy}}{E_z} \sigma_z; \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z;\end{aligned}\tag{2.5}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy} ;$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz} ;$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G_{xz}} \tau_{xz} ,$$

где  $E$  – модули нормальной упругости в направлении оси, указанной в индексе;  $G$  – модули сдвига по плоскостям, указанным в индексах;  $\nu$  – коэффициенты Пуассона в направлении первой из осей, указанных в индексе, при действии нормальных напряжений в направлении второй оси.

В этой системе уравнений насчитывается 12 коэффициентов упругости. Девять из них независимые. В том случае если анализируются анизотропные материалы с более высокой степенью симметрии, количество независимых упругих констант уменьшается.

Одним из наиболее простых типов композиционных материалов являются композиты с непрерывными волокнами, ориентированными в одном направлении. Анализ упругих характеристик таких материалов представляет собой относительно простую задачу. Традиционные подходы к композитам как к структурно неоднородным материалам позволяют рассчитать их модули упругости по известным упругим характеристикам и объемным концентрациям компонентов [1, 3].

Анализируя упругое поведение однонаправленных композиций, рассмотрим в первую очередь два крайних случая, связанных с нагружением материала в направлении осей волокон и в поперечном направлении.

### **2.1.1. МОДУЛЬ НОРМАЛЬНОЙ УПРУГОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В НАПРАВЛЕНИИ ОСИ АРМИРОВАНИЯ**

В качестве простейшего объекта для анализа обычно берут монослой, представляющий собой вытянутые в одном направлении упрочняющие волокна, которые связаны матричным материалом [1]. На рис. 2.1 [1] приведен пример, в котором для простоты анализа элементы волокна и матрицы в поперечном сечении имеют прямоугольную форму.

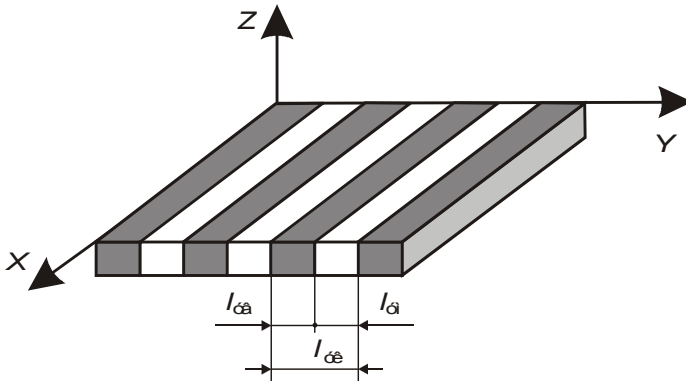


Рис. 2.1. Схематическое изображение структуры однонаправленного материала: темные области – волокна, белые – матрица

Если анализируемую пластину нагрузить в продольном направлении, т. е. вдоль оси  $x$ , силой  $P_x$ , то совместность деформаций волокон и элементов матрицы позволяет записать

$$\varepsilon_{xK} = \varepsilon_{xM} = \varepsilon_{xB}, \quad (2.6)$$

где  $\varepsilon_{xK}$ ,  $\varepsilon_{xM}$ ,  $\varepsilon_{xB}$  – значения относительной деформации композита, матрицы и волокна в направлении оси  $x$ .

Общая сила  $P_x$ , действующая на пластину, может быть представлена как сумма сил  $P_{xM}$ , действующих на матрицу, и сил  $P_{xB}$ , действующих на волокно,

$$P_x = P_{xM} + P_{xB}. \quad (2.7)$$

Выразим значения сил  $P$ , входящих в зависимость (2.7), из уравнений, связывающих их с механическими напряжениями  $\sigma$ ,

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad (2.8)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения элемента, растягиваемого силой  $P$ .

С учетом уравнения (2.8) зависимость (2.7) может быть записана в следующем виде:

$$\sigma_{xK} F_K = \sigma_{xM} F_M + \sigma_{xB} F_B, \quad (2.9)$$

где  $\sigma_{xM}$ ,  $\sigma_{xB}$ ,  $\sigma_{xK}$  – растягивающие напряжения в матрице, волокне и в композиции соответственно в направлении оси  $x$ ;  $F_M$ ,  $F_B$ ,  $F_K$  –

поперечные сечения матрицы, волокна и композиции соответственно.

Разделим обе части уравнения (9) на величину  $F_K$ :

$$\sigma_{xk} = \sigma_{xm} \frac{F_M}{F_K} + \sigma_{xb} \frac{F_B}{F_K}. \quad (2.10)$$

Учитывая, что  $\frac{F_M}{F_K}$  представляет собой объемную долю матрицы  $V_M$  в анализируемом композите,  $\frac{F_B}{F_K}$  – объемную долю волокна  $V_B$ , а  $V_B + V_M = 1$ , уравнение (2.10) может быть записано в следующем виде:

$$\sigma_{xk} = \sigma_{xm}(1 - V_B) + \sigma_{xb}V_B. \quad (2.11)$$

В соответствии с законом Гука можно записать

$$\begin{aligned} \sigma_{xm} &= \varepsilon_{xm} E_{xm}; \\ \sigma_{xb} &= \varepsilon_{xb} E_{xb}; \\ \sigma_{xk} &= \varepsilon_{xk} E_{xk}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $E_{xm}$ ,  $E_{xb}$ ,  $E_{xk}$  – модули Юнга матрицы, волокна и композиции в направлении оси  $x$ .

В связи с изотропностью модулей Юнга волокна и матрицы индекс направления  $x$  у соответствующих характеристик этих материалов может быть опущен. С учетом зависимостей (2.6) и (2.12) уравнение (2.11) приобретает вид

$$E_{xk} = E_B V_B + E_M V_M = E_B V_B + E_M (1 - V_B). \quad (2.13)$$

Таким образом, зная объемное содержание матрицы и волокна в композите, а также модули упругости этих компонентов, в соответствии с уравнением (2.13) можно рассчитать модуль упругости однонаправленного композиционного материала в направлении оси армирования.

### 2.1.2. МОДУЛЬ НОРМАЛЬНОЙ УПРУГОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В НАПРАВЛЕНИИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ ОСИ АРМИРОВАНИЯ

Пусть композиционный материал в виде монослоя (см. рис. 2.1) [1] нагружен силой  $P_y$ , приложенной перпендикулярно к продольной оси элементарных волокон. Нормальное напряжение  $\sigma$ , возникающее в анализируемом объекте, представляет собой отношение силы  $P_y$  к площади объекта  $F$  в сечении, перпендикулярном оси  $y$ . В связи с равенством сил, действующих на волокно, матрицу и композицию в целом и равенством площадок, на которые действуют эти силы, можно записать

$$\sigma_{yв} = \sigma_{yм} = \sigma_{yк} \quad (2.14)$$

Абсолютная деформация композиции в направлении оси  $y$   $\Delta_{yк}$  будет равна сумме абсолютных деформаций волокон и элементов матрицы:

$$\Delta_{yк} = \Delta_{yв} + \Delta_{yм} \quad (2.15)$$

Подставим в уравнение (2.15) соответствующие значения  $\Delta = l\varepsilon$ , где  $l$  – длина, а  $\varepsilon$  – относительная деформация деформируемого элемента. В результате этого получим зависимость

$$\varepsilon_{yк} l_{yк} = \varepsilon_{yв} l_{yв} + \varepsilon_{yм} l_{yм} \quad (2.16)$$

где  $\varepsilon_{yк}, \varepsilon_{yв}, \varepsilon_{yм}$  – относительные деформации соответственно композиции, волокна и матрицы в направлении оси  $y$ ;  $l_{yк}, l_{yв}, l_{yм}$  – соответственно длина анализируемого элемента КМ, суммарная длина волокон и элементов матрицы в направлении оси  $y$ .

Разделим обе части уравнения (16) на величину  $l_{yк}$ . В результате этого получим зависимость вида

$$\varepsilon_{yк} = \varepsilon_{yв} \frac{l_{yв}}{l_{yк}} + \varepsilon_{yм} \frac{l_{yм}}{l_{yк}} \quad (2.17)$$

С учетом того что  $\frac{l_{yв}}{l_{yк}}$  и  $\frac{l_{yм}}{l_{yк}}$  фактически представляют собой

объемные доли волокон и матрицы  $V_B$  и  $V_M$  в анализируемом монослое, уравнение (2.17) приобретает вид

$$\varepsilon_{yк} = \varepsilon_{yв} V_B + \varepsilon_{yм} V_M = \varepsilon_{yв} V_B + \varepsilon_{yм} (1 - V_B) \quad (2.18)$$

В соответствии с законом Гука величина деформации объекта определяется выражением вида

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}. \quad (2.19)$$

Подставим в уравнение (2.18) соответствующие значения относительной деформации

$$\frac{\sigma_{ук}}{E_{ук}} = \frac{\sigma_{ув}}{E_{ув}} V_B + \frac{\sigma_{ум}}{E_{ум}} (1 - V_B). \quad (2.20)$$

С учетом зависимости (2.14), позволяющей сократить в обеих частях все значения напряжений, уравнение, описывающее модуль нормальной упругости однонаправленного композита в направлении, перпендикулярном оси упрочняющих элементов, может быть записано в виде

$$E_{ук} = \frac{E_B E_M}{E_M V_B + E_B (1 - V_B)}. \quad (2.21)$$

Индексы  $u$  при величинах модулей упругости волокна и матрицы в последнем уравнении опущены, поскольку предполагается, что материалы обоих компонентов являются изотропными.

Выражения (2.13) и (2.21) очень удобны для описания упругих свойств композиционных материалов, но в то же время считаются лишь оценочными, приближенными, поскольку основаны на использовании идеализированных моделей [1].

## 2.2. ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

### 2.2.1. ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из наиболее простых случаев для анализа прочностных свойств композиционного материала может служить растяжение однонаправленной композиции с упрочняющими элементами в виде непрерывных волокон. Растягивающая сила направлена вдоль осей волокон.

Анализ поведения в условиях действия растягивающей силы композиции в целом, а также отдельно волокон и элементов матрицы позволяет схематически на одном рисунке представить диаграммы растяжения этих материалов.

Пусть композиция состоит из мягкой пластичной матрицы и более жестких и прочных волокон. Модуль упругости материала

на диаграмме растяжения характеризуется тангенсом угла наклона к оси деформации. Диаграммы растяжения такой композиции и составляющих ее компонентов представлены на рис. 2.2 [1]. Поведение композита характеризуется кривой 2, угол наклона которой находится в промежутке между углами наклона кривых растяжения волокна 1 и матрицы 3.

В общем случае на кривой растяжения композита выделяют три участка (I, II, III). Участок I соответствует упругому поведению как волокна, так и матрицы. На участке II волокно продолжает деформироваться упруго, а матрица ведет себя упруго-пластически. В пределах участка III и волокно и матрица деформируются пластически. Предельная деформация анализируемой композиции фактически соответствует предельной деформации волокна, т. е. материал разрушится в тот момент, когда начнется спонтанное разрушение элементов упрочняющей фазы. При этом пластические свойства матричного материала, судя по рис. 2.2, не исчерпаны.

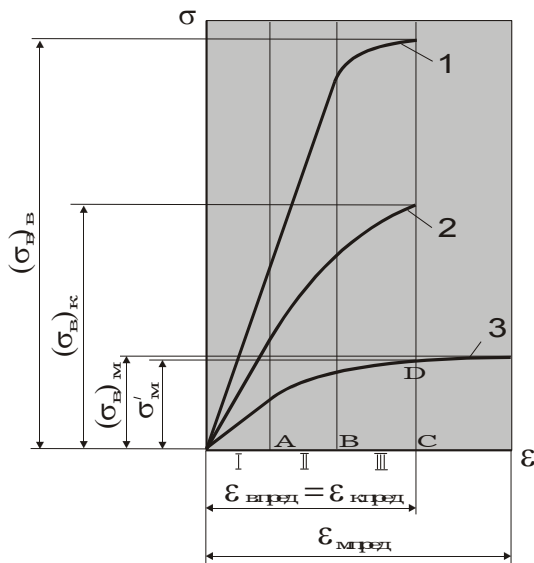


Рис. 2.2. Диаграмма растяжения волокон (1), матрицы (3) и однонаправленного композиционного материала (2)

Если воспользоваться ходом рассуждений, приведенных при анализе модуля упругости однонаправленной композиции, нагруженной вдоль оси волокон, и остановиться на выражении (2.11), то



предел прочности анализируемого в данном разделе материала может быть записан в следующем виде:

$$(\sigma_B)_K = (\sigma_B)_B V_B + \sigma_M (1 - V_B), \quad (2.22)$$

где  $(\sigma_B)_B$  – предел прочности волокон при растяжении;  $\sigma_M$  – уровень напряжения в матрице, достигаемый в момент разрушения волокон в композиции.

Определение величины  $\sigma_M$  понятно из рис. 2.2 [1]. Для пластичных слабо упрочняющихся матриц величину  $\sigma_M$  принимают равной пределу прочности материала матрицы.

Зависимость (2.22) хорошо известна под названиями уравнения смесей, правила смесей, уравнения аддитивности и правила аддитивности. Уравнение (2.22) получено в предположении, что прочность связи на границе между волокном и матрицей достаточна для обеспечения совместной деформации этих компонентов вплоть до полного разрушения композиции. Кроме того, предполагалось, что разрушение композиции происходит при одновременном разрыве всех ее волокон. В реальных композиционных материалах эти допущения могут не выполняться. Эти отклонения от идеализированной модели разрушения композиции объясняют наблюдаемые на практике случаи несоблюдения в той или иной степени правила аддитивности. Тем не менее считается, что для выполнения оценочных расчетов прочностных свойств композиционных материалов зависимость (2.22) вполне пригодна.

### 2.2.2. ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ

Абсолютное большинство композитов – анизотропные материалы, свойства которых в значительной степени зависят от направления действия внешних сил. В данном разделе в качестве относительно простого примера рассматривается поведение однонаправленного волокнистого материала в зависимости от ориентации волокон по отношению к растягивающей силе (рис. 2.3) [1]. Считается, что в зависимости от угла  $\theta$  между осью волокон и направлением растягивающей силы возможны три механизма разрушения композиционного материала.

При малых значениях  $\theta$ , не превышающих нескольких градусов, композиционный материал разрушается в результате разрыва волокон от воздействия на них нормальных напряжений. В том

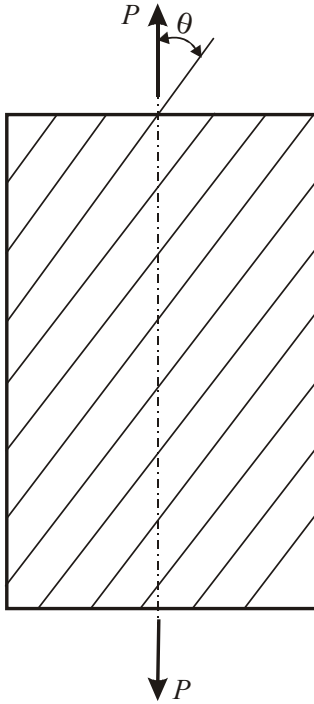


Рис. 2.3. Схема нагружения однонаправленного композиционного материала под углом  $\theta$  к оси волокон

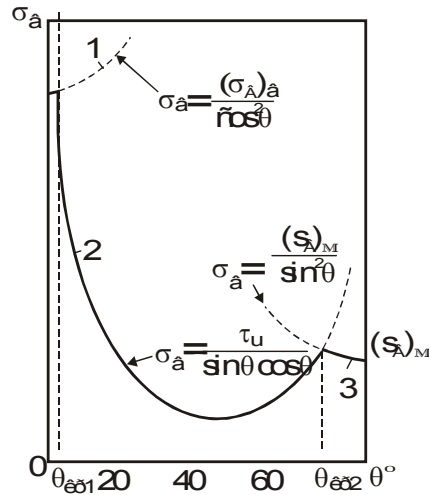


Рис. 2.4. Зависимость предела прочности однонаправленного композиционного материала от ориентации волокон

случае если можно пренебречь прочностью матрицы, предел прочности композита описывается зависимостью следующего вида:

$$\sigma_{\theta} = \frac{(\sigma_B)_B}{\cos^2 \theta}, \quad (2.23)$$

где  $(\sigma_B)_B$  – предел прочности волокна.

Графически зависимость (2.23) представлена на рис. 2.4 [1]. С ростом угла разориентации  $\theta$  предел прочности волокнистой композиции увеличивается. Экспериментально установлено, что зависимость (2.23) выполняется лишь при малых углах  $\theta$ .

При больших углах разориентации  $\theta$ , близких к  $90^\circ$ , прочность композиционного материала определяется нормальной прочностью

границы раздела между матрицей и волокном или прочностью материала матрицы в условиях ее растяжения. В последнем случае предел прочности композиционного материала описывается зависимостью

$$\sigma_{\theta} = \frac{(\sigma_{\text{в}})_{\text{м}}}{\sin^2 \theta}, \quad (2.24)$$

где  $(\sigma_{\text{в}})_{\text{м}}$  – величина предела прочности матрицы в условиях плоской деформации.

В промежутке между критическими углами разориентации  $\theta_{\text{кр1}}$  и  $\theta_{\text{кр2}}$ , соответствующими условиям выполнения зависимостей (2.23) и (2.24), прочность композиционного материала описывается зависимостью вида

$$\sigma_{\theta} = \frac{\tau_{\text{и}}}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (2.25)$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – предел прочности матрицы или границы между волокнами и матрицей в условиях сдвига.

Таким образом, при  $\theta_{\text{кр1}} < \theta < \theta_{\text{кр2}}$  прочность композиционного материала контролируется механизмом разрушения, основанным на действии касательных напряжений и разрушении матрицы или границы раздела между матрицей и волокном в результате сдвига по плоскостям, параллельным волокнам.

Приравнивая выражения (2.23) и (2.25), можно получить зависимость, позволяющую найти значение критического угла  $\theta_{\text{кр1}}$ ,

$$\text{tg} \theta_{\text{кр1}} = \frac{\tau_{\text{и}}}{(\sigma_{\text{в}})_{\text{в}}}. \quad (2.26)$$

Аналогично можно найти значение  $\text{tg} \theta_{\text{кр2}}$ , для этого необходимо приравнять выражения (2.24) и (2.25)

$$\text{tg} \theta_{\text{кр2}} = \frac{(\sigma_{\text{в}})_{\text{м}}}{\tau_{\text{и}}}. \quad (2.27)$$

### 2.2.3. ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫМИ ВОЛОКНАМИ

В данном разделе рассмотрены композиционные материалы с дискретными (короткими) волокнами, ориентированными в одном направлении. Растягивающая сила приложена вдоль осей волокон. Анализируя поведение таких волокон в условиях действия растя-

гивающих напряжений, необходимо ввести понятие критической длины волокна.

В композиционном материале растягивающая нагрузка передается волокнам через матрицу за счет касательных напряжений, действующих на границе сопряжения между компонентами композита. Концы волокон нагрузки не несут. Центральные части волокон нагружены наиболее сильно. Если волокно вырождается в малую частицу сферической формы, то условно можно считать, что оно растягивающую нагрузку не воспринимает. В сплавах с дисперсными сферическими частицами под действием растягивающих напряжений разрушения частиц обычно не наблюдается. Типичным является отслаивание частиц от матрицы.

Подобное происходит и в композиционных материалах. Под действием растягивающей нагрузки дискретные волокна не разрушаются, а вытягиваются из матрицы. Вытягивание волокон без их разрушения возможно лишь в том случае, если их длина  $l$  меньше критической длины  $l_{кр}$ . При  $l > l_{кр}$  под действием растягивающей силы происходит разрушение волокон. Таким образом, критической длиной волокна  $l_{кр}$  называют такую длину, при которой оно разрушается в композиционном материале [1].

С учетом допущения о том, что касательные напряжения по длине волокон распределены равномерно, критическую длину волокна можно определить количественно. Этот расчет основан на равенстве касательных и нормальных сил, действующих на волокно, поскольку по определению критическая длина соответствует такому состоянию, когда одновременно должно произойти разрушение волокна и отделение его от окружающей матрицы,

$$\sigma_{\text{в}} \frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4} = \tau \pi d_{\text{в}} \frac{l}{2}, \quad (2.28)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения на границе раздела между волокном и матрицей;  $\sigma_{\text{в}}$  – нормальные растягивающие напряжения в волокне;  $l$  – длина волокна;  $d_{\text{в}}$  – диаметр волокна.

Критическая длина волокна рассчитывается по формуле

$$l_{кр} = \frac{(\sigma_{\text{в}})_{\text{в}}}{2\tau_{\text{гр}}} d_{\text{в}}, \quad (2.29)$$

где  $\tau_{\text{гр}}$  – сдвиговая прочность границы раздела между волокном и матрицей;  $(\sigma_{\text{в}})_{\text{в}}$  – предел прочности волокон.

Анализ зависимости (2.29) показывает, что критическая длина волокна возрастает при увеличении предела прочности волокна, уменьшении сдвиговой прочности границы раздела и увеличении диаметра волокна.

Прочностные свойства композиционных материалов, армированных дискретными волокнами, зависят от длины волокон [3]. При  $l < l_{кр}$  уравнение аддитивности имеет вид

$$(\sigma_B)_k = \frac{\tau_{гп} l}{d_B} V_B + (\sigma_B)_M (1 - V_B). \quad (2.30)$$

Предел прочности композиционных материалов, содержащих дискретные волокна длиной, превышающей критическую ( $l > l_{кр}$ ), описывается зависимостью

$$(\sigma_B)_k = (\sigma_B)_B \left[ 1 - (1 - k) \frac{l_{кр}}{l} \right] V_B + \sigma_M (1 - V_B), \quad (2.31)$$

где  $k$  – коэффициент ( $k < 1$ ).

С увеличением соотношения  $l/l_{кр}$  прочность композиционного материала возрастает. В том случае если длина волокна в 10 раз больше критической, предел прочности композита с дискретными волокнами лишь на 5 % меньше предела прочности материала, армированного непрерывными волокнами.

#### **2.2.4. ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОЛОКОН НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Объемная доля волокна оказывает существенное влияние на прочностные свойства композиционного материала. В соответствии с правилом аддитивности чем больше объемная доля прочного волокна, тем выше предел прочности композита. Рассуждая с этой позиции, следует в максимальной степени увеличивать объемную долю волокна в материале. Однако на практике максимальная доля волокна во избежание расслоения композиции не превышает 0,7.

Кроме того, следует учитывать, что существуют еще и геометрические ограничения на максимальное значение объемной доли волокна в композите. Так, например, при использовании волокон круглого сечения тетрагональная упаковка волокон обеспечивает максимальное значение их объемной доли  $V_{max} = 0,785$  (рис. 2.5) [1]. Для случая более плотной гексагональной упаковки волокон

$V_{\max} = 0,907$ , а при использовании волокон двух диаметров  $V_{\max} \approx 0,924$  (рис. 2.5, в) [1]. Отмеченные значения объемной доли волокон соответствуют упаковке волокон без образования прослойки между ними.

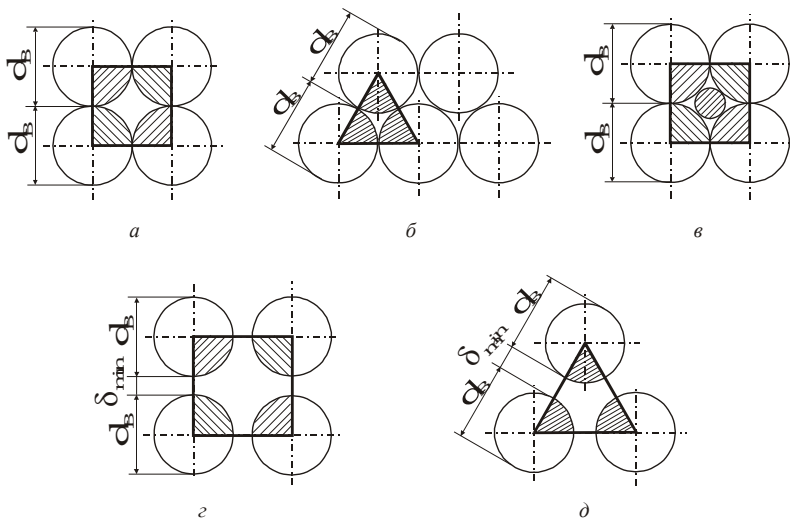


Рис. 2.5. Схемы упаковки однонаправленных волокон при непосредственном их контакте (а, б, в) и упаковки с прослойками матрицы (з, д)

Для снижения опасности расслоения композита между волокнами необходимо обеспечить прослойку матричного материала. При наличии прослойки минимальной толщины  $\delta_{\min}$  объемная доля волокна в композите с тетрагональной упаковкой составляет [1]

$$V_B = \pi / \left[ 4 + 4(\delta_{\min} / d_B) + (\delta_{\min} / d_B)^2 \right], \quad (2.32)$$

с гексагональной упаковкой

$$V_B = 2\pi d_B^2 / (2d_B + \delta_{\min})^2 \sqrt{3}. \quad (2.33)$$

Таким образом, в реальных композиционных материалах существуют ограничения на величину максимальной объемной доли волокна. С другой стороны, в композитах с пластичной матрицей и хрупкими волокнами ограничено и минимальное содержание волокна [1,3]. Смысл этих ограничений понятен из рис. 2.6 [1], на котором показана зависимость прочности композиционного материала от объемной доли волокон в нем.

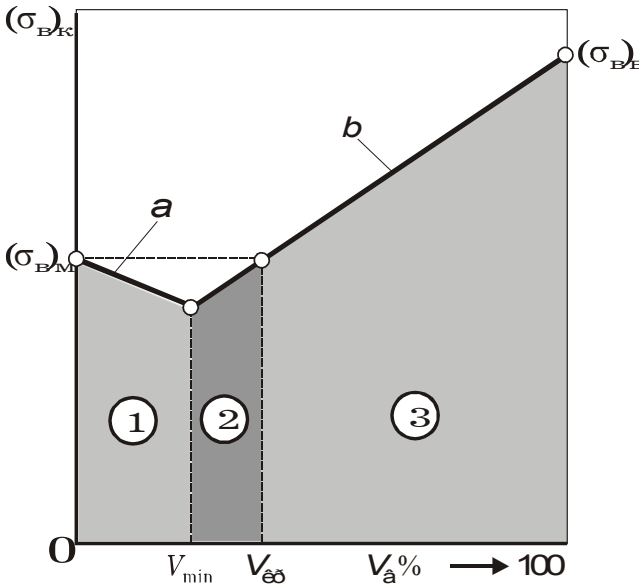


Рис. 2.6. Зависимость прочности однонаправленных композиционных материалов от объемной концентрации волокон

Из приведенного рисунка видно, что существует область значений объемной доли волокна, в которой с увеличением  $V_B$  прочность композиционного материала  $(\sigma_B)_к$  снижается. Такое поведение материала объясняется тем, что при малых значениях  $V_B$  влияние волокон аналогично влиянию нитевидных пор. Таким образом, чем больше объемная доля пор, тем меньше прочность композита. Такой ход зависимости  $(\sigma_B)_к - V_B$  сохраняется до величины объемной доли, равной  $V_{\min}$ . Предел прочности композиционного материала в области малых значений объемной доли волокна описывается зависимостью

$$(\sigma_B)_к = (\sigma_B)_м (1 - V_B). \quad (2.34)$$

Если  $V_B < V_{\min}$ , то в этом случае в результате разрушения волокна разрушения всего композиционного материала не происходит. Нагрузка перераспределяется на матрицу, матрица деформационно упрочняется и становится способной выдерживать более высокий уровень напряжений, чем в предыдущий момент нагружения. В результате увеличения нагрузки волокна постепенно делятся на более мелкие отрезки. Такой процесс растрескивания волокон называют множественным разрушением [3]. На рис. 2.6

множественному разрушению соответствует зона, обозначенная цифрой I. Разрушение композиции произойдет лишь после того как будет полностью исчерпан запас пластичности матрицы и утратится ее способность к деформационному упрочнению.

Минимальной объемной долей волокна  $V_{\min}$  называется такое значение объемной доли, которому соответствует наиболее низкий уровень предела прочности композиционного материала. При  $V_B > V_{\min}$  наблюдается восходящий участок зависимости  $(\sigma_B)_K - V_B$

$$(\sigma_B)_K = (\sigma_B)_B V_B + \sigma'_M (1 - V_B). \quad (2.35)$$

Для количественного определения минимальной объемной доли волокна необходимо приравнять правые части уравнений (2.34) и (2.35) и решить полученное уравнение относительно величины  $V_{\min}$

$$(\sigma_B)_M (1 - V_{\min}) = (\sigma_B)_B V_{\min} + \sigma'_M (1 - V_{\min}), \quad (2.36)$$

$$V_{\min} = \frac{(\sigma_B)_M - \sigma'_M}{(\sigma_B)_B + (\sigma_B)_M - \sigma'_M}. \quad (2.37)$$

Из рис. 2.6 следует, что с практической точки зрения разрабатывать и применять композиционные материалы с минимальной объемной долей волокна не имеет смысла, поскольку прочность таких материалов ниже прочности даже пластичной матрицы, т. е.  $(\sigma_B)_K < (\sigma_B)_M$ . Второй характерной для зависимости  $(\sigma_B)_K - V_B$  величиной является критическая объемная доля волокна  $V_{кр}$ . Эта величина соответствует такой объемной доле волокна, при которой прочность композиционного материала становится равной прочности матрицы. Естественно, что на практике имеет смысл применять такие композиты, у которых  $V_B > V_{кр}$ . Для количественного определения значения  $V_{кр}$  необходимо правую часть уравнения (2.35) приравнять значению предела прочности неармированной матрицы

$$(\sigma_B)_B V_{кр} + \sigma'_M (1 - V_{кр}) = (\sigma_B)_M. \quad (2.38)$$

Решение уравнения (2.38) относительно величины  $V_{кр}$  дает

$$V_{кр} = \frac{(\sigma_B)_M - \sigma'_M}{(\sigma_B)_B - \sigma'_M}. \quad (2.39)$$

В том случае если композиционный материал содержит хрупкую матрицу и пластичные волокна, зависимость  $(\sigma_B)_K - V_B$  будет



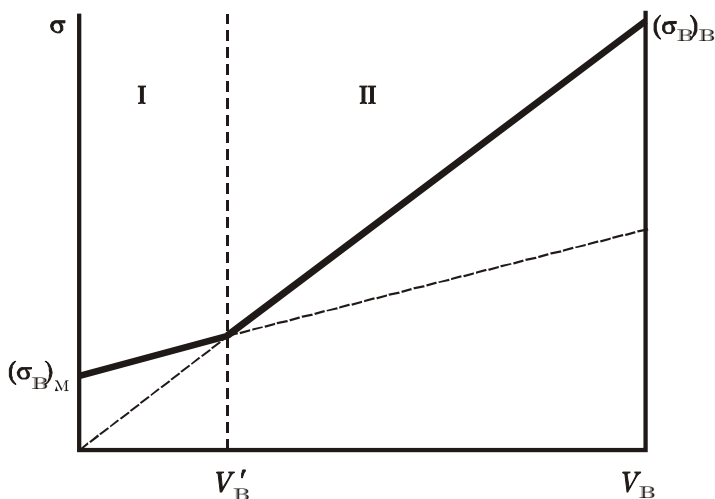


Рис. 2.7. Зависимость прочности композиционных материалов с хрупкой матрицей и пластичными волокнами от объемной доли волокон

иметь другой вид (рис. 2.7) [3]. Эта зависимость состоит из двух восходящих участков. Говорить о величинах  $V_{\min}$  и  $V_{\text{кр}}$  в данном случае не имеет смысла.

### 2.3. ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЖАТИИ

Композиционные материалы, армированные непрерывными волокнами, как правило, не должны работать в условиях действия сжимающих напряжений. Тем не менее имеет смысл рассмотреть особенности поведения композитов в этих условиях нагружения. Если композит представить в виде обладающих неограниченно большой прочностью упругих волокон (пластин), расположенных в пластичной матрице, то разрушение материала происходит в результате потери устойчивости волокон.

Возможна реализация двух механизмов разрушения композиции [1]. В том случае если волокна выгибаются в противоположных направлениях и образуется симметричная картина их выпучивания, разрушение материала является результатом растяжения матрицы в направлении, перпендикулярном к оси волокон (рис. 2.8, а) [1]. Если волокна изгибаются в одной фазе и речь идет

об асимметричной картине выпучивания (рис. 2.8, б), в основе разрушения композита лежит деформация сдвига матрицы.

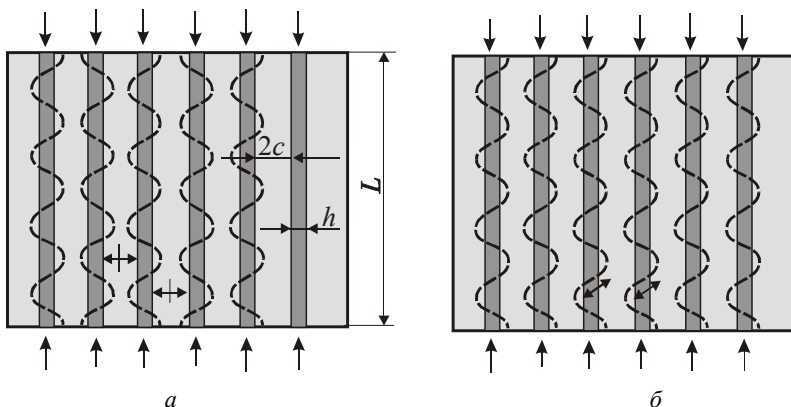


Рис. 2.8. Двухмерная модель сжатия гетерофазного слоистого материала:  
а – симметричное и б – асимметричное выпучивание волокон

Сжимающее напряжение, соответствующее потере устойчивости волокон при симметричном выпучивании волокон, определяется зависимостью [1]

$$\sigma_{\text{сж}} = 2V_{\text{В}} \sqrt{\frac{V_{\text{В}} E_{\text{М}} E_{\text{В}}}{3(1 - V_{\text{В}})}}, \quad (2.40)$$

а при асимметричном выпучивании

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{G_{\text{М}}}{1 - V_{\text{В}}}, \quad (2.41)$$

Критическая деформация композиционного материала  $\varepsilon_{\text{кр}}$ , соответствующая его разрушению по схеме симметричного выпучивания волокон, в первом приближении может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon_{\text{кр}} = 2 \left[ \frac{V_{\text{В}}}{3(1 - V_{\text{В}})} \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{E_{\text{М}}}{E_{\text{В}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.42)$$

При реализации механизма асимметричного выпучивания

$$\varepsilon_{\text{кр}} = \left[ \frac{1}{V_{\text{В}}(1 - V_{\text{В}})} \right] \frac{G_{\text{М}}}{E_{\text{В}}}. \quad (2.43)$$

На практике чаще реализуется механизм разрушения композиционных материалов, контролируемый развитием сдвиговой моды. Для повышения прочности материала при сжатии необходимо увеличивать жесткость волокон и матрицы, повышать прочность границы раздела между волокном и матрицей [1].

#### **2.4. ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Важнейшей характеристикой поведения конструкционных материалов является их трещиностойкость (вязкость разрушения), т. е. способность сопротивляться развитию трещин. Трещины, поры или другого рода несплошности в реальных конструкциях есть всегда, вопрос заключается лишь в размерах и устойчивости этих дефектов. Изучением поведения материалов, содержащих трещины, занимается механика разрушения.

Важнейшим достоинством композиционных материалов, содержащих высокопрочные армирующие элементы и вязкую матрицу, является эффективное перераспределение напряжений при разрушении отдельных волокон. Благодаря этому обеспечивается высокий уровень вязкости разрушения композитов.

Для разрушения композиционных материалов, являющихся существенно анизотропными объектами, характерен ряд особенностей. Одна из них заключается в том, что показатели вязкости разрушения композитов в значительной степени определяются направлением развития трещины. В анизотропном композиционном материале выделяются направления, обеспечивающие высокий и низкий уровень трещиностойкости. Как правило, трещина легко развивается вдоль границ сопряжения волокон и матрицы, т. е. многие композиты склонны к расслоению. Если же трещина развивается поперек волокон, то возможно достижение высоких значений трещиностойкости материала. В этой связи характер армирования должен четко соответствовать напряженному состоянию, реализующемуся во время эксплуатации изделия, изготовленного из композиционного материала.

К важнейшим технологическим дефектам композиционных материалов относят расслоения, возникающие на стадиях изготовления, транспортировки и эксплуатации материалов и изделий из них. Дефекты подобного рода могут быть вызваны температурными напряжениями, ударами, другими видами локального нагружения. Поверхностное отслоение характеризуется выпучиванием некоторого объема материала [6]. Некоторые примеры отслоений в слоистых композиционных материалах показаны на рис. 2.9 [6].

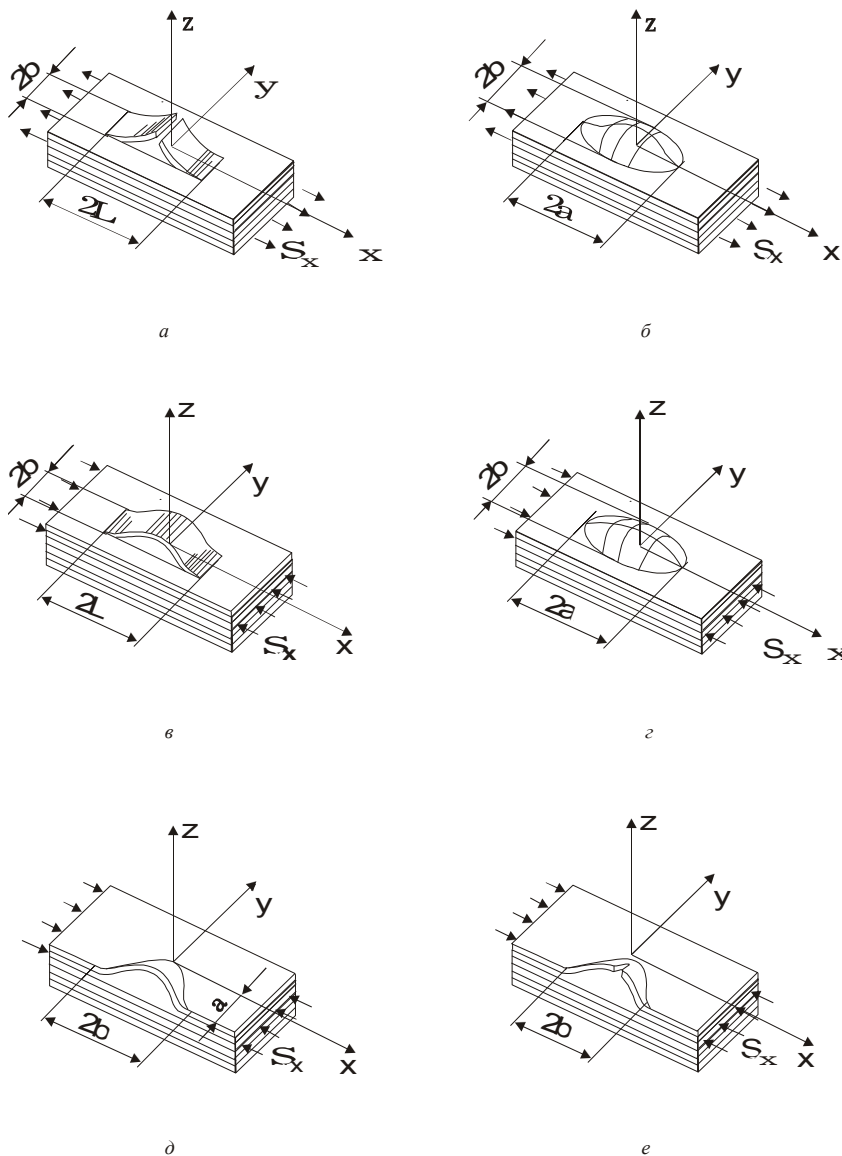


Рис. 2.9. Примеры отслоений в композиционных материалах:

*a* – открытое отслоение при растяжении; *б* – эллипсоидальное отслоение при растяжении; *в* – отслоение в условиях цилиндрического изгиба; *г* – эллипсоидальное отслоение при сжатии; *д* – кромочное отслоение; *е* – кромочное отслоение со вторичной трещиной

Причинами, вызывающими проявление дефектов данного типа, могут служить сжимающие напряжения или, например, поверхностный нагрев материала.

Расслоение композиционного материала вдоль границ сопряжения волокон с матрицей является одним из эффективных механизмов торможения трещин, развивающихся перпендикулярно волокнам [1]. Анализ напряженного состояния у вершины распространяющейся по материалу трещины, выполненный Дж. Гордоном и Дж. Куком, показал, что у вершины трещины развиваются растягивающие  $\sigma_{zz}$  и поперечные  $\sigma_{xx}$  напряжения (рис. 2.10) [1], соотношение между которыми описывается зависимостью вида  $\sigma_{zz} \approx 4\sigma_{xx}$ . В том случае, если при подходе трещины к границе раздела происходит расслоение материала, направление трещины меняется на  $90^\circ$ , т.е. трещина эффективно тормозится. Несущая способность материала при этом сохраняется.

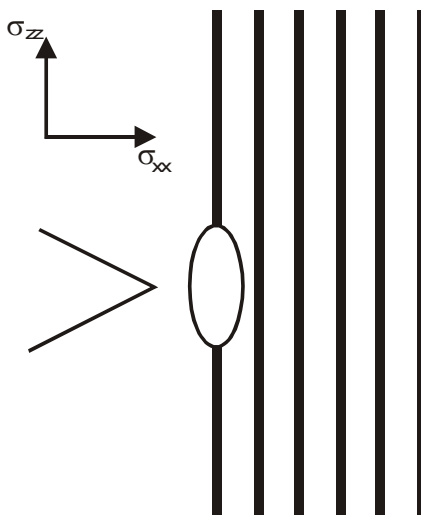


Рис. 2.10. Расслоение на границе раздела волокно–матрица при взаимодействии трещины с границей раздела

Траектория распространения трещины при межслойном разрушении определяется формой границы сопряжения между матрицей и упрочняющими элементами. Считается, что такой вид разрушения по характеру наиболее близок к видам разрушения, анализируемым в механике разрушения [6]. Поэтому для описания процессов межслойного разрушения обычно используют традиционные методы механики разрушения, разработанные для проведения испытаний металлических конструкционных материалов. В то же время данные испытаний реальных композиционных материалов показывают, что результаты такого рода расчетов следует считать верными лишь в первом приближении [6].

Для композиционных материалов характерно разнообразие механизмов разрушения [6]. Так, например, при деформации однонаправленного композита возможны разрыв волокон, образование трещин на границе сопряжения волокон с матрицей, разрушение

матрицы. Кроме того, реализуются процессы разрушения, сочетающие перечисленные явления. Два важнейших вида рассеянных повреждений однонаправленных композиционных материалов в условиях действия растягивающих напряжений, а именно единичные разрывы волокон и разрушение границы между матрицей и волокном, схематически приведены на рис. 2.11 [6]. Первый вид повреждений характеризуется отношением числа разрывов к общему числу элементов структуры в рассматриваемом объеме композиционного материала. Второй вид дефектов, связанный с разрушением границы между волокном и матрицей, определяется как отношение суммы длин поврежденных участков границы к общей длине волокон в анализируемом объеме материала.

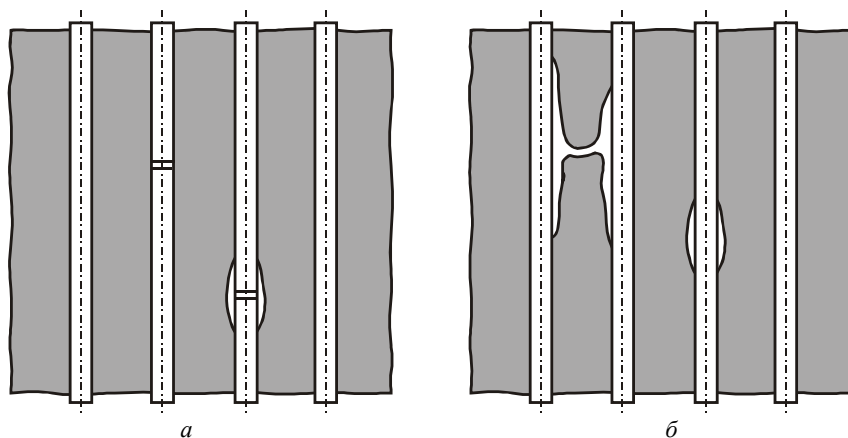


Рис. 2.11. Виды рассеянных повреждений однонаправленного волокнистого композита:

*a* – единичные разрывы волокон; *б* – разрушение границы матрица-волокно

Форма излома композиционного материала определяется его строением и условиями внешнего нагружения. В случае растяжения однонаправленного композиционного материала характерным является щеткообразный вид поверхности разрушения (рис. 2.12, *a*) [6]. При нагружении силой, направленной перпендикулярно к оси волокон, например при реализации схемы трехточечного изгиба композиционных материалов, разрушение сопровождается продольным растрескиванием образцов (рис. 2.12, *б*). В том случае если реализуется схема нагружения, приведенная на рис. 2.12, *в*, разрушение композита сопровождается развитием трещины вдоль плоскости сопряжения волокон и матрицы.

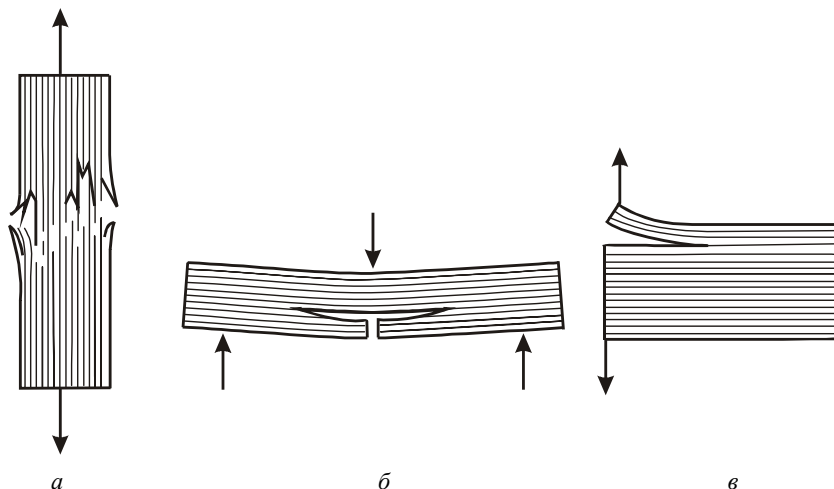


Рис. 2.12. Типы разрушения слоистых композитов:  
а – щеткообразное, б – продольное и в – межслойное растрескивание

При разработке моделей поведения композиционных материалов в различных условиях внешнего нагружения обычно предполагается, что волокна имеют правильную геометрическую форму и закономерным образом уложены в матрице. Кроме этого, вводятся и другие допущения, позволяющие упростить математические расчеты. Например, считается, что предел прочности всех волокон одинаков и что разрушение их происходит одновременно, при достижении определенного уровня напряжений. Такой подход к анализу процесса разрушения композиционных материалов считается слишком упрощенным [1]. Объектами, наиболее пригодными для описания их прочностных свойств с использованием уравнения аддитивности, являются композиционные материалы, состоящие из пластичной матрицы и прочных пластичных волокон. Образцы из таких материалов разрушаются из-за неустойчивости пластического течения с образованием шейки при одновременном разрыве всех волокон.

В реальных условиях из-за разброса свойств матрицы и отдельных волокон, из-за искривления волокон, дефектов их строения и неправильной упаковки в матрице, наличия дефектов в матрице и на границе сопряжения волокон с матрицей механические свойства композиционных материалов имеют случайную природу. Для хрупких волокон, расположенных в малопластичной матрице, как правило, характерен большой разброс прочности. Использование в

расчетах средних значений прочностных свойств приводит к большим погрешностям. Поэтому прогноз несущей способности конструкций, изготовленных из композиционных материалов, должен носить вероятностный характер [6]. С учетом этого при анализе поведения нагруженных композитов используются стохастические модели их разрушения.

Создание материалов, обладающих высоким уровнем трещиностойкости, – одна из наиболее важных задач современного материаловедения. При решении этой задачи учитывается, что трещиностойкость является величиной интегральной, определяемой одновременно прочностными свойствами и показателями пластичности материалов. Чем выше уровень прочности и пластичности материала, тем выше его вязкость разрушения. Исходя из этого обычно решается задача повышения трещиностойкости металлических конструкционных материалов.

Композиты отличаются от металлических материалов тем, что позволяют реализовать дополнительные эффективные механизмы повышения трещиностойкости. Эти механизмы связаны с положительным влиянием поверхностей раздела между матрицей и находящимися в ней волокнами. Поверхности раздела могут служить эффективными барьерами на пути распространяющихся трещин.

Выделяют по меньшей мере два механизма повышения трещиностойкости, характерных именно для композиционных материалов [1]. Действие этих механизмов может быть проиллюстрировано с помощью рис. 2.13 [1], на котором схематически показана трещина, распространяющаяся в композите перпендикулярно волокнам. Один из механизмов повышения трещиностойкости связан с разрушением границы раздела между матрицей и волокном. Этот процесс сопровождается определенными затратами энергии, следовательно ведет к росту вязкости разрушения. Процесс разрушения границ раздела развивается в непосредственной близости от вершины трещины. На рис. 2.13 эта зона обозначена буквой *D*.

Второй механизм повышения трещиностойкости композиционных материалов обусловлен вытягиванием волокон из матрицы. На рис. 2.13 зона вытягивания волокон, находящаяся на некотором расстоянии от вершины трещины, обозначена буквой *F*. При реализации этого механизма дополнительная работа затрачивается на преодоление сил трения между волокном и матрицей, результатом чего также является рост трещиностойкости композита.

Механизм повышения трещиностойкости, обусловленный вытягиванием волокон из матрицы, эффективен в том случае, если длина волокон меньше критической длины, либо равна ей ( $l \leq l_{кр}$ ).



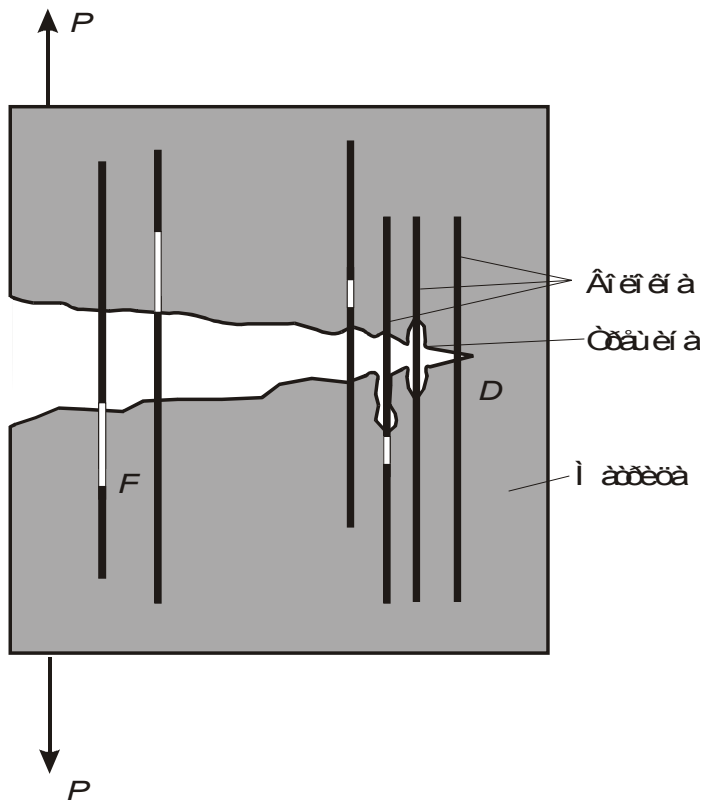


Рис. 2.13. Схематическое изображение трещины в композиционном материале, распространяющейся перпендикулярно к волокнам

В противном случае происходит не вытягивание волокон, а преимущественно их разрыв в матрице. Графически зависимость работы разрушения  $W_{\text{вв}}$  композиционных материалов по механизму вытягивания волокна от длины волокон отражена на рис. 2.14 [23]. Отмеченный механизм повышения трещиностойкости эффективен и в том случае, если даже оба, входящих в состав композиционного материала компонента, т. е. и матрица, и волокно, хрупкие [1]. Армирование хрупкой матрицы дискретными хрупкими волокнами длиной меньше критической служит радикальным методом повышения вязкости разрушения композитов, поскольку затраты энергии на вытягивание волокна из матрицы существенно превосходят работу разрушения каждого компонента в отдельности.

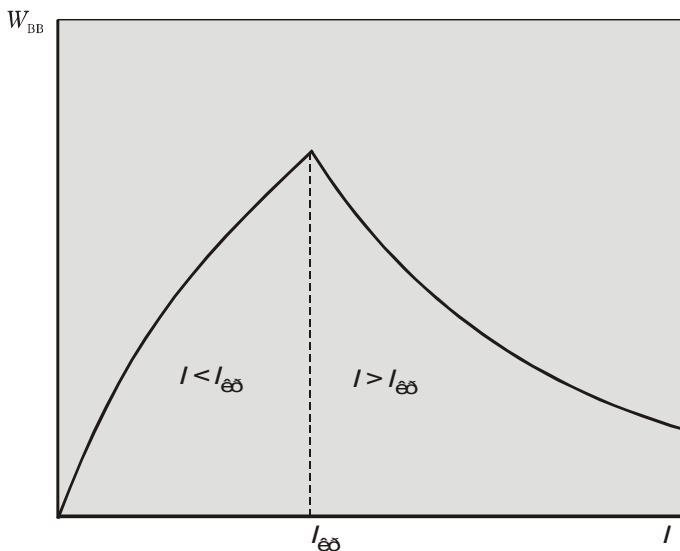


Рис. 2.14. Зависимость работы разрушения композиционного материала  $W_{\text{вв}}$  по механизму вытягивания волокна от длины волокна  $l$  [23]

Наиболее высокий уровень затрат энергии  $W_{\text{max}}$ , связанной с вытягиванием волокон из матрицы, имеет место в том случае, если длина дискретных волокон равна критической длине ( $l = l_{\text{кр}}$ ):

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{12} V_{\text{в}} (\sigma_{\text{в}})_{\text{в}} l_{\text{кр}}. \quad (2.44)$$

Анализ уравнения (2.44) показывает, что для повышения работы разрушения, связанной с реализацией механизма вытягивания волокон из матрицы, следует увеличивать объемную долю волокон  $V_{\text{в}}$ , их предел прочности  $(\sigma_{\text{в}})_{\text{в}}$  и критическую длину  $l_{\text{кр}}$ . В связи с тем, что критическая длина волокна пропорциональна его диаметру  $d_{\text{в}}$  и обратно пропорциональна прочности границы раздела между волокном и матрицей  $\tau_{\text{гр}}$  (см. зависимость (2.29)), затраты энергии на разрушение композита могут быть повышены за счет увеличения диаметра волокна и уменьшения величины  $\tau_{\text{гр}}$ . Однако в последнем случае происходит потеря прочностных свойств композиционного материала в условиях сдвига, сжатия и растяжения в направлении, перпендикулярном оси волокон. Поэтому для повышения вязкости разрушения анализируемых композиционных материалов (хрупкая матрица – хрупкое волокно) предпочтительно увеличение диаметра армирующих волокон. Технологически оправданным

считается использование волокон диаметром 0,05...0,5 мм [1]. В тех случаях когда используются оптимальные по параметрам дискретные волокна, ударная вязкость композитов с керамической матрицей за счет явления вытягивания волокон может быть увеличена в десятки раз.

В том случае если композиционный материал состоит из хрупкой матрицы и пластичного волокна, характер разрушения композита в значительной степени определяется влиянием волокон. Трещина, легко перемещаясь по хрупкой матрице, может быть заторможена пластичным волокном. Для расчета критического значения коэффициента интенсивности напряжений может быть использована зависимость следующего вида [1]:

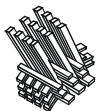
$$K_c = \left[ \frac{2E_K}{(1-\nu_K)^2} (1-V_B)\gamma_M + \frac{V_B(\sigma_B)^3 d_B}{12\tau E_B} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.45)$$

где  $E_K$  и  $\nu_K$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона композиционного материала;  $E_B$  и  $(\sigma_B)_B$  – модуль Юнга и предел прочности волокна;  $\tau$  – прочность на сдвиг границы раздела между матрицей и волокном;  $\gamma_M$  – поверхностная энергия матрицы.

В соответствии с зависимостью (2.45) для увеличения трещиностойкости композиционного материала целесообразно увеличивать диаметр волокна, его объемную долю и прочностные свойства. Возможно также снижение прочности границы раздела между матрицей и волокном, однако использовать эту возможность необходимо в разумных пределах, поскольку одновременно с повышением трещиностойкости снижаются прочностные свойства композиционного материала.

Трещиностойкость композиционных материалов, содержащих пластичную матрицу и хрупкое волокно, может быть увеличена за счет повышения трещиностойкости матрицы и реализации механизма вытягивания волокон из матрицы. Следовательно, такие материалы должны содержать дискретные волокна длиной, равной или меньшей критической.

Таким образом, анализ особенностей поведения композиционных материалов в условиях внешнего нагружения свидетельствует о том, что механизмы разрушения композитов другие, нежели в традиционных металлических конструкционных материалах. Используя особенности технологии получения и реального строения композиционных материалов, во многих случаях можно найти эффективные пути повышения их трещиностойкости.



### **3. КОМПОНЕНТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1. МАТРИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

##### **3.1.1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ**

При изготовлении металлических композиционных материалов в качестве матрицы применяют алюминий, титан, магний, медь, никель, кобальт и другие материалы.

Алюминий, а также деформируемые и литейные сплавы на его основе наиболее часто применяются при изготовлении композитов. Алюминий используется при получении композитов как жидко-, так и твердофазными методами [3]. При изготовлении композиционных материалов твердофазными способами широко применяют деформируемые алюминиевые сплавы. Примерами таких сплавов являются АМг2, АМг3, АМг5, Д1, Д16, АК4, В94 и др. Достоинства деформируемых алюминиевых сплавов: малая плотность, высокий уровень механических свойств, высокая технологическая пластичность.

Для получения композитов жидкофазными методами (литьем, пропиткой) применяют литейные алюминиевые сплавы. Эти сплавы отличаются повышенной жидкотекучестью, малой линейной усадкой, пониженной склонностью к образованию трещин при повышенных температурах. Химический состав некоторых матричных материалов на основе алюминия приведен в табл. 3.1.

Композиционные материалы на основе алюминия могут быть получены методами порошковой металлургии и газотермического напыления [3]. Для реализации этих методов используют алюминиевые порошки и порошки из алюминиевых сплавов, например АПП (порошок из первичного алюминия), АПВ (из вторичного алюминия), АСД-1 (дисперсный порошок), АСД-Г (дисперсный порошок с добавкой титана).

К твердофазным методам получения композитов относят диффузионную сварку. Этот метод основан на использовании в качест-

Таблица 3.1

**Химический состав матричных литейных алюминиевых сплавов**

Марка материала	Химический состав, %				
	Al	Mg	Si	Mn	Cu
АЛ1	93,25...93,50	1,25...1,75	0	0	3,75...4,5
АЛ2	87...90	0	10,0...13,0	0	0
АЛ3	91...93,05	0,35...0,6	4,5...5,5	0,6...0,9	1,5...3,0
АЛ9	91,6...93,8	0,2...0,4	6-8	0	0
АЛ13	92,8...94,6	4,5...5,5	0,8...1,3	0,1...0,4	0
АЛ19	93,35...94,75	0	0	0,6...1,0	4,5...5,3

ве матричного материала технической фольги алюминия или его сплавов. Техническая алюминиевая фольга в соответствии с ГОСТ 618-73 выпускается в рулонах шириной до 960 мм. Толщина фольги составляет 5...200 мкм. Для ее изготовления используется алюминий марок АД1, А99, А97, А95 и др. Возможно применение алюминиевой пищевой фольги, выпускаемой по ГОСТ 745-79. Для производства композитов используют и высокопрочные сложнолегированные деформируемые алюминиевые сплавы.

Для реализации технологии сварки взрывом применяют листы из алюминия (А0, АД0, АД1) и его сплавов (АМц, АМг2, АМг3, АМг5, Д12 и др.) толщиной до 2,5 мм. Возможно применение неплакированных и плакированных листов в отожженном (обозначение М), полунагартованном (1/2Н), нагартованном (Н), закаленном и естественно состаренном (Т), естественно состаренном после закалки и дополнительно нагартованном (ТН) состоянии.

Высокой удельной прочностью, малой плотностью и другими важными достоинствами обладают магниевые сплавы. Эти достоинства объясняют интерес специалистов к магнию как к материалу, применение которого эффективно в качестве матрицы металлических композитов [3]. Важен тот факт, что магний практически не реагирует со многими материалами, используемыми для изготовления упрочняющих волокон. Для изготовления композитов применяют технический магний и сплавы на его основе МЛ12, ИМВ2, АЗ31В и др.

Для производства композиционных материалов перспективно применение титана и его сплавов в качестве металлической матрицы. Высокая удельная прочность таких сплавов позволяет широко использовать их в самолетостроении и космической технике. Ар-

мируя титан и его сплавы высокомодульными волокнами, можно обеспечить высокую жесткость композиционных материалов. Для производства композитов применяют технический титан марок ВТ1-0, ВТ1-00, сплавы типа ВТ6С, ВТ22 и др. Эти материалы используются в виде фольги и порошка.

Существенным недостатком меди, ограничивающим ее применение, является низкий уровень прочностных свойств при повышенных температурах. При производстве композиционных материалов возможно устранение этого недостатка за счет армирования меди волокнами вольфрама, железа, графита.

Широкое применение в качестве матричного материала при производстве композитов нашли сплавы на основе никеля [3]. Недостатком композиционных материалов на основе технически чистого никеля является их низкая жаростойкость. Для устранения этого недостатка применяют окалиностойкие жаропрочные никелевые сплавы. Это окалиностойкие сплавы системы Ni-Cr, жаропрочные деформируемые и литейные сплавы. Высокий уровень длительной прочности, сопротивления ползучести и усталости деформируемых сплавов достигается введением титана и алюминия, образующих дисперсные частицы интерметаллидов типа  $Ni_3Ti$  и  $Ni_3Al$ , а также легированием тугоплавкими элементами (W, Mo, Nb), упрочняющими твердый никелевый раствор. Особенность литейных жаропрочных сплавов на основе никеля – большее содержание тугоплавких элементов. Благодаря этому их применение эффективно вплоть до 1100 °С. Существенным недостатком является низкий уровень пластичности литейных сплавов. В качестве упрочнителя сплавов на основе никеля могут служить вольфрамовые волокна. Композиционные сплавы на основе никелевых сплавов получают с помощью жидкофазных и твердофазных методов, а также методами порошковой металлургии.

При производстве композитов в качестве матричного материала возможно применение сплавов на основе кобальта. Кобальт и его сплавы применяют в виде порошков, ленты, расплава или частиц, наносимых газодиффузионными методами. От никелевых кобальтовые сплавы отличает меньшая прочность при повышенных температурах, что объясняется отсутствием интерметаллидного упрочнения. Различают литейные и деформируемые сплавы на основе кобальта. При получении композитов методы пластической деформации применимы к деформируемым сплавам. Жидкофазные методы получения композиционных материалов пригодны как для литейных, так и для деформируемых сплавов [3].

### 3.1.2. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТРИЦЫ

Полимерную матрицу для композиционных материалов выбирают, учитывая условия эксплуатации изделий. От матрицы зависят многие свойства композита, в том числе прочность, тепло- и влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред. В зависимости от типа полимерной матрицы выбирают и метод получения полимерного композиционного материала.

При производстве полимерных композиционных материалов полимеры в качестве матрицы используют либо в чистом виде (порошки, гранулы, листы, пленки), либо в виде связующих [3]. Связующее представляет собой двух- или многокомпонентную систему из синтетической смолы и отвердителей или инициаторов, катализаторов, ускорителей отверждения. В связующее могут добавляться растворители, красители, пластификаторы, стабилизаторы и другие компоненты. Цель введения этих компонентов заключается в придании связующим и полимерным композиционным материалам необходимых технологических и эксплуатационных свойств.

При производстве армированных пластиков наиболее часто применяют следующие связующие: полиэфир, фенолы, эпоксидные компаунды, силиконы, алкиды, полиамиды, фторуглеродные соединения, акрилы, полипропилен, полиэтилен, полистирол [4]. Наибольшее распространение получили терморезистивные связующие, при нагревании которых происходят необратимые структурные и химические превращения. Механические и физические свойства некоторых типов полимерных матриц, используемых для изготовления композитов, приведены в [3]. Ниже дана краткая характеристика основных типов полимеров, нашедших применение при изготовлении ПКМ [3].

**Полиэтилен** – один из наиболее широко применяемых полимеров. Промышленно выпускается полиэтилен низкого давления (ПЭНД) и полиэтилен высокого давления (ПЭВД). Деструкция материала происходит при температуре выше  $290^{\circ}\text{C}$ . Солнечная радиация ведет к термостарению полиэтилена. Прочность, теплостойкость и химическая стойкость ПЭНД выше, чем ПЭВД. Газопроницаемость, наоборот, выше у ПЭВД. При комнатной температуре полиэтилен устойчив к действию разбавленных серной и азотной кислот, концентрированной соляной, фосфорной и плавиковой кислот. Для полиэтилена высокого давления водопоглощение за 30 суток составляет  $0,022\%$ , для ПЭНД –  $0,005\ldots 0,04\%$ .

ПЭВД перерабатывается литьем под давлением ( $T = 150\ldots 200^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 100$  МПа), экструзией ( $T = 110\ldots 180^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 8\ldots 10$  МПа), прессо-

ванием ( $T = 130...150$  °С,  $p = 4...10$  МПа), хорошо сваривается, обрабатывается механически. ПЭНД перерабатывается экструзией ( $T = 180...260$  °С), литьем под давлением ( $T = 200...270$  °С,  $p = 120$  МПа), прессованием ( $T = 145...180$  °С,  $p = 6...10$  МПа).

**Полипропилен** хорошо выдерживает изгиб, обладает высокой износостойкостью. В отсутствие воздуха термодеструкция проявляется при 300 °С. Полипропилен устойчив к действию многих кислот и щелочей. Водопоглощение при 20 °С за 6 месяцев составляет 0,5 %. Концентрированная серная кислота слабо разрушает полипропилен при комнатной температуре и катастрофически при – 60 °С. К действию сильных окислителей полипропилен неустойчив. Полипропилен перерабатывается литьем под давлением ( $T = 200...220$  °С,  $p = 35...42$  МПа), экструзией, вакуумформованием, пневмоформованием, раздувом, сваркой, прессованием, напылением, обрабатывается резанием.

**Полистирол** – хрупкий полимер, обладающий высокой радиационной стойкостью, легко подвергающийся старению. Промышленностью выпускается полистирол блочный (марки ПСМД и ПСМ), суспензионный (ПС-С, ПС-СП), эмульсионный (ПСЭ-1, ПСЭ-2). Предел прочности составляет 35...45 МПа. Термическая деструкция начинается при температуре выше 266 °С. Полистирол устойчив к действию некоторых минеральных и органических кислот, щелочей, трансформаторного масла, разрушается концентрированной азотной и уксусной кислотами. Технологии переработки полистирола: литьем под давлением ( $T = 160...230$  °С,  $p = 80...120$  МПа), экструзией, вакуумформованием, пневмоформованием.

**Политетрафторэтилен** – это линейный полимер, имеющий химическую формулу  $[-CF_2-CF_2-]_n$ . В разных странах выпускаются следующие марки политетрафторэтилена: фторопласт-4 (Россия), тефлон (США), полифлон (Япония) и др. В нашей стране выпускаются различные модификации фторопласта: фторопласт-4Д, фторопласт-4М, фторопласт-40 и др.

Фторопласт-4 обладает свойствами самосмазки, имеет низкий коэффициент трения. Это наиболее химически стойкий полимер, не подверженный действию грибков. Для него характерна высокая стойкость к действию высококонцентрированных и разбавленных кислот и щелочей, сильных окислителей.

Фторопласт-4 перерабатывается спеканием предварительно спрессованных таблеток. После предварительной специальной обработки полимер обрабатывается резанием (при высоких скоростях и малых подачах), сваривается и склеивается. Некоторые модификации фторопласта перерабатываются методами порошковой



металлургии, прессованием, экструзией, литьем под давлением, напылением.

**Полиметиленоксид** – линейный полимер, имеющий химическую формулу  $[-\text{CH}_2\text{-O-}]_n$ .

За рубежом полиметиленоксид известен под названием «ацетальные, или полиацетальные, смолы». Полиметиленоксид хорошо сопротивляется усталостным и динамическим знакопеременным нагрузкам, обладает низкой ползучестью, высокой износостойкостью. Коэффициент трения по стали составляет 0,2...0,35. При переработке полиметиленоксида используют метод литья под давлением, экструзию. Температура переработки составляет 180... 240 °С. Материал хорошо обрабатывается резанием.

**Полифениленсульфид** характеризуется высокой термостойкостью, устойчивостью к окислению, радиационной стойкостью. По химической стойкости уступает лишь политетрафторэтилену. Изделия из полифениленсульфида могут длительное время эксплуатироваться при 260 °С, полное разложение происходит при 720 °С. Механические и физические свойства полимера при 260 °С сохраняются неизменными после выдержки в течение 200 ч.

Полифениленсульфид перерабатывается литьем под давлением ( $T = 300...360$  °С,  $p = 75...150$  МПа), прессованием ( $T = 340...400$  °С,  $p = 10...70$  МПа), плазменным напылением, пропиткой тканей.

**Полифениленоксид** – простой ароматический полиэфир линейного строения. В нашей стране известен как арилокс, в США – норил. Полифениленоксид может многократно без изменения свойств перерабатываться на литьевых машинах, отличается высокой технологичностью. Полимер нетоксичен, стоек к агрессивным средам, грибковой плесени. Перерабатывается по технологии литья под давлением, экструзией. Из полифениленоксида можно получать тонкостенные изделия сложной формы.

**Полиэтилентерефталат** – сложный линейный ароматический полиэфир терефталевой кислоты. В нашей стране хорошо известен как лавсан. Полимер отличается низким коэффициентом трения и гигроскопичностью. Для изделий, изготовленных из него, характерна стабильность формы. Полиэтилентерефталат устойчив к действию слабых кислот, минеральных солей, эфиров, жиров. В изделия полимер перерабатывается по технологии литья под давлением.

**Поликарбонаты** – это сложные полиэфиры угольной кислоты и диоксисоединений. В России поликарбонаты выпускаются под маркой «дифлон». Полимер оптически прозрачен, устойчив к действию ультрафиолетового излучения, обладает низкой гигроско-

пичностью, стойкостью к действию микроорганизмов. Для изделий, изготовленных из него, характерна высокая стабильность размеров. Поликарбонаты перерабатываются в изделия всеми методами, используемыми для переработки термопластичных полимеров. Температура переработки составляет 240...300 °С. Полученные из поликарбонатов изделия свариваются, склеиваются, обрабатываются резанием, соединяются заклепками и гвоздями.

**Полиарилаты** – сложные ароматические полиэферы двухатомных фенолов. В нашей стране выпускаются под марками Д-3, Д-4, Д-3Э, Д-4С и др. Обладают высокой прочностью и термостойкостью. В некоторых случаях успешно конкурируют с конструкционными металлическими материалами. Температура термического разложения полиарилатов составляет 420 °С. Эти полимеры устойчивы к действию ультрафиолетового и ионизирующего излучения, к длительному воздействию разбавленных минеральных и органических кислот, бензина, керосина. В зависимости от марки полиарилаты перерабатываются в изделия литьем под давлением, литьевым и компрессионным прессованием, экструзией, формованием с раздувом.

**Полиоксibenзоаты** характеризуются высокой термостойкостью, не плавятся вплоть до температуры разложения (~ 550 °С). Кристаллическая структура полимеров сохраняется до температуры 530 °С. Полиоксibenзоаты являются износостойкими материалами, устойчивыми к коррозии. Они эффективны для изготовления полимерных композиционных материалов, предназначенных для работы при ~ 300 °С. Изделия из полиоксibenзоатов получают спеканием порошкообразного полимера.

**Полиимиды** в России выпускаются в виде пресс-порошков марок ПМ-67, ПМ-69. Физико-механические свойства полиимидов стабильны в широком температурном интервале (от – 200 °С до +300 °С). Коэффициент трения по стали составляет 0,05...0,17. Для изделий, изготовленных из полиимидов, характерны высокая стабильность размеров, низкая ползучесть при высоких температурах, высокая термостойкость и устойчивость к действию гамма-излучения, быстрых электронов и нейтронов. Разбавленные кислоты на полиимиды влияния почти не оказывают. Пресс-порошки полиимидов перерабатываются методами прямого прессования, компрессионного прессования, литья под давлением, горячего прессования.

**Полиамиды** в нашей стране хорошо известны по маркам «капрон», «найлон-7», «найлон-11» и др. Для этих полимеров характерны высокая усталостная прочность, износостойкость, удар-

ная вязкость, низкая гигроскопичность, стабильность свойств при повышенных температурах, резко выраженная температура плавления. Полиамиды устойчивы к действию органических растворителей. Основные способы получения изделий из алифатических полиамидов – литье под давлением и экструзия. Ароматические полиамиды перерабатываются методом прямого прессования с предварительным подогревом.

**Эпоксидные смолы** представляют собой олигомеры или полимеры, содержащие в молекуле не менее двух эпоксидных или глицидиловых групп. Способны превращаться в полимеры пространственного строения [3]. Неотвержденные смолы являются термопластичными вязкими жидкостями или хрупкими твердыми веществами. Отвердителями смол служат мономерные, олигомерные и полимерные соединения различных классов. Эпоксидные смолы отверждаются как без подвода тепла, так и при нагревании, даже в воде. Смолы обладают высокой стойкостью к действию щелочей, солей, окислителей, органических растворителей. Промышленностью выпускаются эпоксидно-диановые смолы (ЭД-10, ЭД-14, ЭД-16, УП-614 и др.), эпоксиноволачные смолы (ЭН-6, 5Н, 6Э18Н60 и др.), циклоалифатические эпоксидные смолы (УП-612, УП-632, УП-648 и др.). Полимерные композиционные материалы, изготовленные на основе эпоксидных смол, обладают высокими механическими свойствами.

Технология изготовления материалов на основе эпоксидных смол заключается в пропитке волокон, тканей, нетканых волокнистых материалов, бумаги и др. После отверждения обрабатываются методами прямого прессования, контактного формования, вакуумного формования и др. Температура переработки составляет 20...180 °С.

**Фенолформальдегидные смолы** – это полимеры, представляющие собой продукты поликонденсации фенолов с формальдегидом. В зависимости от условий поликонденсации образуются резольные (терморективные) или новолачные (термопластичные) фенолформальдегидные смолы.

В неотвержденном состоянии фенолформальдегидные смолы представляют собой хрупкую прозрачную аморфную массу, переходящую при 60...120 °С в жидкое состояние. Свойства резольных смол со временем изменяются, новолачные смолы в отсутствие влаги при хранении стабильны.

Максимальная температура отверждения смол лежит в диапазоне 140...200 °С. Продукты отверждения смол – резиты. Это хрупкие материалы с некристаллической структурой, обладающие

высокими прочностными, электроизоляционными, антикоррозионными свойствами. Резиты устойчивы к действию большинства кислот. Температура деструкции фенолформальдегидных смол выше 300 °С.

Переработка фенолформальдегидных смол при производстве полимерных композиционных материалов включает пропитку тканых и нетканых волокнистых наполнителей, бумаги и других материалов. После отверждения обрабатываются методами прямого и литьевого прессования, литья под давлением, экструзии, вакуумного формования.

**Фурановые смолы** представляют собой олигомерные продукты, содержащие в молекулах фурановый цикл и способные превращаться в присутствии катализатора и (или) при нагревании в трехмерные полимеры. Фурановые смолы отверждаются так же, как фенолформальдегидные. Промышленностью выпускаются фурановые смолы марок ФА, ФЛ, ФАЭД и др. Продукты отверждения фурановых смол являются тепло-, кислото- и щелочестойкими материалами, их разложение происходит при температурах выше 300 °С. Технология переработки фурановых смол в полимерные композиционные материалы заключается в пропитке наполнителей типа тканей, волокон и др. После отверждения обрабатываются методами прямого прессования, автоклавного формования и др.

**Кремнийорганические полимеры (силиконы, полиорганосиликоны)** представляют собой термостойкие высокомолекулярные элементоорганические соединения, содержащие в составе элементарного звена макромолекулы атомы кремния и углерода. Промышленностью выпускаются кремнийорганические смолы К-41, К-44, КО-916, КО-946 и др. Полимеры устойчивы к действию большинства кислот и щелочей. Смолы перерабатываются в полимерные композиционные материалы путем пропитки наполнителей с последующим отверждением. Изделия изготовляют методами прямого прессования, контактного формования и др.

### 3.1.3. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ

В настоящее время термин «керамика» толкуют неоднозначно. Так, различают обычную и техническую керамику. В состав обычной керамики входят силикаты ( $\text{SiO}_2$ ), поэтому промышленность, выпускающую обычную керамику, иногда называют силикатной [27]. В технике используется керамика специального назначения (техническая керамика), в состав которой входят различные оксиды, карбиды, нитриды, бориды, силициды, сульфиды. Известны

примеры разработки керамик смешанного типа. Например, на основе двух типов керамик – ионной оксидной  $Al_2O_3$  и ковалентной бескислородной  $Si_3N_4$  – был создан эффективный материал «сиалон» общей формулы  $Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$ . Из керамики этого типа изготовлены опытные образцы блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных лопаток и других деталей [23].

В некоторых случаях к классу керамических материалов условно относят и материалы, называемые керметами. Керметы (керамикометаллические материалы) получают методами порошковой металлургии. Они включают керамическую (более 50 % по объему) и металлическую составляющие [29]. Наиболее широкое распространение получили керметы типа оксид алюминия – металл, например хром. Кроме оксида алюминия в качестве керамической составляющей в керметах могут быть использованы окислы магния, бериллия, титана, циркония, хрома и других элементов. Металлической составляющей служат никель, кобальт, железо, некоторые металлические сплавы.

Иногда под керамикой понимают твердое вещество, характеризующееся неметаллической природой связи и неполимерной (цепочечной) структурой, т. е. керамикой является все, что не является металлом и полимером [26]. В атомной структуре керамических материалов встречаются два типа химической связи между атомами: ионная и ковалентная.

По функциональному назначению различают механо-, термо-, электро-, магнето-, опто-, хемо-, био-, ядерную и сверхпроводящую керамику [10]. В данном учебнике большее внимание уделяется механокерамике и термокерамике. Основными свойствами механокерамики являются твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, триботехнические свойства, коэффициент линейного термического расширения, термостойкость. Обеспечивают эти свойства соединения  $Si_3N_4$ ,  $ZrO_2$ ,  $SiC$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ,  $TiC$ ,  $TiN$ ,  $WC$ ,  $B_4C$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BN$ . Термической керамике свойственны жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность. В качестве керамической составляющей используют  $SiC$ ,  $TiC$ ,  $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $BeS$ ,  $CeS$ ,  $BeO$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO$ . Свойства некоторых видов оксидной и бескислородной керамики приведены в табл. 3.2 [23].

В качестве примеров керамических материалов, успешно применяющихся на практике, можно назвать: карбид кремния (защита графита от окисления, вкладыши сопел пороховых и некоторых жидкостно-реактивных двигателей, абразив); карбид титана (жаропрочные материалы для изготовления деталей реактивной и атом-

## Свойства некоторых типов оксидной и бескислородной керамики

Керамика	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Твердость по Моосу	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, Е, ГПа
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (корунд)	3900	2050	9	140...265	350...490
ZrO <sub>2</sub> (стабилизированная керамика)	5600	2500...2600	7–8	148...130 (20...1500)	172...96 (20...1350)
BeO	3000	2570	9	105...280 (20...1200)	274...70 (20...1200)
MgO	3580	2680	6	98...42 (25...1300)	300...220 (25...1300)
SiC (карбид кремния, карборунд)	3200	2600	9,2...9,5	155	394
ZrB <sub>2</sub> +10 % Mo <sub>2</sub> Si	5500	2370	–	–	450
BN	2340	2350	1–2	50...110 (25)	~ 10 (1000)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (нитрид кремния горячепрессованный)	3190	1900	–	–	317
MoSi <sub>2</sub>	6240	2030	–	60 (1100)	430

В скобках указан температурный интервал, °С, при котором измерялись свойства.

ной техники); диборид циркония (кромки летательных аппаратов и сопел двигателей; нитрид бора (обтекатели антенн и электронного оборудования летательных аппаратов).

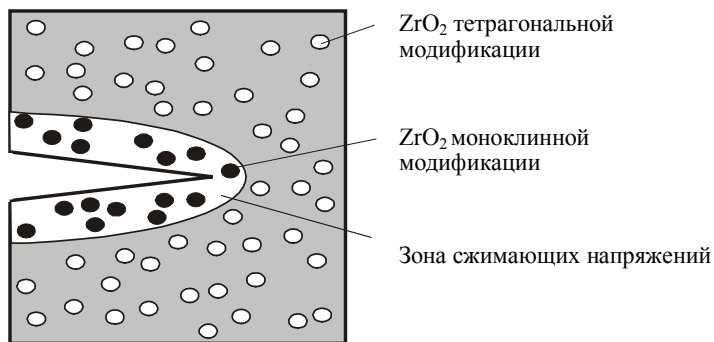
В настоящее время в промышленности используется большое количество керамических материалов. В зависимости от практической необходимости разрабатывают новые виды керамики. Для этого имеются достаточно широкие возможности. В качестве примера можно привести хорошо известные данные по изменению свойств керамики на основе оксида алюминия. Твердые зерна  $Al_2O_3$ , известные как корунд, используются в качестве абразивного материала. Примеси хрома придают оксиду алюминия красную окраску. Этот минерал широко известен как рубин. Если в оксид добавить титан, то можно получить сапфир (обычно синего, голубого цвета [28]). Благодаря примесям, сапфиры и рубины отличаются между собой оптическими свойствами и могут быть использованы в оптоэлектронике, в качестве рабочих тел оптических квантовых генераторов (лазеров). В зависимости от состава и структуры изменяются и другие важные свойства керамических материалов.

Техническая керамика – третий по частоте применения промышленный материал. Ориентировочно годовой экономической эффект от применения технической керамики в США составляет 3 млрд. долл. [10].

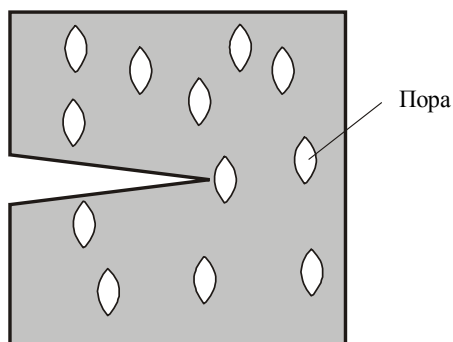
Основными достоинствами керамических материалов являются высокие температуры плавления, высокие прочностные свойства в условиях действия сжимающих напряжений, химическая стойкость в агрессивных средах. К современным керамическим материалам конструкционного назначения предъявляются и другие требования. Речь идет в первую очередь об обеспечении высоких прочностных свойств, повышенной ударной вязкости и других свойствах, характерных для металлических конструкционных материалов.

Основным недостатком конструкционной керамики, сдерживающим ее широкое распространение как конструкционного материала, является низкий уровень трещиностойкости (вязкости разрушения). Вязкость разрушения керамики составляет  $\sim 1 \dots 2 \text{ МПа/м}^{1/2}$ . Для металлических материалов характерны значения более  $\sim 40 \text{ МПа/м}^{1/2}$  [10, 26]. Низкая трещиностойкость керамики обусловлена высокой прочностью химических связей, характерных для нее. Материалы, обладающие ковалентным типом связи, как правило, являются прочными и хрупкими.

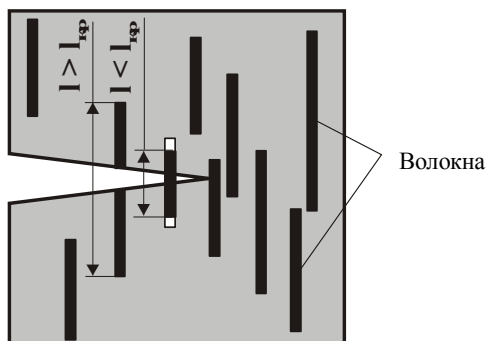
Методы повышения трещиностойкости технической керамики основаны на оптимизации параметров структуры исходных порош-



а



б



в

Рис. 3.1. Схемы механизмов повышения трещиностойкости конструкционной керамики:

а – замена тетрагональной модификации ZrO<sub>2</sub> на моноклинную; б – затупление острия трещины при ее встрече с порой; в – введение армирующих волокон



ков, технологии формования и спекания материала. Это традиционные для материаловедения методы. Повышению трещиностойкости способствует также разработка методов торможения трещины под нагрузкой [10]. В частности, этот подход реализуется при использовании керамических материалов на основе диоксида циркония  $ZrO_2$ . Обнаружено, что в условиях приложения давления структура диоксида циркония изменяется: исходная структура с тетрагональной модификацией  $ZrO_2$  преобразуется в моноклинную. Моноклинная модификация имеет объем на 3...5 % больший, чем тетрагональная. Поэтому если в керамике распространяется трещина, то возникшие при этом объемы  $ZrO_2$  моноклинной модификации, расширяясь, сжимают трещину. Результатом такого воздействия становится повышение трещиностойкости керамики до  $\sim 15 \text{ МПа/м}^{1/2}$ . Схематически этот механизм отражен на рис. 3.1, а [10].

Другой метод повышения трещиностойкости технической керамики основан на образовании в керамической матрице пустот (неплотностей), радиус которых гораздо больше по сравнению с радиусом при вершине распространяющейся трещины. Если трещина входит в пору, то ее вершина становится тупой (рис. 3.1, в) [10]. В результате трещиностойкость материала возрастает. Управляя геометрическими параметрами пустот, их формой и объемной долей, можно достаточно эффективно влиять на уровень трещиностойкости керамики.

Нестандартным методом повышения трещиностойкости технической керамики является армирование материала упрочняющими волокнами. Высокопрочные тонкие волокна, расположенные перпендикулярно направлению распространения трещины, испытывают растягивающие напряжения. Препятствуя раскрытию трещины, волокна фактически обеспечивают рост трещиностойкости керамической матрицы (рис. 3.1, б [10]). В том случае если волокна имеют длину, меньшую критической, и поэтому в процессе нагружения материала не разрушаются, а отслаиваются от керамической матрицы, то в результате этого вязкость разрушения также возрастает, поскольку на вытягивание волокна из керамики требуется затратить дополнительную энергию.

Несмотря на повышенную хрупкость большинства керамических материалов, некоторые их виды используются как ударопрочные. Возможность такого применения керамики обусловлена высокими значениями твердости, модуля упругости, температуры плавления, низкой плотностью. Высокими критериями бронестойкости обладают карбид бора  $B_4C$  и диборид титана  $TiB_2$ . Пластины из диборида титана применяют для защиты от бронебойных и бро-

непрожигающих снарядов. Об эффективности использования керамики как ударопрочного материала свидетельствуют следующие данные: пластина из карбида бора толщиной 6,5 мм или оксида алюминия толщиной 8 мм останавливает пулю, летящую со скоростью более 800 м/с при выстреле в упор [10]. Для противопульной защиты наиболее перспективно использование керамики из относительно дешевого оксида алюминия. Эффективно также сочетание керамики и многослойной кевларовой ткани. Бронезащита от пуль калибром 12,6 мм включает пластины из оксида алюминия толщиной 15 мм и 35 слоев кевлара (рис. 3.2) [10]. Размер керамических пластин составляет 50 x 50 или 100 x 100 мм.

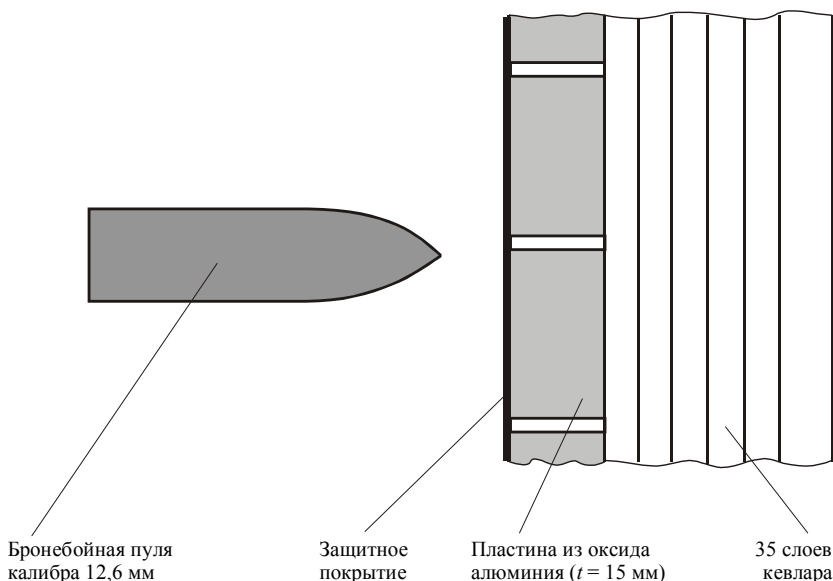


Рис. 3.2. Конструкция керамической бронепанели [10]

Керамические и металлокерамические матрицы обеспечивают возможность успешной эксплуатации композитов при высоких температурах окружающей среды. Матрицы из  $\text{SiC}$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  допускают рабочую температуру композиционных материалов до  $1700^\circ\text{C}$  [26]. Оксидная керамика высшей огнеупорности получается в процессе спекания тонкодисперсных порошков высокотемпературных оксидов: алюминия, циркония, бериллия, магния, кальция и др [10]. Температуры плавления кристаллической фазы оксидной керамики лежат в пределах  $2000 \dots 3300^\circ\text{C}$ . Значения рабочих тем-

ператур составляют  $\sim (0,8 \dots 0,9) t_{пл}$ . Оксидная керамика с поликристаллической структурой обладает высокой теплопроводностью и огнеупорностью, термической и химической стойкостью, модулем упругости. Высокоогнеупорные оксиды устойчивы в сухом воздухе и в окислительных средах.

Химическая и термическая стойкость – важнейшие достоинства керамических материалов. Эти качества обусловлены сильными химическими межатомными связями, реализующимися в керамических материалах. Если говорить об оксидной керамике, то ее можно рассматривать как материал, который уже «сгорел» и «прокорродировал», поэтому дальнейшее окисление такой керамики, например при горении или других химических реакциях, практически невозможно [26].

При температурах более  $900 \dots 1000$  °С сопротивление окислению бескислородных керамик становится недостаточным [23]. В этой связи при необходимости практического использования керамик этого типа в области более высоких температур окружающая среда должна быть неокислительной (нейтральная, восстановительная, вакуум). Исключение – бескислородные соединения, содержащие кремний, поскольку при работе в окислительной среде на поверхности материала образуется защитная пленка расплава кремнезема  $\text{SiO}_2$ . При разработке керамических материалов важной задачей является обеспечение малой скорости испарения входящих в их состав элементов. Летучесть одних и тех же элементов в вакууме в бескислородных соединениях возрастает в порядке: карбиды  $\rightarrow$  бориды  $\rightarrow$  силициды  $\rightarrow$  нитриды [23].

Основными этапами получения керамики являются получение порошков и их консолидация. Консолидация частиц порошка осуществляется в процессе высокотемпературного нагрева материала. Таким образом, в основе методов получения керамических материалов лежит технология порошковой металлургии. Получение порошка исходного материала – важнейший этап керамической технологии. Высококачественная керамика получается при использовании мелкодисперсных исходных порошков (с размером частиц до 1 мкм) [10]. Для измельчения порошков технической керамики используют мельницы различного типа, технологию осаждения частиц из парогазовой фазы, технологию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), виброкавитационное воздействие на частицы, находящиеся в жидкости. Сверхтонкий помол порошков с получением частиц размером менее 1 мкм обеспечивают вибрационные мельницы и аттриторы.

Формование порошков технической керамики осуществляется различными методами, среди которых основными являются [10]: прессование, экструзия (продавливание формовочной массы с добавками пластификатора через мундштук); шликерное литье. Изделия простой формы получают преимущественно по технологии прессования. Особенностью обсуждаемых в данном разделе материалов является их плохая прессуемость, что обусловлено высокими значениями плотности и твердости. В этой связи предпочтительно прессование в горячем состоянии с последующим гомогенизирующим отжигом или без него [29]. Температура горячего прессования составляет 80...90 % от температуры плавления соединения. Для получения более сложных изделий применяют технологии экструзии или шликерного литья. При реализации этих технологий сложность представляет удаление из сформованных изделий пластификаторов. Перспективной технологией формования керамики считается взрывное и гидродинамическое прессование [5].

Операция спекания керамики обеспечивает уменьшение пористости материала, резкое повышение прочностных свойств изделия. Спекание сопровождается усадкой изделия. Температура спекания керамики достигает 2000 °С и выше. Спекание осуществляется при атмосферном давлении и при приложении усилия. В некоторых случаях процесс формования совмещают с операцией спекания керамики.

Контроль качества керамических материалов обычно выполняется с использованием рентгеновской и ультразвуковой дефектоскопии. Обработка керамики и контроль ее качества определяют стоимость получаемых изделий. В некоторых случаях стоимость исходных материалов и их консолидация составляет лишь 11 %, на обработку керамических изделий приходится 38 %, а на контроль их качества – 51 % от общей стоимости [10].

### **3.2. АРМИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ**

Армирующие элементы – важнейшие компоненты композиционных материалов. Для армирования композитов используются тысячи материалов в различном структурном состоянии. Химический состав, структурное состояние и геометрические параметры армирующих элементов определяются требованиями, предъявляемыми к материалу. Большое значение имеет тип матрицы, выбранной для изготовления композиционного материала.

Для производства полимерных композиционных материалов чаще применяют стеклянные, углеродные, борные и органические волокна. Сравнительная характеристика волокон этого типа приве-

дена в табл. 3.3 [5]. При создании композитов с металлической матрицей в качестве арматуры применяются тонкие стальные проволоки, проволоки из вольфрама, бериллия, ниобия, титана и других металлов [6]. Диаграммы растяжения некоторых типов высокопрочных упрочняющих волокон, позволяющие сравнить упругие свойства материалов, приведены на рис. 3.3 [6].

Т а б л и ц а 3.3.

**Сравнительная характеристика волокон, используемых  
при производстве композиционных материалов**

Свойства	Волокно			
	Стеклоанное	Борное	Углеродное	Арамидное
<b>Механические:</b>				
Удельная прочность	Высокая	Высокая	Средняя	Очень высокая
Удельный модуль	Низкий	Высокий	Очень высокий	Средний
Сопротивление удару	Отличное	Удовлетворительное	Плохое	Отличное
Удлинение при разрыве	Высокое	Низкое	Среднее	Среднее
Стабильность	Отличная	Отличная	Средняя	Отличная
<b>Теплофизические:</b>				
Теплопроводность	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая
Температурный КЛТР	Средний	Средний	Очень низкий	Очень низкий
Демпфирующая способность	Высокая	Удовлетворительная	Хорошая	Отличная
<b>Производственно-технологические:</b>				
Наименьший радиус изгиба	Малый	Очень большой	Малый	Малый
Чувствительность к повреждениям при переработке	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
Возможность переработки в ленты и ткани	Хорошая	Плохая	Хорошая	Хорошая
<b>Стоимость</b>	Очень низкая	Высокая	Умеренная	Умеренная

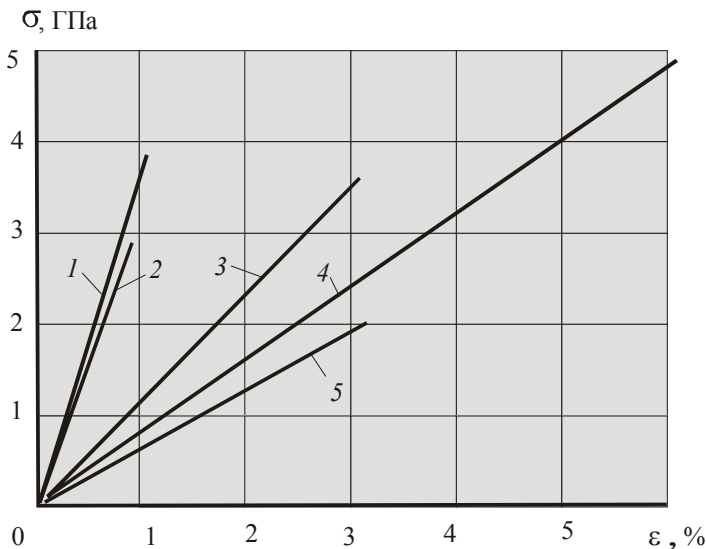


Рис. 3.3. Характерные диаграммы растяжения высокопрочных волокон, применяемых для изготовления современных композиционных материалов:

1 – борные; 2 – высокомодульные углеродные; 3 – органические; 4 – высокопрочные стеклянные; 5 – электроизоляционные стеклянные

Ниже приводятся особенности изготовления различного типа волокон и их применения в композиционных материалах.

### 3.2.1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Одним из наиболее экономичных типов упрочняющих элементов в композиционных материалах является металлическая проволока. Производство металлической проволоки представляет собой хорошо отлаженный технологический процесс. Получают ее методом волочения. Свойства металлической проволоки разных сортов позволяют эффективно использовать ее при производстве композитов. Механические свойства некоторых типов металлических волокон приведены в табл. 3.4 [5]. По сравнению с другими видами волокон металлическая проволока более технологична. С помощью текстильных методов проволока малых диаметров может быть переработана в сетки, используемые для упрочнения композиционных материалов [3].

Для упрочнения композиционных материалов часто используют проволоку из высокоуглеродистых и низколегированных сталей,

Т а б л и ц а 3.4

**Механические характеристики некоторых металлических волокон**

Материал	Плотность $\rho \times 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр d, мкм	Средняя прочность $\sigma^+_1$ , ГПа	Модуль упругости $E^+_1$ , ГПа
Алюминий	2,7	—	0,29	70
Бериллий	1,85	130	1,1	310
Титан	4,5	—	0,55	120
Кремний	2,5	—	1,0	72
Сталь ВНС-9	7,8	100-300	3,5-3,8	200
Молибден и ванадий (+ 5 %)	—	250	1,8–2,0	334
Вольфрам	19,3	50	3,3	410

нержавеющих, мартенситно-старееющих сталей, вольфрама, молибдена, титана, ниобия, других металлов и сплавов. Химический состав, механические свойства и особенности применения проволоки различного типа при производстве композитов описаны в [3].

Высоким уровнем механических свойств обладает стальная проволока. Чаще всего используется проволока диаметром ~ 20...1500 мкм. Наиболее экономична проволока, изготовленная из углеродистых сталей. При температуре эксплуатации композитов в диапазоне 77...623 К эффективно применение высокопрочной проволоки из нержавеющей сталей. Благодаря относительно высокой теплостойкости и наличию пассивной поверхности проволоки из нержавеющей сталей слабо взаимодействуют с матричными материалами.

Применение проволоки из мартенситно-старееющих сталей эффективно в качестве упрочнителя при производстве композиционных материалов на основе легких металлов и сплавов. Упрочнение мартенситно-старееющих сталей происходит в результате процесса старения при температурах ~ 480...500 °С. Если процесс формирования композиционного материала проводить при этих температурах или близких к ним, механические свойства мартенситно-старееющей проволоки будут наиболее высокими. Проволока из углеродистой стали при температурах формирования композиционных материалов на основе алюминия и других легких металлов разупрочняется.

Процесс производства высокопрочной проволоки из углеродистых сталей заключается в патентовании и последующем холод-

ном волочении. Патентирование представляет собой вид термической обработки, который заключается в аустенитизации при 860...940 °С, выдержке в свинцовой или соляной ванне при ~ 400...550 °С и последующем охлаждении на воздухе или в воде. Структура тонкопластинчатого перлита, формирующегося в процессе изотермической выдержки, оптимальна для последующего волочения.

Волочение проволоки осуществляют на барабанных волочильных станах. Оптимальная величина единичных обжатий составляет 10...12 %. Упрочнение проволоки тем выше, чем больше величина суммарного обжатия. Обычно суммарное обжатие составляет 80 %, иногда – 90...94 %. В процессе холодной пластической деформации возникают остаточные напряжения, приводящие к снижению предела упругости стали. Окончательной операцией обычно является низкотемпературный отпуск (при 200...300 °С), способствующий повышению предела упругости материала. Режимы и особенности волочения нержавеющей, мартенситно-старееющих сталей, других сталей и сплавов описаны в специальной литературе.

В соответствии с ГОСТ 9389-75 и ГОСТ 14959-79 проволоки из высокоуглеродистых и малолегированных сталей по показателям прочности делятся на четыре класса: класс I (максимальной прочности), классы II и IIА (повышенной прочности) и класс III (нормальной прочности). В табл. 3.5 в качестве примеров приведены прочностные свойства проволок диаметром 200, 500, 1000 и 1400 мм.

Т а б л и ц а 3.5

**Предел прочности при растяжении проволок из углеродистых и легированных сталей (ГОСТ 9389-75, ГОСТ 14959-79)**

D, мкм	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа			
	Класс I	Класс II	Класс IIА	Класс III
200	2750-3100	2300-2750	2250-2700	1800-2300
500	2650-3000	2200-2650	2200-2650	1700-2200
1000	2500-2800	2100-2500	2050-2500	1600-2100
1400	2350-2600	1950-2300	1900-2300	1500-1950

При малых значениях диаметра прочность проволоки зависит от его величины. Чем меньше диаметр, тем выше прочностные свойства проволоки. Например, предел прочности проволоки из стали У8 диаметром 80 мкм составляет ~ 4400 МПа, а диаметром 260 мкм – ≈ 3600 МПа [3]. С увеличением диаметра проволоки чувствительность предела прочности к этому фактору снижается.



Высокопрочная стальная проволока чувствительна к дефектам внутреннего строения и поверхностным дефектам. Поэтому с увеличением длины проволоки средний уровень ее прочности снижается.

При производстве композиционных материалов металлическая проволока используется в виде отдельных волокон или сеток. Тканые сетки можно изготавливать только из высокопластичных материалов, обладающих, как правило, низкими прочностными свойствами. Другой их недостаток заключается в образовании пережимов в местах контакта проволоки основы и проволоки утка.

Недостатков, присущих тканым металлическим сеткам, лишены вязаные сетки трикотажного плетения. Различают сетки типа «кулирная гладь», «ластик», «фанг», «полуфанг» [3]. Для изготовления сеток трикотажного плетения пригодны высокопрочные проволоки с малыми значениями относительного удлинения (2...3 %) диаметром 20...200 мкм. Объемная структура сеток обеспечивает малый уровень контактных напряжений, в результате чего разрушение сеток происходит не в местах контакта проволочек, а по их длине.

При получении композитов на основе меди, никеля, кобальта, титана и их сплавов в качестве упрочняющих волокон используют вольфрамовую и молибденовую проволоки, характеризующиеся высокой прочностью и жесткостью. По величине модуля упругости вольфрам уступает только осмию, иридию и рению [3, 25]. Высокие прочностные свойства вольфрама и молибдена проявляются как при комнатной, так и при повышенных температурах.

Технологические процессы получения этих видов проволоки основаны на использовании в качестве исходного сырья порошков вольфрама и молибдена. Основными стадиями при изготовлении вольфрамовой проволоки являются [3]: восстановление водородом вольфрама из оксида; прессование порошка вольфрама и получение заготовок в виде штабиков; спекание штабиков в атмосфере водорода; глубокий прогрев с целью сварки штабиков при температуре, близкой к температуре плавления; ротационная ковка с целью получения компактной прутковой заготовки; волочение заготовки на цепных волочильных станах; волочение проволоки на барабанных волочильных станах. Минимальный размер вольфрамовой проволоки составляет ~ 20 мкм. Схематически процесс производства проволоки методом порошковой металлургии показан на рис. 3.4 [1]. Вольфрамовая и молибденовая проволока диаметром 20...80 мкм используется для изготовления тканых и трикотажных сеток.

При создании металлических композиционных материалов наиболее важно достичь термодинамической совместимости компонентов,

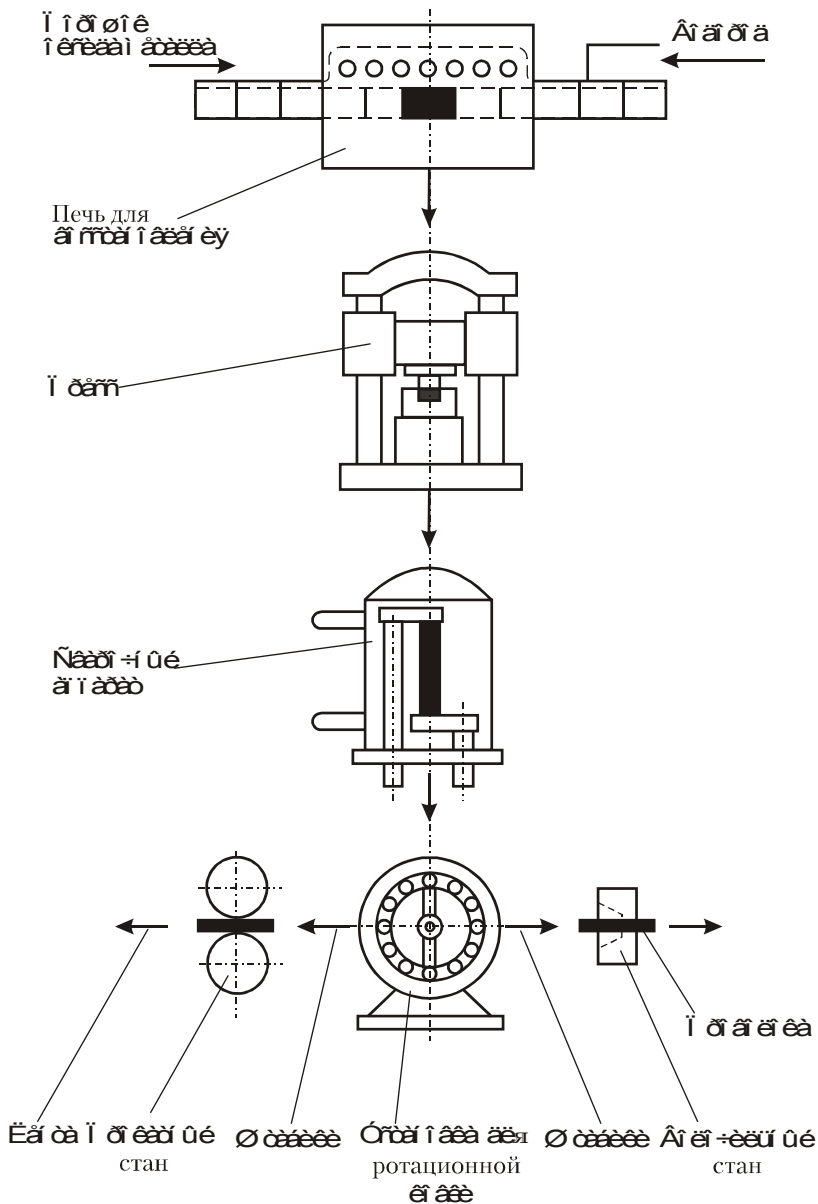


Рис. 3.4. Схема производства проволоки и ленты из тугоплавких металлов методом порошковой металлургии

т. е. отсутствия диффузионного и химического взаимодействия между волокном и матрицей [1]. Количество систем с термодинамической совместимостью компонентов ограничено. Наиболее активное взаимодействие между волокном и матрицей происходит при реализации жидкофазных способов получения металлических композиционных материалов. Кроме того, активное взаимодействие компонентов имеет место при эксплуатации композиционных материалов при высоких температурах.

Металлические композиты на основе никелевой матрицы, упрочненной вольфрамовыми и молибденовыми волокнами, предназначены для работы при 1000...1200 °С. При этих температурах термодинамическая стабильность системы отсутствует, происходит нежелательное взаимодействие между компонентами композиционных материалов. Повысить стабильность межфазных границ (между волокном и матрицей) можно нанесением на волокна противодиффузионных покрытий. Для вольфрамовых и молибденовых волокон в качестве такого рода защитных покрытий рекомендуют использовать нитрид титана, оксиды тория, алюминия и циркония.

На рис. 3.5 [1] приведена схема нанесения на вольфрамовую или молибденовую проволоку барьерного противодиффузионного покрытия из нитрида титана. Покрытие наносится на установке непрерывного действия. Проволока поступает с катушки, проходит через кварцевый реактор, в котором на нее осаждается нитрид титана, и наматывается на приемную катушку. Вращение катушки осуществляется двигателем через редуктор. Осаждение нитрида титана производится на волокно, нагретое путем пропускания электрического тока до 1100 °С. К проволоке электрический ток подводится через верхний и нижний контакты. Нитрид титана получается путем восстановления тетрахлорида титана водородом в присутствии азота. Скорость осаждения нитрида титана составляет 0,5 мкм/с.

Для упрочнения композиционных материалов бериллиевая проволока применяется в виде дискретных и непрерывных волокон. Ее характерные особенности – высокий модуль упругости и высокая удельная прочность. Предел прочности проволоки диаметром 51 мкм составляет 1455 МПа. Высокая жесткость не позволяет перерабатывать бериллиевую проволоку в сетки.

Высокими значениями удельной прочности и высокой коррозионной стойкостью обладает титановая проволока. Предел прочности проволоки диаметром 800 мкм, изготовленной из сплава ВТ9, составляет 1820 МПа [3]. В композиционных материалах титановая проволока применяется в виде непрерывных и дискретных волокон.

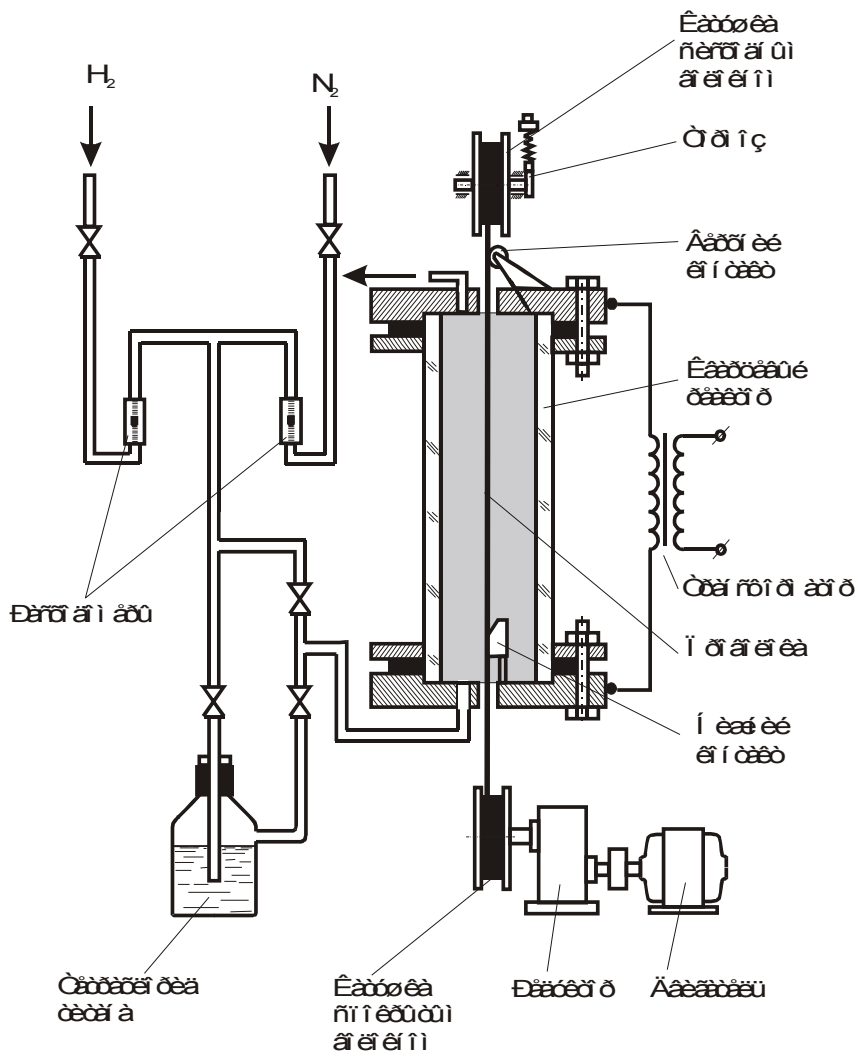


Рис. 3.5. Схема установки для нанесения на вольфрамовое волокно барьерного покрытия из нитрида титана

В композиционных материалах может быть использована также биметаллическая проволока. Объемная доля плакирующего слоя в ней может достигать 20...40 %. Технология изготовления проволоки такого типа заключается в получении (литьем, сваркой,



Разработаны и другие технологические процессы, позволяющие получать металлические волокна. Один из них основан на получении расплава и продавливании его через отверстия. Схематически этот процесс отражен на рис. 3.6 [1]. Жидкий металл через штуцер подается в емкость, откуда газом продавливается через отверстия в фильерах. В камере происходит охлаждение волокон воздухом или инертным газом, подаваемым через трубки и регулировочные вентили. Охлажденное волокно попадает в бункер. Нагретые газы штуцерами, расположенными в вытяжном зонте, отводятся в охлаждающее устройство и в дальнейшем повторно используются для охлаждения волокон в камере.

Для получения металлических волокон малого диаметра (менее 50 мкм) применяется метод Тейлора, основанный на совместной вытяжке металла и стекла (рис. 3.7) [1]. Металлический стержень в стеклянной оболочке механизмом подачи вводится в нагревающее устройство. В результате индукционного или радиационного нагрева металл в стеклянной ампуле расплавляется, стекло размягчается. При вытягивании волокна намоточным устройством в стекле образуется капилляр, который заполняется расплавленным металлом. Этот метод позволяет получать волокна диаметром 1...30 мкм. Стеклянную изоляцию с металлических волокон стравливают в кислотах и расплавленных щелочах.

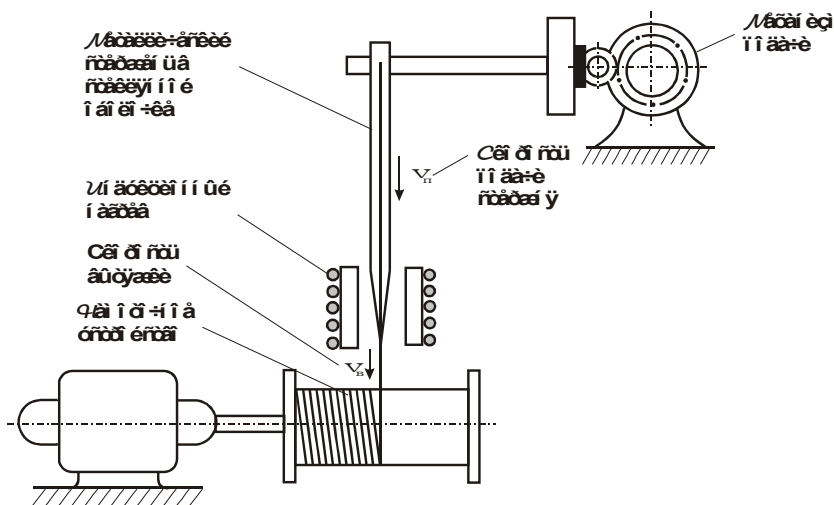


Рис. 3.7. Схема установки для получения металлических волокон в стеклянной изоляции

### 3.2.2. СТЕКЛЯННЫЕ, КВАРЦЕВЫЕ ВОЛОКНА

Стеклопластики являются одними из наиболее применяемых композиционных материалов. В 1979 г. в США было произведено более 900 тыс. т материалов этого типа [4]. Такой большой объем выпуска стеклопластиков обусловлен их высокими свойствами и относительно невысокой стоимостью.

Для производства стеклопластиков требуются стеклянные волокна различного типа. К настоящему времени разработано большое количество марок волокон и предложены эффективные технологические процессы их производства.

Основу стекол составляет кремнезем  $\text{SiO}_2$ . Температура плавления диоксида кремния очень высока. Для ее снижения в стекло могут быть введены различные добавки, изменяющие при этом свойства конечного продукта. Стекло – это аморфный материал, не имеющий кристаллического строения. По своим физико-механическим свойствам оно занимает положение между твердым телом и жидкостью.

Спектр достоинств стеклянных волокон predetermined их широкую распространенность. Плотность волокон относительно невысока и находится в диапазоне  $(2,4 \dots 2,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Стекловолокон имеют высокий уровень прочности в условиях действия растягивающих напряжений, являются очень хорошими электроизоляторами. Их удельная прочность (отношение предела прочности к плотности) выше, чем у стальной проволоки [4]. Стеклянные волокна, являясь материалами неорганического происхождения, не горят и не поддерживают горение. Высокая температура плавления волокон позволяет использовать их для эксплуатации при повышенных температурах. Стеклянные волокна имеют низкий температурный коэффициент линейного расширения и высокий коэффициент теплопроводности. Они химически стойкие, не реагируют на действие большинства химикатов, устойчивы к воздействию грибов, бактерий и насекомых. Стеклянные волокна обладают повышенной влагостойкостью, под действием влаги не набухают, сохраняют высокие прочностные свойства в средах с повышенной влажностью.

Обычно форма сечения стеклянных волокон представляет собой круг. Однако в некоторых случаях выпускают полые и профилированные волокна с формой сечения в виде треугольника, квадрата, шестиугольника и прямоугольника (рис. 3.8) [6]. Стеклянные волокна используются в виде как непрерывных нитей, так и резаного (штапельного) волокна.

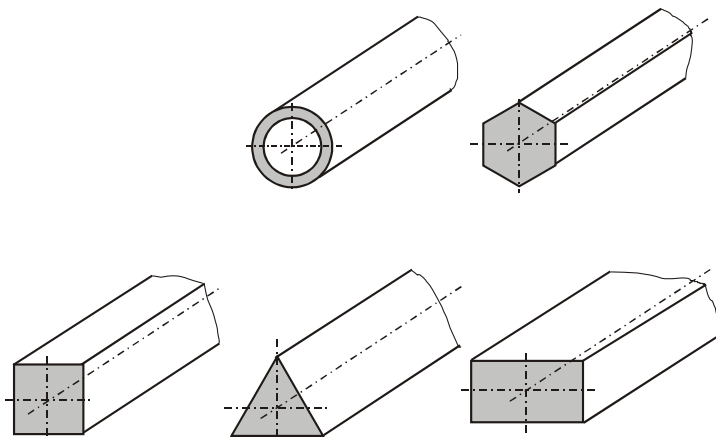


Рис. 3.8. Формы сечений стеклянных волокон

Технологический процесс получения волокна заключается в подготовке кварцевого песка, известняка, борной кислоты, глины, угля, флюорита и других компонентов, их перемешивании и плавлении в высокотемпературных печах. Температура плавления композиции составляет примерно  $1260^{\circ}\text{C}$ . Различают одно- и двухстадийные процессы получения стекловолокна. При одностадийном процессе расплав стекла поступает непосредственно в оборудование, позволяющее получать стеклянную нить, пряжу, ровинг или резаное волокно (штапель). При реализации двухстадийного процесса расплав сначала перерабатывается в стеклосферы, которые затем поступают в плавильные печи и далее перерабатываются в конечный продукт.

Схематически одностадийный процесс получения стекловолокна показан на рис. 3.9 [4]). Этим способом получают большую часть стеклянных волокон. Стеклянный расплав из ванны поступает в емкости из платинового сплава, имеющие форму лодочки. Емкость для расплавленного стекла называют бушингом. В дне бушинга имеются отверстия диаметром  $0,8 \dots 3,0$  мм [6], через которые под действием гидростатического давления экструдированы тонкие струи стекла. Затем стекло подвергают интенсивному механическому вытягиванию.

Элементарные волокна охлаждаются в подфильерном холодильнике в потоке водяных брызг, объединяются в нить и пропускаются через устройство, в котором на нить наносится специальное покрытие – замасливатель. Замасливатель повышает компактность





нити и защищает ее от механического воздействия. Собранные в единый пучок элементарные волокна называют жгутом, или стренгой [4]. Жгут наматывается с помощью намоточного устройства со скоростью свыше 3 км/мин. В зависимости от потребности происходит дальнейшая переработка стекловолокна в пряжу, ровинг или штапельное (резаное) волокно. Для получения штапельного волокна может быть применен способ воздушного вытягивания, при котором расплавленная масса, вытекающая из отверстий фильеры, вытягивается и разрывается в струе воздуха. Второй способ производства штапельных волокон заключается в разделении непрерывного стекловолокна на отдельные отрезки.

Диаметр стеклянных волокон, полученных по описанной технологии, составляет ~ 3...19 мкм [6]. Изменение диаметра зависит от скорости приема нити или скорости истечения струи. При производстве стеклянных волокон контролируются многие технологические параметры, важнейшими среди которых являются температура нагрева материала, вязкость расплава и др.

Схема вытягивания волокон из полученных ранее стеклянных шариков показана на рис. 3.10 [1]. Стеклянные шарики из бункера поступают в стеклоплавильный сосуд, из которого расплавленная масса продавливается через систему фильер. Полученные волокна вытягиваются, объединяются, проходят через замасливающее устройство и в виде жгута наматываются на съемную бобину.

При производстве стеклянных волокон используют два типа замасливателей, предотвращающих истирание волокон при их транспортировке и дальнейшей переработке. Одни из них – технологические замасливатели – применяют только на стадии переработки волокна. Перед изготовлением композиционного материала технологические замасливатели смывают или удаляют путем нагрева волокна до 1100 К [6]. В качестве технологических замасливателей применяют парафиновую эмульсию, материалы на основе крахмала и другие составы. Для того чтобы обеспечить хорошие адгезионные свойства стеклянных волокон, иногда после удаления технологических замасливателей на их поверхность наносят специальные материалы, называемые аппретами. Аппреты способствуют созданию прочной связи на границе между волокном и полимерной матрицей.

Другой тип замасливателей – активные замасливатели, выполняющие двойную функцию. Они одновременно предохраняют поверхность волокна от механического воздействия и улучшают адгезию между стеклом и полимерной матрицей. Активные замасливатели с поверхности стекловолокна не удаляются.



Для обеспечения особо высокой химической стойкости разработаны *S*-стекла. Высокопрочными считаются *S*-стекла. Прочность волокон из *S*-стекол примерно на 40 % выше прочности волокон из *E*-стекол, что объясняется более высокой прочностью исходной композиции. Химический состав стекол марок *A*, *C*, *E* и *S* приведен в табл. 3.6 [4].

Специальными марками стекол являются *M*-, *D* и *L*-стекла. *M*-стекла являются высокомодульными. Модуль Юнга их достигает 113 ГПа. Высокая канцерогенность *M*-стекол обусловлена присутствием в их составе окиси бериллия. *D*-стекла обладают низкими диэлектрическими свойствами. Их применение может быть эффективным при изготовлении обтекателей антенн и радиолокаторов. Для радиационной защиты разработаны свинецсодержащие *L*-стекла.

Т а б л и ц а 3.6

## Химический состав стекол

Состав	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	24,8
Окись железа	–	–	–	0,21
Окись кальция	10	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	–	–	–

Свойства стеклянных волокон определяются их химическим составом и строением (наличием дефектов). В табл. 3.7 приведены физико-механические свойства магнийалюмосиликатных, алюмоборосиликатных и кислотостойких стеклянных волокон.

Кроме отмеченных типов стеклянных волокон, имеющих сложный химический состав, при производстве композиционных материалов используются кварцевые и высокосиликатные волокна. Кварцевое стекло получается из естественных кристаллов кварца и содержит не менее 99,95 %  $\text{SiO}_2$  [4]. Месторождений чистого природного кварца, пригодных для производства высококачественных волокон, в мире немного. В частности, рудники по добыче такого

Таблица 3.7

## Характеристики стеклянных волокон [5]

Свойства	Марка стекла *		
	МАС	АБС	КС
<b>Физические:</b>			
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2480	2540	2490
<b>Механические:</b>			
Предел прочности при растяжении $\sigma_1^+$ , МПа:			
при 22 °С	4585	3448	3033
371 °С	3768	2620	–
533 °С	2413	1724	–
Модуль упругости при растяжении $E_1^+$ , МПа, при 22 °С	85,5	72,4	69,0
Предел текучести $\sigma_T$ ,	5,7	4,8	4,8
<b>Термические:</b>			
КЛТР $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	5,6	5,0	7,2
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	–	10,4	–
Удельная теплоемкость $c_m$ , Дж/(кг·К), при 22 °С	0,176	1,197	0,212
Температура размягчения $T$ , °С	–	841	749

\* МАС – магнийалюмосиликатное стекло, АБС – алюмоборосиликатное стекло, КС – кислотостойкое стекло.

кварца действуют в Бразилии. Достоинством кварцевого волокна является его высокая прочность и термостойкость. При повышении температуры до 1200 К модуль упругости кварцевого волокна возрастает от 74 ГПа (при 300 К) до 83 ГПа [6]. Высокосиликатное стекло и кварц отлично переносят тепловой удар. Стекло и кварц можно нагреть до 1093 °С и охладить в воде, что не приведет к явному изменению их структуры.

Кварцевое стекло даже при температуре 2400 К не теряет высокой вязкости. Поэтому описанная технология вытягивания волокон из расплава для кварца не подходит. Основной способ получения волокон из кварца – их вытягивание из нагретых стержней (штабиков). Диаметр исходных кварцевых стержней составляет 0,2...2,0 мм

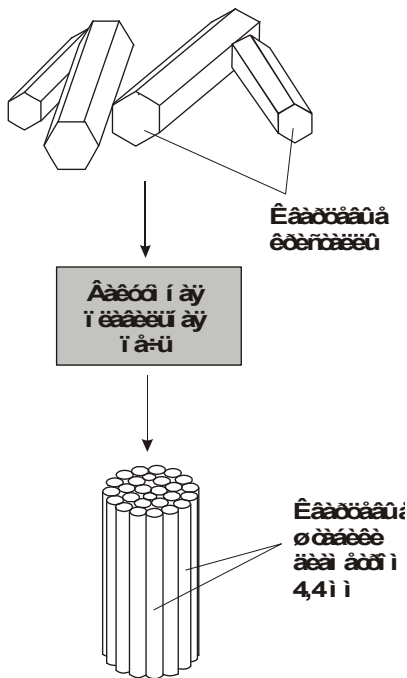


Рис. 3.11. Схема технологического процесса получения кварцевых штабиков

- промывка водой;
- сушка;
- термическая обработка при 540 °С (для удаления связанной воды).

Одиночные непрерывные стекловолоконные жгуты (стренги), которые получают непосредственно на выходе из бушинга, являются простейшей формой текстильной пряжи («простая пряжа») [4]. Перед тем как простую пряжу подвергнуть текстильной переработке, ее предварительно закручивают. Тонкая простая пряжа на практике используется редко. Чаще необходима более толстая пряжа, которую можно получить скручиванием двух или более жгутов. Последующее скручивание двух или более предварительно скрученных жгутов называется трощением.

Для того чтобы создать эффект объемной стекловолоконной пряжи, на нее необходимо воздействовать струей воздуха. При этом происходит случайное разрушение элементарных волокон,

[1] (4,4 мм [4]). Схемы технологических процессов получения кварцевых штабиков, измельченных волокон, пряжи, ленты и тканей приведены на рис. 3.11 [4] и рис. 3.12. Различными фирмами выпускаются тысячи наименований кварцевых волокон.

Основным сырьем для производства высокосиликатного стекла является высокочистый песок. Кремнеземное (высокосиликатное) волокно, содержащее 95...99 % SiO<sub>2</sub>, получают из силикатных стекол по технологии выщелачивания [4, 6]. Основные этапы получения высокосиликатного стекла:

- получение силикатного стекла с содержанием ~ 65 % SiO<sub>2</sub>;
- расплавление силикатного стекла;
- получение стекловолокна;
- выщелачивание в разбавленных растворах минеральных кислот;

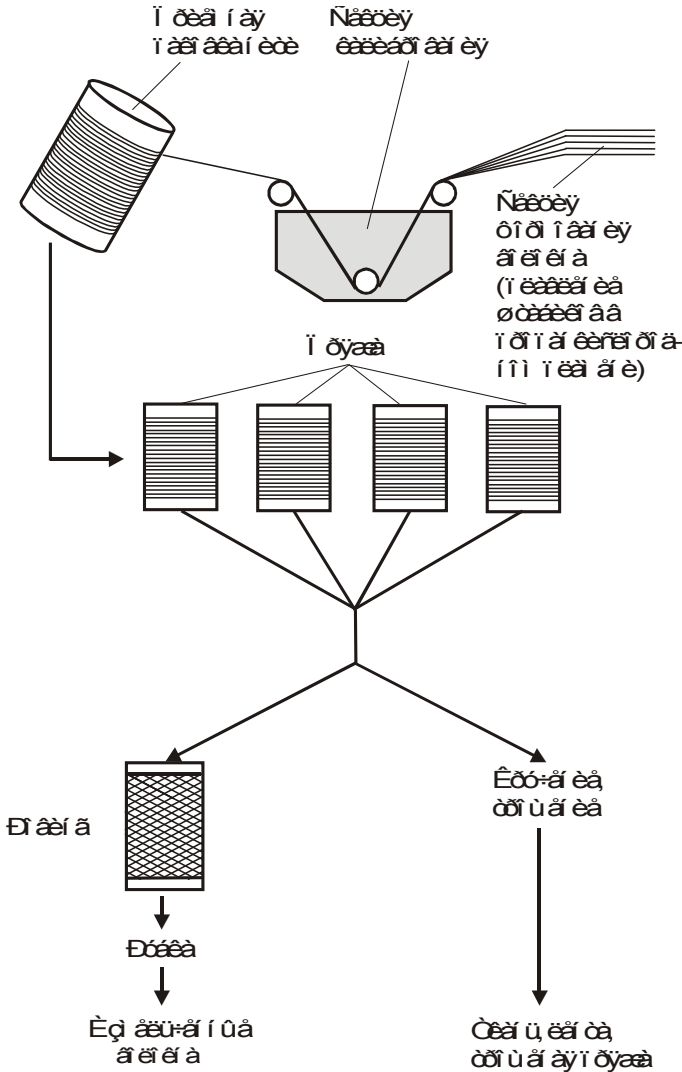


Рис. 3.12. Схема технологического процесса получения кварцевой пряжи, измельченных волокон, ткани, ленты

расположенных на поверхности пряжи, и ее распушение. Такой процесс создания объемной пряжи называется текстурированием. Процесс разрушения элементарных волокон контролируется давлением воздуха и скоростью подачи пряжи.

Путем совместного прядения нескольких простых жгутов (стренг) получают ровинг. Большая его часть перерабатывается в грубые ткани. Достоинством тканей из ровинга является возможность быстрого набора толщины [4].

Часть производимого стекловолокна используется для изготовления матов. Стекловолоконные маты получают из резаных или непрерывных жгутов, а также из простых непрерывных монопнитей. Маты, изготовленные из резаных волокон, могут достигать толщины почти 2 м [4]. Очень малая толщина стекловолоконных матов, получаемых из непрерывных монопнитей, позволяет использовать их как декоративные поверхностно армированные слои.

Стекловолоконная пряжа может быть использована для производства стеклотканей. Стеклоткани как технологичный материал используют в производстве полимерных композитов. Они удобны для производства крупногабаритных изделий.

В тканях различают два типа нитей: основу и уток. Нити, ориентированные вдоль ткани, называются основой, уток перебивает нити основы в поперечном направлении. В зависимости от типа переплетения нитей основы и утка различают несколько видов текстильных тканей. Стеклоткани могут иметь полотняное переплетение, в котором нить утка проходит последовательно под каждой нитью основы и над ней. Достоинством этого вида ткани является малая повреждаемость нитей и высокая степень устойчивости при прокаливании пряжи.

Для производства стеклотканей используют также сеточное (рогожка), саржевое (диагональное), сатиновое и другие виды переплетений. Промышленностью в основном выпускаются ткани полотняного и сатинового переплетения [6]. Кроме того, стекловолоконная пряжа используется для изготовления тесьмы, контурных тканей, тканей с гофрированными нитями, трехмерных тканей [4].

Кварцевые и высокосиликатные волокна обладают большей прочностью и гибкостью по сравнению с обычными стекловолоконными, поэтому они более технологичны. Благодаря высоким качествам высокосиликатные и кварцевые волокна перерабатываются практически во все текстильные формы [4].

Тип переплетения, плотность ткани определяют ее гибкость, формуемость, повреждаемость, влияют на прочностные свойства композиционного материала, определяют способность пропитки связующим. Ткани с плотным переплетением плохо принимают различную форму, медленно пропитываются связующим, что является одной из причин низких прочностных свойств получаемых из них композиционных материалов. Ткани с редким переплетением



нитей также не обеспечивают высокого комплекса прочностных свойств. В зависимости от конкретных обстоятельств в каждом случае определяется оптимальный тип переплетения тканей.

Для повышения прочностных свойств и износостойкости на поверхность стеклянных волокон могут быть нанесены металлические покрытия, например никель, медь, железо, цинк [1]. Нанесение металлических покрытий осуществляется из паровой фазы или методом металлизации в жидкой ванне.

Схема установки, используемой для нанесения металлических покрытий из паровой фазы, показана на рис. 3.13 [1]. Стеклянная нить, выходящая из прядильной головки, нагревается расположенным в газовой печи нагревателем и проходит в камеру, заполненную

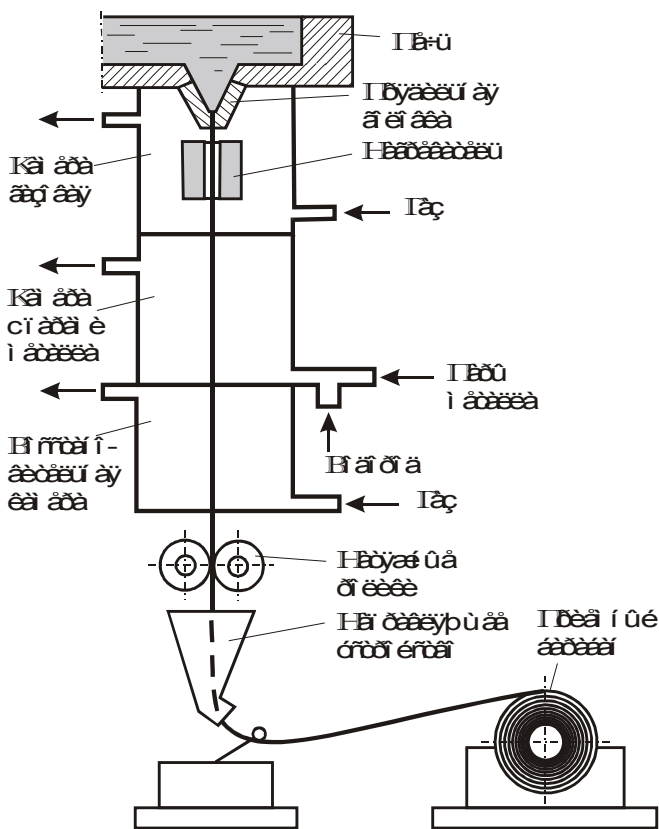


Рис. 3.13. Схема установки для металлизации стеклянных волокон из паровой фазы

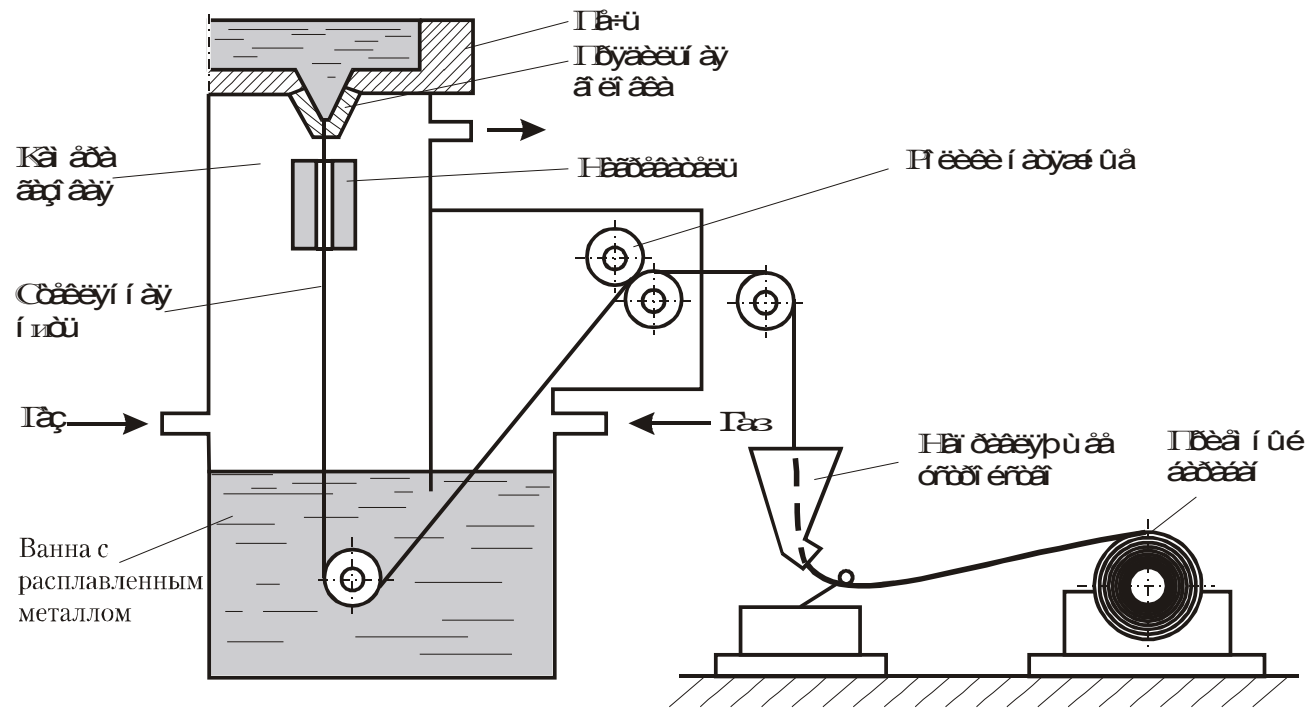


Рис. 3.14. Схема установки для металлизации стеклянных волокон из расплава

парами металла. После осаждения на поверхность волокна слоя металла оно поступает в восстановительную камеру и далее, проходя ролики и направляющее устройство, наматывается на приемный барабан.

При реализации второй схемы волокно выходит из прядильной головки, нагревается и, проходя через камеру, наполненную газом, поступает в ванну с металлическим расплавом (рис. 3.14 [1]). После нанесения тонкого слоя металла волокно подается на приемный барабан.

Содержание волокна в стекловолоконных композиционных материалах может достигать 80 % [4]. Такое высокое содержание стекловолокна и соответ-

ственно малая объемная доля связующего в композитах достигаются за счет прикатывания материалов в процессе их изготовления. Для повышения объемной доли волокна необходимо использовать схемы его плотной упаковки. Применение спиральной намотки по сравнению с намоткой параллельных волокон снижает их объемную долю в композиционных материалах. Оптимальная доля стекловолокна в композиционных материалах составляет 30...32 % [4]. Зависимость механических свойств стеклопластиков от массовой доли связующего отражена на рис. 3.15 [4].

### 3.2.3. УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА

Уникальным видом упрочняющих волокон являются углеродные волокна (УВ) (рис. 3.16). Объем применения углеродных волокон при изготовлении композиционных материалов постоянно возрастает, что объясняется высоким уровнем их механических свойств. По удельным показателям углеродные волокна превосходят все жаростойкие волокна [3]. Предел прочности высокомо-

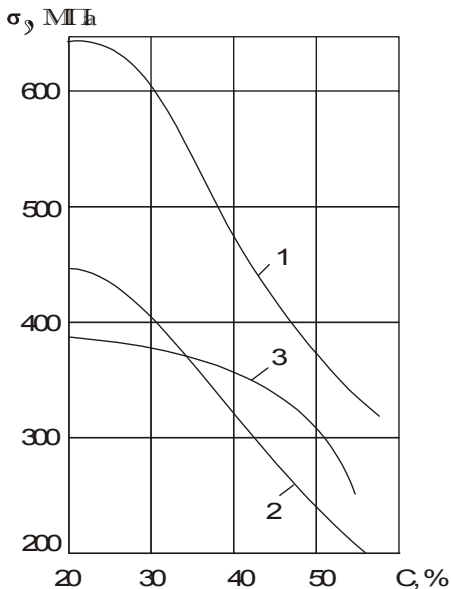


Рис. 3.15. Зависимость пределов прочности стеклопластиков от массовой доли связующего С:

1 – при изгибе; 2 – растяжении; 3 – сжатии

дульных УВ составляет 2,5...3,5 ГПа. Модуль упругости  $E$  равен 200...700 ГПа при плотности  $(1,6...1,8) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Плотность углеродных волокон ниже, чем графита ( $2260 \text{ кг/м}^3$ ). Это различие объясняется большой пористостью волокон, их менее совершенной структурой. Для углеродных волокон характерна высокая химическая стойкость к действию большинства агрессивных сред.

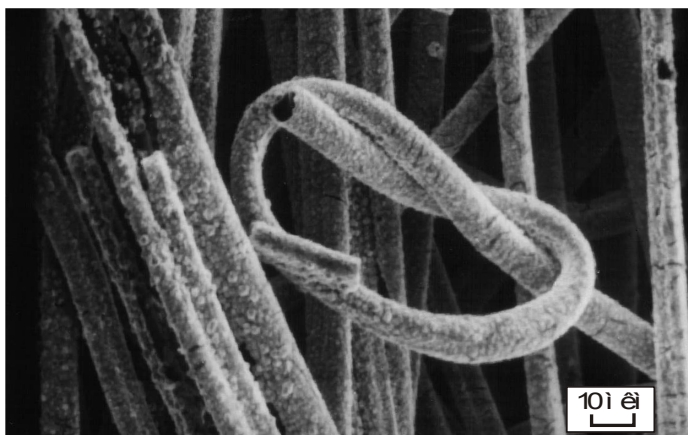


Рис. 3.16. Углеродные волокна с кристаллами меди на их поверхности

Благодаря высокому уровню механических свойств, низкой плотности, высокой теплостойкости и другим свойствам углеродные волокна нашли широкое применение при изготовлении композиционных материалов с полимерной, углеродной, керамической и металлической матрицами.

В зависимости от условий обработки углеродные волокна делятся на карбонизованные и графитизированные. Температура термической обработки карбонизованных волокон составляет  $900...2000 \text{ }^\circ\text{C}$ , содержание углерода в них – 80...99 %. При получении графитизированных волокон температура термообработки достигает  $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Углерода в них содержится более 99 %. Для проведения графитизации, как правило, используют карбонизованные волокна. Карбонизация и графитизация проводятся в вакууме, в различных контролируемых средах (метан, азот, аргон и др.), а также в угольной, коксовой и графитовой засыпках.

Производство углеродных волокон основано на нагреве полимеров в инертной среде и их термической деструкции. Во время разложения полимеров образуются летучие продукты и остается твердый коксовый остаток. Преобразование органических волокон

в углеродные волокна связано с протеканием сложных реакций, кардинальным изменением структуры при сохранении элементов первоначального полимерного скелета [3].

Для получения УВ используют только волокнистые полимеры, не плавящиеся при термической обработке, обеспечивающие в конечном продукте высокий выход по углероду и высокие механические свойства. Для получения УВ используют полиакрилонитрильные волокна (ПАН-В), гидратцеллюлозные волокна (вискозные ГЦ-В), богатые углеродом пеки (обыкновенные и мезофазные) и органические волокна, полученные из фенольных смол.

Волокна ПАН и ГЦ являются основными видами сырья при производстве углеродных волокон. Из полиакрилонитрильных волокон получают высокопрочные высокомолекулярные УВ. Достоинствами этого вида сырья является большой выход по углероду и более простая технология (более низкая температура нагрева материала). Недостаток заключается в выделении ядовитого вещества – синильной кислоты. Гидратцеллюлозные волокна лишены этого недостатка, кроме того, они дешевле по сравнению с ПАН-волокнами.

Искусственные вискозные (гидратцеллюлозные) волокна служат основным сырьем для производства углеродных волокон. Технологический процесс получения волокон из гидратцеллюлозных нитей включает стадии текстильной подготовки материала, окисления, карбонизации, графитизации [5].

Текстильная подготовка необходима для удаления влаги, неорганических примесей и органических веществ, в том числе и замасливателей. Обработка осуществляется растворителями или поверхностно-активными веществами. В дальнейшем в течение 15 часов при 100 °С производится сушка целлюлозы.

На стадии окисления целлюлозы, реализуемой при температурах, не превышающих 350...400 °С, наблюдаются большие потери массы материала. В остатке после этой операции содержится не более 60...70 % углерода. Далее при температурах 900...1500 °С осуществляется карбонизация волокон. Материал еще в большей степени обогащается углеродом.

Окончательная стадия термической обработки волокон называется графитизацией. Она реализуется в среде аргона и длится всего лишь несколько минут [5]. Начальная температура этой стадии определяется конечной температурой карбонизации. Конечная температура составляет ~ 2600...2800 °С. Содержание углерода в волокне по окончании графитизации превышает 99 %.

Если процесс превращения целлюлозных волокон в углеродные совместить с операцией их вытягивания, то можно улучшать прочностные и упругие свойства волокон. Технологически могут

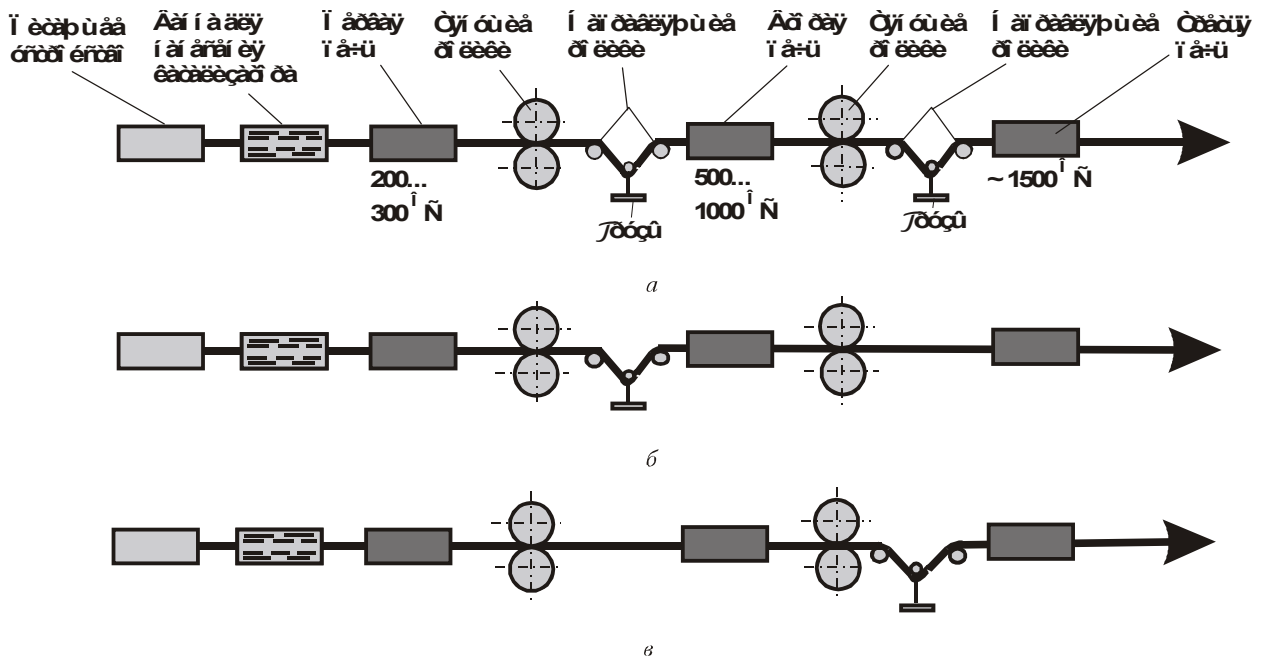


Рис. 3.17. Непрерывные схемы карбонизации с различными вариантами вытягивания волокна:  
*a* – на второй и третьей стадиях термической обработки; *b* – на второй стадии обработки; *v* – на третьей стадии обработки

быть реализованы три варианта процесса карбонизации, совмещенного с процессом вытягивания волокна (рис. 3.17) [5]. Обозначения основных элементов приведены на схеме. Вытягивание волокна может происходить на второй и третьей (рис. 3.17, *a*), на второй (рис. 3.17, *b*) или на третьей (рис. 3.17, *в*) стадиях обработки. Нагрузка на нить на второй стадии обработки составляет 0,05...1,5 Н, на третьей – 0,05...2 Н.

На рис. 3.18 показана структура углеродных волокон [6]. В поперечном сечении выделяют поверхностный слой *A*, высокоориентированную *B* и низкоориентированную *C* зоны. Характерной особенностью волокон является их фибриллярное строение. До 33 % объема волокна может быть занято порами. Поры ориентированы вдоль оси волокна и имеют иглоподобную форму.

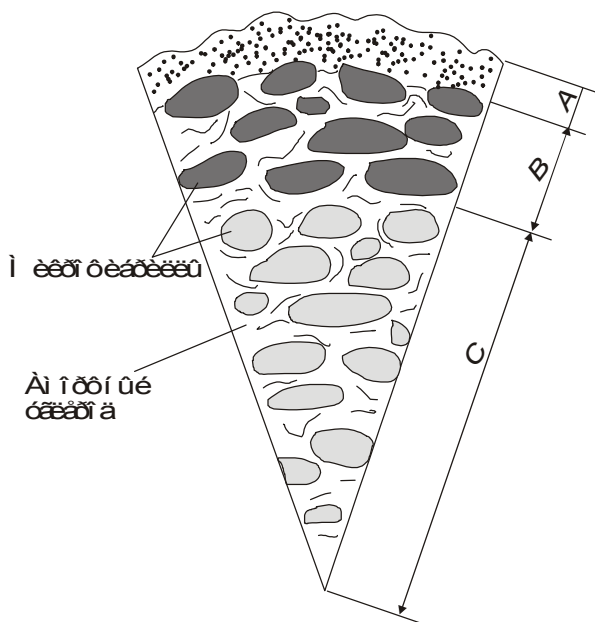


Рис. 3.18. Фибриллярная структура углеродного волокна:

*A* – поверхностный слой; *B* – высокоориентированная зона;

*C* – низкоориентированная зона

Стадии процессов получения углеродных волоконистых материалов из гидратцеллюлозных волокон и полиакрилонитрильных волокон аналогичны. Схема процесса получения материала из ПАН-волокон, совмещающая процессы их окисления и карбонизации, приведена на рис. 3.19 [5].

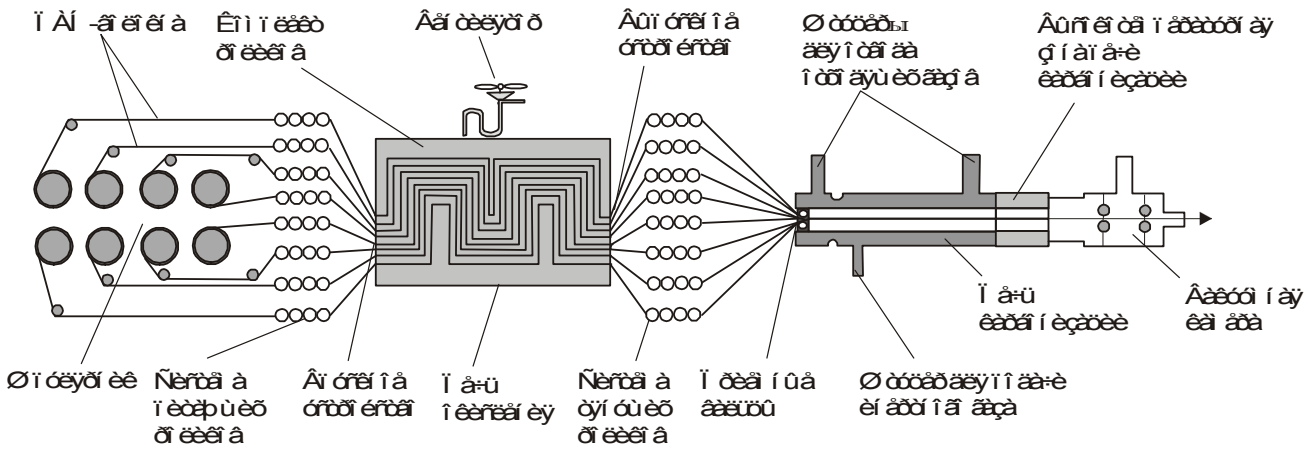


Рис. 3.19. Схема совмещенного окисления и карбонизации ПАН-волокна



Каменноугольные и нефтяные пеки – сложная смесь олигомерных продуктов. Состав и свойства пеков зависят от их происхождения и могут изменяться в широких пределах. Пеки представляют собой относительно дешевое сырье для производства углеродных волокон. Процесс получения углеродных волокон из пеков состоит из следующих стадий [4,5]: приготовление пека; формование волокна (прядение из расплава); длительное отверждение; карбонизация в атмосфере инертного газа; графитизация волокна под нагрузкой. Волокна из пеков получают путем пропускания расплава при 370...620 К через фильеры диаметром 0,3 мм. Далее происходит вытяжка волокон со степенью 100 000...500 000 %. Стадии процессов карбонизации, графитизации и переработки гидратцеллюлозных и ПАН-волокон аналогичны. Недостатком пеков является высокое содержание канцерогенных веществ.

В том случае если процесс получения волокна включает стадию вытяжки волокна при графитизации и соблюдаются оптимальные температурно-временные параметры, возможно получение волокон, обладающих высокими механическими свойствами. Экспериментально были достигнуты значения предела прочности волокна в условиях растяжения 2585 МПа при модуле упругости 480 ГПа. Однако соблюдение всех условий, сопутствующих получению волокон с высоким уровнем механических свойств, приводит к существенному удорожанию материала. Обычно при реализации технологии производства углеродного волокна из пеков, не предусматривающей стадии вытяжки при графитизации, модуль упругости волокон не превышает 35...70 ГПа [4]. Такие волокна находят применение лишь в качестве основы для осаждения бора.

Низкий уровень прочностных свойств характерен в первую очередь для пеков с изотропной структурой. Жидкокристаллические пеки, т. е. пеки, находящиеся в мезофазном состоянии, позволяют обеспечить высокий уровень механических свойств получаемых из них углеродных волокон. Перевод пека в жидкокристаллическое (мезофазное) состояние осуществляется термической обработкой материала [4]. В мезофазном состоянии часть молекул субстрата, находящегося в жидком состоянии, упорядочивается и в материале формируется жидкокристаллическая структура. В процессе последующего пропускания мезофазного пека через фильеру происходит ориентация молекул вдоль оси формирующегося волокна. Схематически структура изотропного расплава, мезофазного пека и пека, прошедшего сквозь фильеру, показана на рис. 3.20 [4].

Структура поперечного сечения углеродных волокон, полученных из мезофазных пеков, схематически отражена на рис. 3.21 [4].

Различают радиальное, луковичное и радиально-изотропное строение волокон. Общим для всех трех вариантов является то, что ориентация графитовых плоскостей параллельна оси волокон.

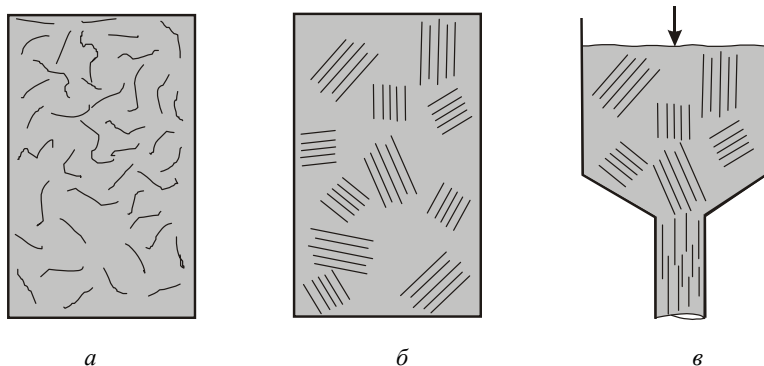


Рис. 3.20. Структура пеков:

*a* – изотропный расплав пека; *б* – жидкокристаллическая (мезоморфная) фаза;  
*в* – ориентация молекул в процессе формирования волокна

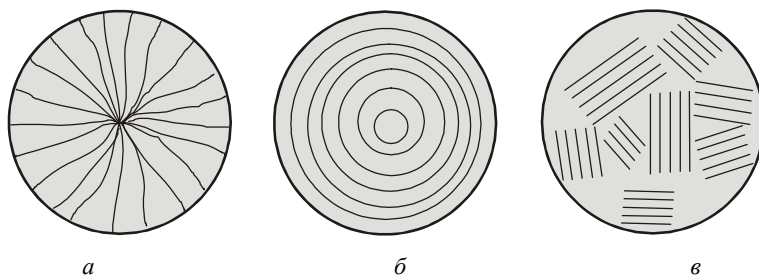


Рис. 3.21. Структура углеродных волокон, полученных из пеков:

*a* – радиальная; *б* – луковичная; *в* – радиально-изотропная

Из фенольных смол получают УВ средней прочности с низким модулем упругости. Синтез фенольных смол проще по сравнению с получением пеков. Фенольные смолы перспективны для изготовления углеродных волокон с развитой поверхностью и полых волокон.

Для модификации свойств углеродных волокон на стадиях карбонизации и графитизации в прядильный раствор вводят тугоплавкие и термостойкие соединения, либо пропитывают этими соединениями обрабатываемые волокна (или ткани). В результате получают волокна и ткани со специальными покрытиями, например в виде карбидов или оксидов.

Механические свойства углеродных волокон определяются особенностями строения исходных волокон, технологией термической обработки, дефектами конечной структуры. В зависимости от характера и плотности дефектов внутреннего и поверхностного строения разброс показателей механических свойств углеродных волокон может быть весьма значительным.

В общем случае углеродные волокна обладают высоким уровнем свойств. По прочности углеродные волокна делят на три группы: низкопрочные волокна ( $\sigma_b < 500$  МПа), волокна средней прочности ( $\sigma_b = 500 \dots 1500$  МПа) и высокопрочные волокна ( $\sigma_b > 1,5$  ГПа). Модуль упругости УВ пропорционален их прочности и изменяется в широком диапазоне.

При производстве композиционных материалов в основном используют углеродные волокна с высоким уровнем механических свойств. Условно эти волокна делят на высокопрочные и высококомодульные. Показатели высококомодульных волокон:  $E = 300 \dots 700$  ГПа,  $\sigma_b = 2 \dots 2,5$  ГПа, высокопрочных:  $E = 200 \dots 250$  ГПа,  $\sigma_b = 2,5 \dots 3,2$  ГПа. Некоторые волокна одновременно обладают высокими значениями предела прочности и модуля упругости. Прочностные свойства и предел упругости некоторых из высокопрочных высококомодульных волокон отражены в табл. 3.8 [3].

Отличительной особенностью углеродных волокнистых материалов является их очень высокая теплостойкость. При нагревании в инертной среде предел прочности и модуль упругости УВ не изменяются до температуры  $1500$  °С. При длительной эксплуатации в воздушной среде предельная температура карбонизованных волокон составляет  $300$  °С, а графитизированных –  $400$  °С. С целью предохранения поверхности УВ от окисления волокна защищают покрытиями из пироуглерода, оксидов, нитридов, тугоплавких карбидов.

Таблица 3.8

## Свойства высокопрочных высококомодульных углеродных волокон

Марка волокна	Диаметр волокна, мкм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, E, ГПа	Предел прочности, ГПа
ВМН-4	6,0	1710	270	2,21
Кулон	–	1900	400...600	2,00
ЛУ-2	–	1700	230	2,0...2,5
Урал-15	–	1500...1600	70-80	1,5...1,7

По величине коэффициента теплопроводности углеродные волокна приближаются к металлам [3]. Уплотнение тканей из угле-

родных волокон пироуглеродом приводит к повышению теплопроводности за счет увеличения числа контактов между нитями.

Высокопрочные высокомодульные углеродные волокна выпускаются в виде нитей, жгутов и лент. Недостаток этих материалов – высокая стоимость. Углеродные волокна средней прочности используются для производства углеродных тканей. Стоимость этих материалов существенно ниже, чем изготовленных из высокопрочных высокомодульных УВ. В то же время уровень их механических свойств вполне удовлетворяет требованиям теплозащиты.

По сравнению со стеклянными поверхностная энергия углеродных волокон значительно ниже. Поэтому УВ плохо смачиваются полимерными связующими, а полимерные композиционные материалы на их основе характеризуются более низким напряжением сдвига. Для повышения сцепления углеродных волокон и полимерной матрицы с УВ удаляют пленки замазливателя, наносят на поверхность волокон тонкий слой мономера с последующей полимеризацией, травлением поверхности волокон окислителями и выращиванием на поверхности волокон нитевидных кристаллов (формирование ворса) [3].

#### 3.2.4. БОРНЫЕ ВОЛОКНА

Борные волокна, обладающие высокой прочностью и высокими значениями модулей упругости, были получены методом химического осаждения из газовой фазы в 1959 г. [4]. Борные волокна использовали в основном в качестве армирующих волокон для изготовления тяжело нагруженных несущих конструкций самолетов. По сравнению с другими типами армирующих волокон борные обладают высокой сдвиговой жесткостью ( $G = 180$  ГПа) [4]. Борные волокна считаются одними из наиболее эффективных упрочнителей композиционных материалов.

Основу технологии получения борных волокон составляет осаждение бора на вольфрамую нить. В качестве газа используют смесь водорода  $H_2$  и трихлорида бора  $BCl_3$ . Бор осаждается на вольфрамую нить диаметром  $\sim 12$  мкм, раскаленную пропускаемым через нее электрическим током. Температура нагрева нити составляет  $\sim 1350$  °С [4]. Осаждение бора осуществляется в газовом реакторе длиной около 2 м. В общем виде схема процесса показана на рис. 3.22 [4]. Основными ее элементами являются исходная паковка вольфрамовой проволоки, приемная бобина для сматывания борного волокна и секция осаждения бора. Скорость осаждения бора при использовании описанного реактора составляет  $\sim 0,9$  кг в неделю.

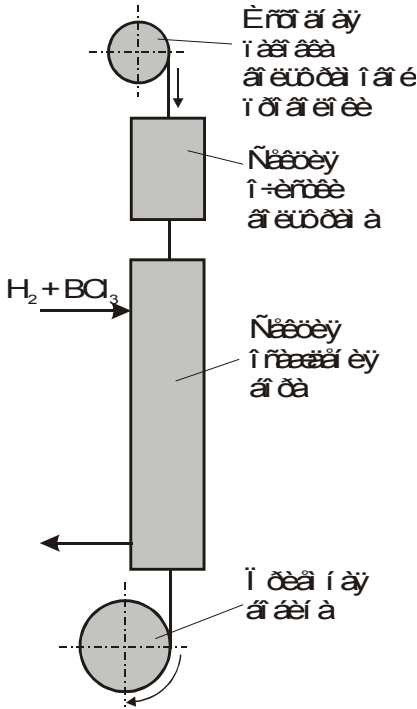
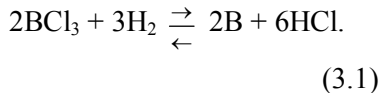


Рис. 3.22. Общая схема реактора для осаждения бора на вольфрамовую проволоку

Принципиальная схема установки для производства непрерывного борного волокна показана на рис. 3.23 [1]. Вольфрамовая нить с подающей бобины проходит через камеру очистки, заполненную водородом, и попадает в реактор, в котором на нее осаждается бор. Нагрев нити в реакторе осуществляется электрическим током, подающимся через ртутные контакты. Ртутные контакты одновременно служат затворами, предотвращающими попадание в реактор воздуха. После осаждения бора нить наматывается на приемную бобину. Назначение основных элементов схемы отражено в подрисуночной подписи.

Осаждение бора на вольфрамовой нити осуществляется по следующей реакции:



При осаждении бора на вольфрамовую нить разлагается только 2 %  $\text{BCl}_3$ . Непрореагировавший хлорид бора конденсируют при  $-80^\circ\text{C}$ . Пары соляной кислоты отделяют от водорода, а водород либо выпускают в воздушную атмосферу, либо вновь включают в технологический цикл получения борного волокна.

По мере осаждения бора на вольфрамовую нить электрическое сопротивление волокна изменяется, поэтому неодинаков и температурный профиль волокна по длине реактора. Для того чтобы его выровнять, применяют двух- или многостадийную схему подведения электрического тока.

При получении борных волокон необходимо поддерживать оптимальную скорость осаждения кристаллов бора. Если скорость осаждения больше или меньше оптимальной, то прочностные свойства получаемых волокон снижаются. Предел прочности борвольфрамовых волокон при растяжении превышает 3000 МПа.

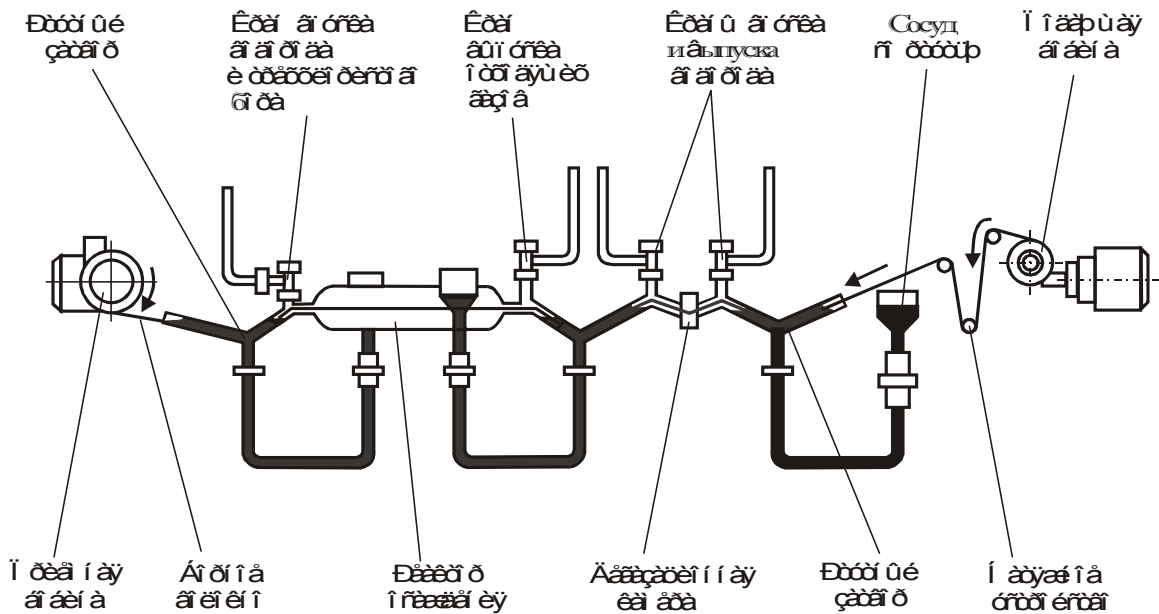


Рис. 3.23. Принципиальная схема установки для производства непрерывного борного волокна в однокамерном реакторе

На малой базе его величина достигает 6890 МПа (после удаления из волокна сердцевины) [4]. Механические свойства некоторых марок волокон приведены в табл. 3.9 [5].

Таблица 3.9

**Механические характеристики борных волокон**

Страна, марка волокна	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр d, мкм	Модуль упругости $E_1^+$ , ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм $\sigma_1^+$ , ГПа	Предельная деформация $\varepsilon$ , %
США Avco (B/W)	2,5	98	390-400	3,39	0,85
Япония Toshiba (B/W)	2,5	97,2	363-386	3,74	1,0
	2,5	96,8	378-388	3,58	0,93
	2,5	99	374-393	3,23	0,84
Франция SMPE (B/W)	2,5	100±5	408	3,57	0,88
ФРГ Wacker-Chemie (B/W)	2,54	100±5	420	3,1	0,74
Россия (B/W)	2,5	195±3	394	2,95-3,5	0,75–0,9

Структура, обеспечивающая высокий уровень прочностных свойств волокон, представляет собой мелкие кристаллы бора с размерами  $\sim 20 \text{ \AA}$ . При температуре более  $1400^\circ\text{C}$  весь бор осаждается в поликристаллической форме с размерами отдельных кристаллов в несколько тысяч ангстремов и более. Такая структура обеспечивает борным волокнам низкий уровень механических свойств [4].

Разрушение борных волокон, как правило, начинается вблизи поверхностных дефектов. Уменьшить их количество и повысить прочностные свойства позволяет поверхностное травление волокон. Повышение чистоты продуктов реакции осаждения также приводит к росту прочностных свойств борных волокон [6].

При увеличении температуры нагрева борных волокон происходит их разупрочнение [1]. На воздухе оно становится существенным уже при  $350\dots 400^\circ\text{C}$ . Потерю прочности вызывают образование на поверхности волокна оксидной пленки  $\text{B}_2\text{O}_3$  и уменьшение эффективного сечения волокна. В среде аргона прочность борных волокон сохраняется до  $\sim 600^\circ\text{C}$ .

В США в 1990 г. объем производства борного волокна составил более 20 т. В промышленных масштабах выпускаются волокна диаметром 100, 140 и 200 мкм [4]. Волокна других диаметров производятся опытными партиями.

Боровольфрамовые волокна отличаются высокой стоимостью, что обусловлено ценностью вольфрамовой нити. Это обстоятельство продиктовало поиск более дешевых материалов для основы. В частности, была разработана технология, позволяющая вместо дорогой вольфрамовой нити использовать более дешевое углеродное волокно. Диаметр борных волокон, полученных по этой технологии, не превышает 75 мкм [4]. Если покрыть углеродное волокно слоем пиролитического графита, можно получить борные волокна диаметром до 120 мкм. Схема получения бороуглеродных волокон показана на рис. 3.24 [4].

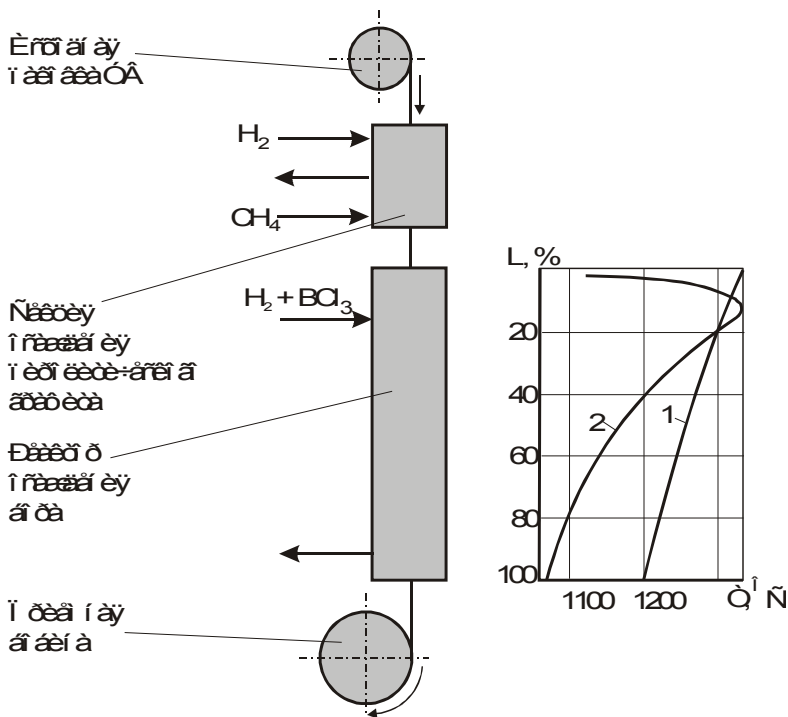


Рис. 3.24. Общая схема реактора для осаждения бора на углеродное волокно и диаграмма профиля температур в боро волокнах по длине реактора:

1 – бор на углеродном волокне; 2 – бор на вольфрамовой проволоке ( $L$  – отношение расстояния от верха реактора к его общей длине)



Модуль упругости бороуглеродных волокон ниже, чем боровольфрамовых (для волокон диаметром 100 мкм ~ 360 и 400 ГПа соответственно). Это связано с влиянием модулей упругости углеродной и вольфрамовой нитей.

Большой объем выпускаемых борных волокон перерабатывается в непрерывные ленты и маты, пропитанные эпоксидным связующим (в виде препрегов). Препрег представляет собой полуфабрикат (заготовку) в виде компаунда, состоящего из терморезистивного связующего с волокнистым наполнителем. Армирующий волокнистый наполнитель в препрегах может быть выполнен в виде ориентированных нитей, жгутов, лент, тканей, матов. Эпоксидное связующее наносится на волокно двумя способами [4]:

- 1) при пропускании волокна через пропитывающие валки;
- 2) путем переноса связующего со специальной бумаги.

Для того чтобы увеличить длительность хранения препрегов, в связующее вводят специальные консерванты. Длительность хранения препрегов при комнатной температуре составляет несколько недель. При  $-18^{\circ}\text{C}$  бороэпоксидные препреги без потери свойств могут храниться в течение нескольких лет [4].

Благодаря высоким механическим свойствам борные волокна получили достаточно широкое распространение. Они применяются для изготовления полимерных и металлических композиционных материалов. В качестве металлической матрицы в композиционных материалах обычно используется алюминий. Композиты такого типа могут работать при температуре до 640 К [6]. При создании фюзеляжа многоразового космического корабля «Шаттл» были успешно использованы конструкции из бороалюминиевой композиции. Более широкому промышленному применению бороалюминиевых композитов препятствует их высокая стоимость.

Боропластики общим весом 66 и 98 кг используются в военных самолетах типов F-14 и F-15 соответственно. Борные волокна успешно применяются при изготовлении спортивного инвентаря: ракеток для большого тенниса, клюшек для гольфа, велосипедов, легких удилищ для рыбной ловли.

Одна из проблем, связанных с применением борных волокон в металлических композиционных материалах, заключается в том, что бор активно реагирует с металлической основой (например, алюминием или титаном). На практике эта проблема решается за счет создания на поверхности борных волокон покрытий, являющихся эффективными диффузионными барьерами. Обычно в качестве покрытий используют карбиды бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ) и кремния ( $\text{SiC}$ ).

Борные волокна с покрытием из карбида кремния выпускаются под торговой маркой «Борсик» [4]. Кроме карбидных покрытий возможно применение защитных пленок из нитрида бора BN.

### 3.2.5. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Для производства композиционных материалов используются в основном органические арамидные и полиэтиленовые волокна. Арамидные волокна относятся к классу ароматических полиамидных материалов. Впервые они появились в 1971 г. под торговой маркой «кевлар» (фирма «Дюпон») [4]. Достоинствами кевлара являются высокие механические свойства в широком диапазоне температур и хорошая химическая стойкость.

Формование арамидных нитей осуществляется «сухо-мокрым» способом. На рис. 3.25 и 3.26 представлены две схемы реализации этого способа [4]. Раствор очищенного волокнообразующего полимера в сильной кислоте при  $\sim 50...100$  °С экструдирован через фильеру прядильной головки и попадает в воздушную прослойку толщиной 5...19 мм. Диаметр одиночного волокна составляет  $\sim 12$  мкм. Далее волокна проходят через осадительную ванну с холодной водой ( $t \leq 4$  °С). Полученная нить наматывается на приемную бобину. Предварительно перед намоткой происходит упрочнение формируемой нити.

Кевлар – это жесткоцепной высокоориентированный полимер. Его химическая структура показана на рис. 3.27 [4]. Ароматические кольца способствуют преимущественной ориентации макромолекул полиамида вдоль одной оси. Оси макромолекул совпадают с осями волокон кевлара. В поперечном направлении взаимодействие осуществляется посредством водородных связей. В продольном направлении реализуются ковалентные связи. Таким образом, волокна кевлара обладают высокой анизотропией механических свойств. Волокно имеет высокую продольную и низкую поперечную прочность. Структура волокна кевлара подобна системе длинных, связанных в поперечном направлении прутьев [4].

Химический состав и структура арамидных волокон определяют их уникальные свойства. Они обладают самыми высокими среди органических волокон значениями прочностных свойств и модуля упругости [4]. Плотность волокон кевлара составляет  $\sim 1440$  кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при растяжении  $\sim 2700...3300$  МПа, максимальный модуль упругости 96,5 ГПа (кевлар-29) и  $\sim 128$  ГПа (кевлар-49). По сравнению со стеклянными и углеродными волокнами арамидные волокна являются более пластичными. Их удлинение

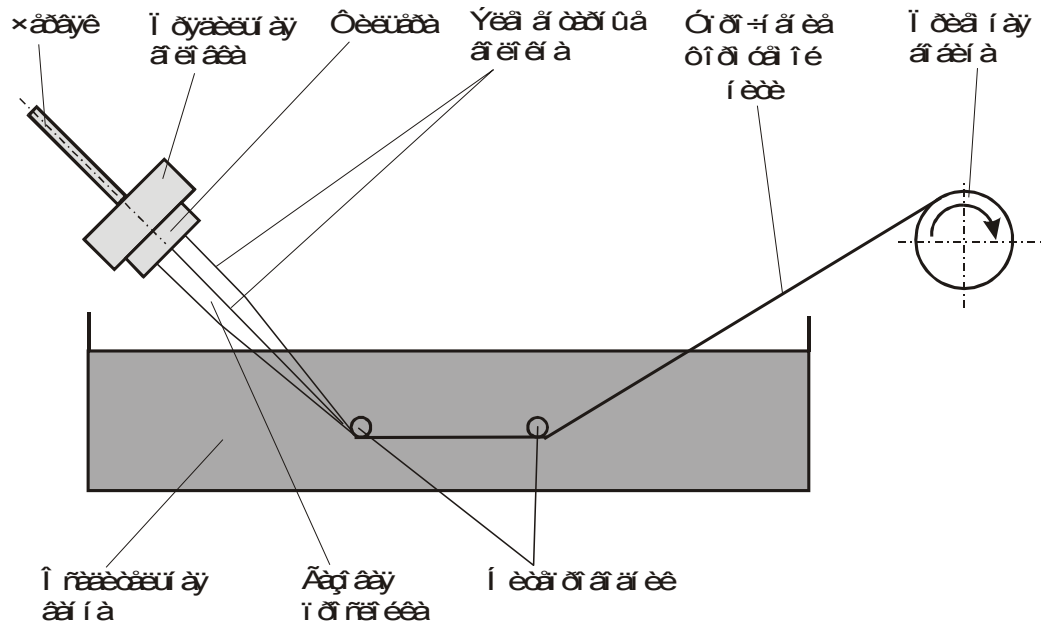


Рис. 3.25. Горизонтальная схема «сухо-мокрого» формирования арамидной нити

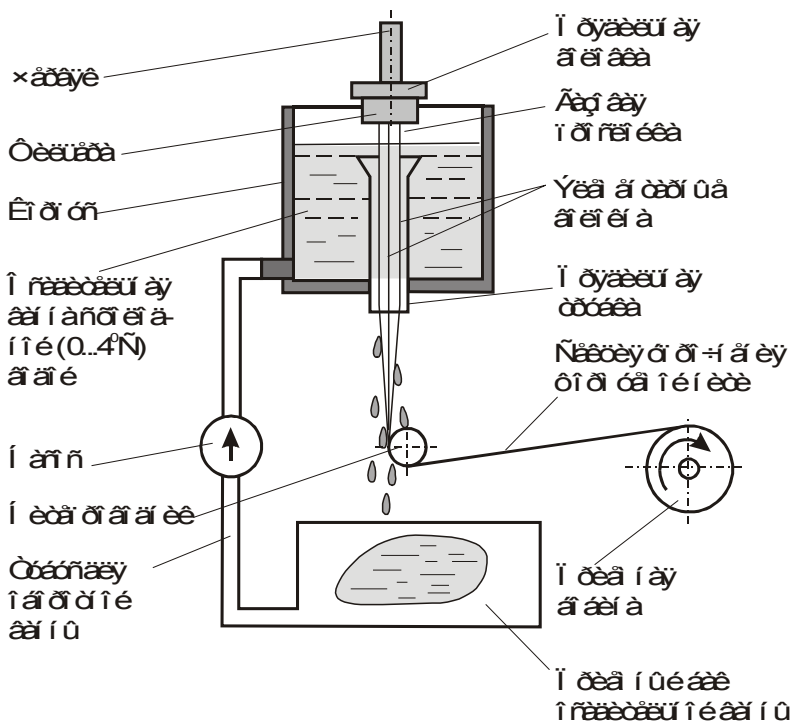


Рис. 3.26. Вертикальная схема «сухо-мокрого» формирования арамидной нити

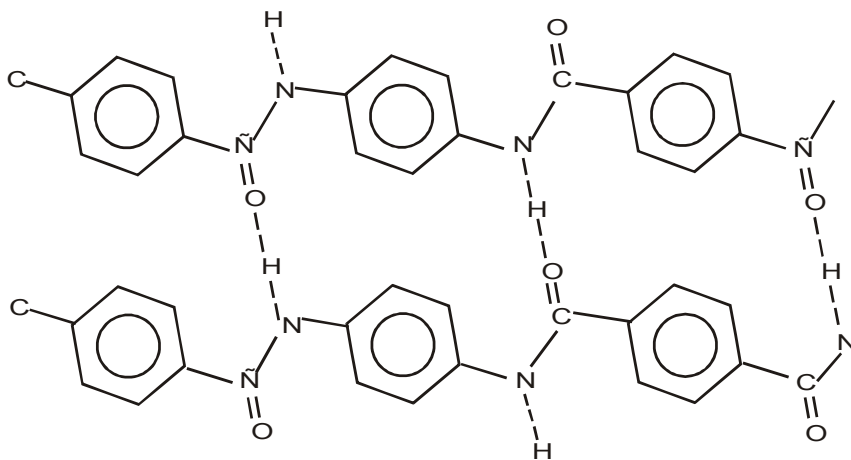


Рис. 3.27. Химическая структура волокна «кевлар»

при растяжении составляет  $\sim 2...4$  %. Недостаток арамидных волокон – сорбирование влаги, в результате которого их свойства снижаются на  $15...20$  % [5].

Соотношение между свойствами различных типов армирующих волокон, применяющихся для производства композиционных материалов, иллюстрирует рис. 3.28 [4]. Прочностные свойства волокон кевлара-49 в продольном направлении уникальны даже по сравнению с неорганическими армирующими волокнами.

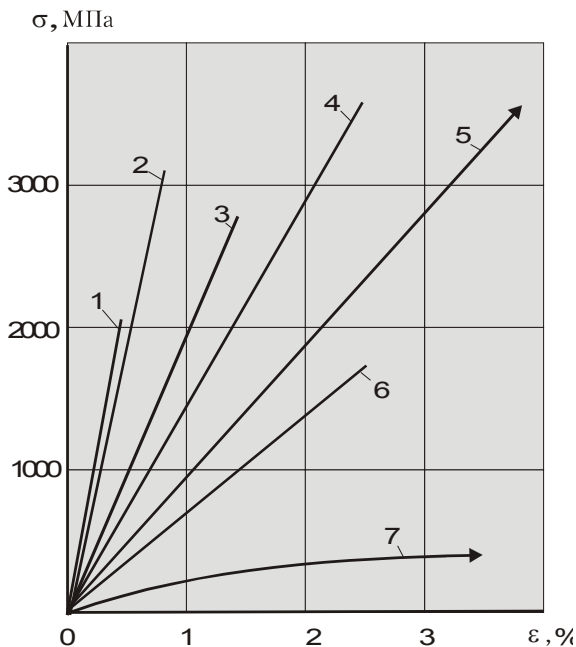


Рис. 3.28. Зависимости «растягивающее напряжение  $\sigma$  – деформация  $\epsilon$ » для различных армирующих волокон [4]:

1 – высокомодульная пряжа из углеродных волокон ( $E = 414$  ГПа), 2 – бороволокна ( $E = 379$  ГПа), 3 – высокопрочная пряжа из углеродных волокон ( $E = 262$  ГПа), 4 – ровинг из волокна кевлар-49 ( $E = 131$  ГПа), 5 – ровинг из S-стекловолокна ( $E = 82,7$  ГПа), 6 – ровинг из E-стекловолокна ( $E = 68,9$  ГПа), 7 – волокно «номекс»

Фирма «Дюпон» выпускает такие известные марки арамидных волокон, как кевлар-29 и кевлар-49. Кевлар-29 выпускается в виде технических нитей различного назначения, кевлар-49 – в виде пряжи, ровинга и тканей [4]. Волокна кевлара-29 используются

преимущественно при производстве кабелей и канатов, а также для изготовления корда автомобильных шин. Композиционные материалы на основе кевлара-49 используются для изготовления полов, дверей, переборок самолетов и вертолетов. Кроме того, эти материалы находят применение при изготовлении корпусов ракетных двигателей, защитных касок, пуленепробиваемых жилетов, лодок, хоккейных клюшек и другого спортивного снаряжения.

Волокна кевлара используются для производства полимерных композиционных материалов. В качестве матричного материала чаще используются эпоксидные либо полиэфирные связующие [4].

Достоинством полиэтиленовых волокон является их низкий уровень плотности –  $0,97 \text{ г/см}^3$ . При этом волокна типов «спектра» (США), «дайнема» (Нидерланды), «текмилон» (Япония) обладают упругопластическими свойствами на уровне арамидных волокон [5]. Некоторые механические свойства арамидных и полиэтиленовых волокон приведены в табл. 3.10 [5].

Т а б л и ц а 3.10

**Механические характеристики арамидных и полиэтиленовых волокон**

Марка материала (страна, фирма)	Плотность $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	Прочность при растяже- нии $\sigma^+_{11}$ , МПа	Модуль упру- гости $E^+_{11}$ , МПа	Удлинение при разрыве, %
Армос (Россия, ВНИИПВ)	1450	5000-5500	140-142	3,5-4,5
СВМ(Россия, ВНИИПВ)	1430	3800-4200	120-135	4,0-4,5
Терлон (Россия, ВНИИПВ)	1450	3100	100-150	2-3,5
Кевлар-29 (США, «Дюпон»)	1440	2920	69-77	3,6
Кевлар-129 (США, «Дюпон»)	1440	3200	75-98	3,6
Тварон (Нидерланды, АКЗО)	1440	2800	80-120	3,3-3,5
Технора (Япония, «Тейджин»)	1390	3000-3400	71-83	4,2
Спектра 900 (США, «Эллад»)	970	2570	50-120	3-6
Дайнема (Нидерлан- ды, ДСМ)	970	До 3350	50-120	3-6
Текмилон (Япония, «Мицуи»)	960	3500	100	4

### 3.2.6. КЕРАМИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Если для производства композиционных материалов требуются упрочняющие элементы, обладающие высоким уровнем механических свойств, высокой химической стойкостью, жаростойкостью и жаропрочностью, рационально использовать керамические волокна. Керамические волокна особенно необходимы для производства композитов с металлической матрицей.

Керамические волокна изготавливают из прочных тугоплавких, химически стойких материалов [4]: оксидов алюминия и циркония, нитрида бора, карбидов бора и кремния, других карбидов, нитридов и оксидов. По сравнению с массивными объектами керамические волокна, имеющие поликристаллическое строение, обладают более высокой прочностью, однако, в отличие от монокристаллических усов, их прочность меньше.

Процесс получения поликристаллических керамических волокон протекает в три этапа [4]:

- 1) получение суспензии или коллоидного раствора металлоорганического соединения;
- 2) формирование волокна путем продавливания суспензии (раствора) через фильеру или получение тонкой пленки на гладкой поверхности;
- 3) обжиг волокна для удаления органических веществ и обеспечения плотной структуры.

Схема процесса получения поликристаллического волокна из оксида алюминия приведена на рис. 3.29 [1]. В резервуаре находится исходный материал, представляющий собой раствор формоацетата алюминия  $Al(OH)(CHO_2)(C_2H_3O_2)$  в воде с добавками 10 %-ной винной кислоты, вакуумированный до вязкости 2000...2500 П. Азот, поступающий из баллона, продавливает раствор в шестеренчатый насос. С помощью насоса раствор поступает в фильтр, задерживающий твердые частицы осадка, и далее в фильеры (платиновые стаканчики). В дне фильеры имеются отверстия, через которые продавливаются волокна диаметром 127 мкм. Выходящие из отверстий фильер волокна обдуваются теплым воздухом калорифера. В результате испарения жидкости формируется твердое волокно. В процессе намотки на барабан волокна вытягиваются, их диаметр становится равным 10...25 мкм.

Следующий этап – спекание волокна. Волокно медленно нагревают до 1500 °С. Выгорание органических веществ происходит при 500...700 °С. В дальнейшем имеет место образование  $\gamma$ - и  $\alpha$ -модификаций  $Al_2O_3$ . Предел прочности полученного

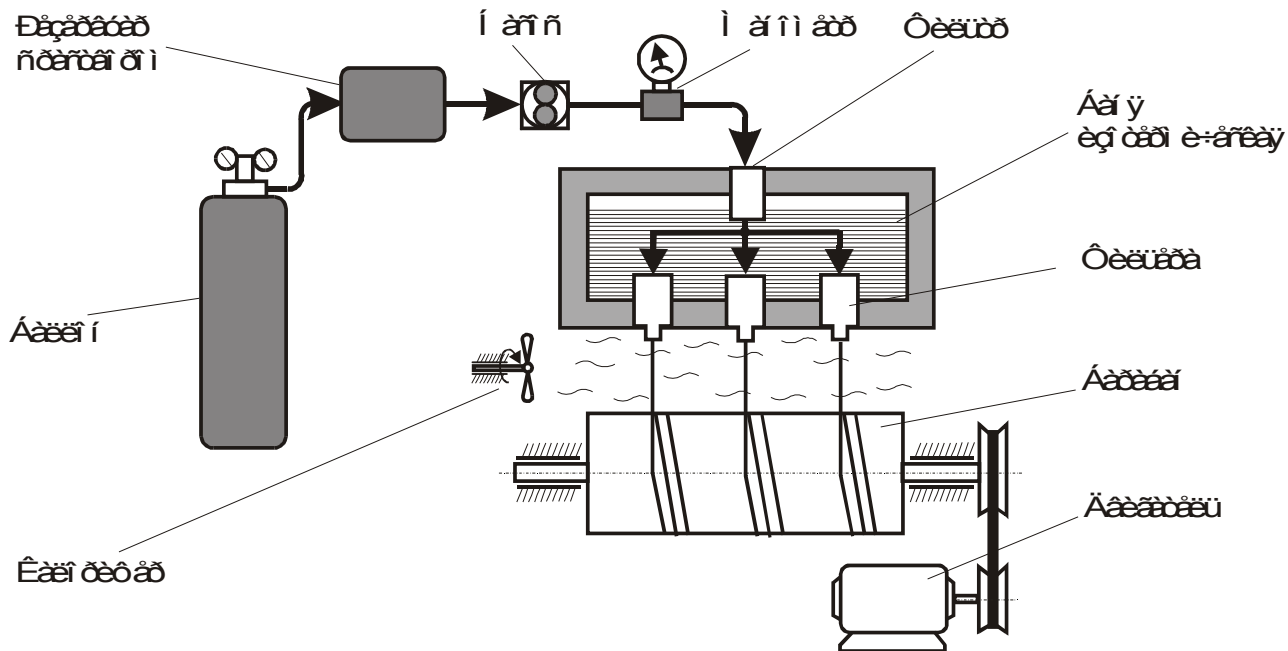


Рис. 3.29. Схема установки для экструзии непрерывных волокон



волокна составляет  $\sim 2100$  МПа, модуль упругости  $\sim 175$  ГПа, плотность –  $3150$  кг/м<sup>3</sup>.

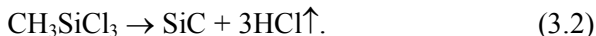
В соответствии с другой – пленочной технологией получения волокон оксидов исходный материал получают растворением соли металла в карбоновой кислоте (уксусной, муравьиной, лимонной). Раствор выливают на поверхность стекла и нагревают до  $80$  °С. Полученный при высыхании раствора гель рвется на полоски толщиной в несколько микрометров, шириной в  $2...3$  раза больше толщины и длиной до  $30$  мм. При нагреве волокон до  $1200$  °С происходит выгорание органических веществ и превращение материала в оксидную керамику.

Одним из наиболее перспективных типов упрочнителей композиционных материалов являются волокна карбида кремния. Плотность карбидокремниевых волокон равна  $3900...4050$  кг/м<sup>3</sup>. Предел прочности при растяжении составляет  $\sim 3000...3400$  МПа, модуль упругости  $\sim 450$  ГПа [4]. Прочностные свойства волокон определяются типом и количеством локальных дефектов, имеющихся на их поверхности (утолщения, посторонние частицы, точки налипания). Карбидокремниевые волокна жаростойки и жаропрочны, они способны выдерживать длительное воздействие высоких температур. При получении металлических композиционных материалов это обстоятельство имеет важное значение. Перспективным является использование волокон карбида кремния в качестве упрочнителя композиционных материалов с матрицей из титана и жаропрочных сплавов. В качестве покрытий на карбидокремниевые волокна могут наноситься карбиды вольфрама WC, тантала TaC, гафния HfC, титана TiC. Карбид кремния может использоваться и в качестве покрытия на борных волокнах (волокна борсик).

Преимущества карбидокремниевых волокон по физическим и механическим свойствам выше, чем у борных. Другое важное достоинство волокон из карбида кремния – их более низкая стоимость по сравнению с борными волокнами. Это обстоятельство обусловлено меньшей стоимостью исходных веществ, используемых при производстве волокон SiC, большей скоростью осаждения карбида кремния, другими технологическими особенностями.

Процесс получения карбидокремниевых волокон подобен получению борного волокна при использовании в качестве основы углеродных волокон. Однако дозировка и транспортировка парогазовой фазы при производстве карбидокремниевых волокон сложнее по сравнению с получением борного волокна. Вместо хлорида бора в реактор подается смесь алкилсиланов и водорода. Соотношение газов в реакторе определяется исходным диаметром основы, требу-

мым диаметром получаемого волокна и размерами реактора. Осаждение карбида кремния осуществляется по реакции [1]



Температура подложки составляет 1100...1200 °С.

### 3.2.7. НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ (УСЫ)

Нитевидные кристаллы – один из наиболее интересных типов упрочнителей в композиционных материалах. Их основными особенностями являются монокристаллическое строение и малые размеры. Часто нитевидные кристаллы из-за их формы называют «усами» (рис. 3.30). Диаметр нитевидных кристаллов достигает 10 мкм. Отношение длины к диаметру составляет 20...100, иногда свыше 1000 [1, 3].

Нитевидные кристаллы отличаются малым количеством дефектов строения, поэтому уровень их прочностных свойств достаточно высок. Свойства некоторых нитевидных кристаллов приведены в табл. 3.11 [1].

Прочностные свойства усов диаметром менее 2 мкм близки к теоретическим значениям. Однако чем больше диаметр кристаллов, тем меньше величина предела текучести. Зависимости пределов прочности усов оксида алюминия и железа приведены на рис. 3.31 [1]. Объясняется подобный ход зависимостей тем, что с ростом диаметра увеличивается количество дефектов строения кристаллов.

Для упрочнения композиционных материалов предпочтительно применение керамических усов, например  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и SiC. Они обладают высоким уровнем механических свойств, отно-

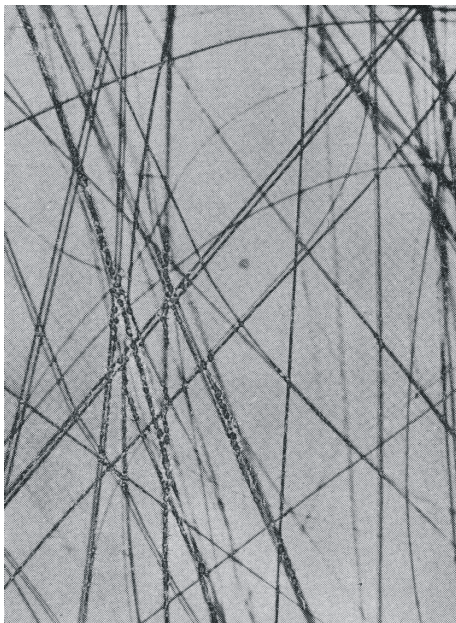


Рис. 3.30. Усы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (сапфира) диаметром от 1 до 15 мкм [30]

сительно малой плотностью и хорошо совместимы с металлическими матрицами.

Таблица 3.11

## Физико-механические свойства некоторых типов «усов»

Материал кристаллов	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-4}$ кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности (максимальный), кг/мм <sup>2</sup>	Удельная прочность, км	Удельный модуль упругости, км
Графит	3640	1660	7,1	1995	1075	42500
SiC	2665	3320	4,9	2100	650	15200
BeO	2560	2770	3,5	1330	450	12300
B <sub>4</sub> C	2450	2490	4,5	1400	550	20000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3880	6,4	2800	525	10700
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1675	3320	3,1	1400	425	12000
Fe	1540	6370	2,0	1330	200	3200
Cr	1665	7500	2,3	903	125	3200
Cu	1080	8860	1,3	300	25	1500

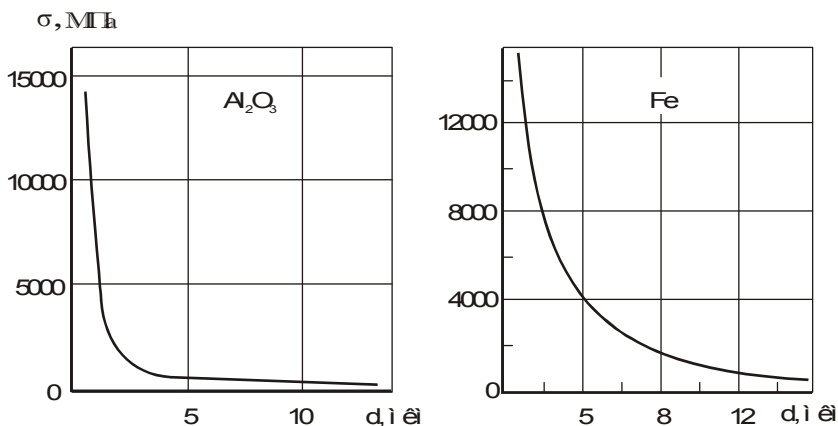


Рис. 3.31. Зависимости прочности «усов» железа и оксида алюминия от их диаметра

Нитевидные кристаллы способны зародиться и расти естественным путем, без вмешательства человека. Примерами кристаллов природного происхождения могут служить волокна асбеста,

нефрита, рутила, золота, серебра. Однако при изготовлении композиционных материалов используются нитевидные кристаллы, выращенные в производственных условиях. Обращение к нитевидным кристаллам как к упрочнителям композиционных материалов, разработка технологических процессов их выращивания обусловлены высоким уровнем механических свойств кристаллов.

В настоящее время можно говорить о нескольких способах получения нитевидных кристаллов [1, 3]: выращивание из покрытий; выращивание в электролите; осаждение из газовой фазы; получение кристаллов химическими методами; кристаллизация из растворов; вискеризация волокон.

**Для выращивания усов из покрытий** используют некоторые легкоплавкие металлы, например цинк, кадмий, олово, индий. Покрытия толщиной несколько микрон наносят электролитически, осаждением пара или окунанием в ванну с расплавленным металлом. Диаметр усов, растущих из покрытий, достигает 2 мкм (иногда 5 мкм), длина составляет несколько миллиметров.

Скорость роста усов составляет 0,05...0,4 А/с. При приложении внешнего давления скорость роста кристаллов возрастает в тысячи раз. Процесс выращивания нитевидных кристаллов из покрытия можно проиллюстрировать следующим примером [1]. На стальную пластину толщиной 300 мкм электролитически наносится слой олова толщиной 5 мкм. Снаружи пластину зажимают между двумя жесткими плитами. Нитевидные кристаллы растут на отполированном торце. При температуре 215 °С длина усов достигает 5 мм. После удаления усов новые кристаллы начинают расти на прежних местах. Это свидетельствует о наличии в исходном материале фиксированных источников роста нитевидных кристаллов. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что рост нитевидных кристаллов происходит путем пристройки атомов у их основания.

**Способом электролитического осаждения** выращивают нитевидные кристаллы железа, серебра, меди диаметром 0,1...5 мкм и длиной несколько миллиметров. Для ограничения роста кристаллов в поперечном направлении и оптимизации процесса осаждения материала в электролит добавляют органические примеси (желатин, глюкоза, олеиновая кислота) и неорганические частицы (стекло, графит). Примеси приводят к загрязнению образующихся кристаллов и снижению уровня их прочностных свойств.

В дугогорящих камерах с графитовыми электродами производится **выращивание нитевидных кристаллов в дуге высокого давления**. При испарении положительного графитового электрода на отрицательном электроде постепенно образуется нарост. На-

рост размерами в несколько сантиметров раскалывают и из него извлекают нитевидные кристаллы. Длина усов, выращенных этим методом, достигает 3 см, диаметр – до 5 мкм.

**Методом осаждения из газовой фазы** получают усы алюминия, бария, вольфрама, железа, меди, никеля, платины и других материалов. Диаметр кристаллов изменяется от долей микрометра до 40 мкм, длина достигает нескольких сантиметров. При реализации этой технологии исходное вещество помещается в вакуумируемую печь или в печь, заполненную инертным газом, в которой имеются зоны, различающиеся по уровню температуры. Вещество нагревается, испаряется, переносится в виде газа в более холодную зону печи, где и конденсируется в виде нитевидных кристаллов [1]. Температура зоны печи, в которой происходит конденсация испарившегося вещества, на 20...200 градусов ниже температуры плавления материала.

**Химические способы получения нитевидных кристаллов** основаны на химическом взаимодействии испаряемого вещества и окружающей среды. Образующиеся в результате химической реакции компоненты переносятся в зону осаждения, где и происходит кристаллизация материала в форме усов.

Наиболее распространены химические методы получения усов. Основной метод заключается в восстановлении металлов из различных соединений. В качестве примера можно описать химическую технологию получения усов железа. Исходным веществом является хлорид железа  $\text{FeCl}_2$ , который засыпают в керамическую лодочку. Лодочку помещают в кварцевую трубу, установленную в нагретой зоне печи (рис. 3.32) [5]. Через трубу пропускают водород, разбавленный инертным газом. Железо восстанавливается в соответствии со следующей химической реакцией:



Нитевидные кристаллы железа растут в виде пушистого нароста на стенках и кромках лодочки. Изменяя параметры технологического процесса (температура, скорость пропускания водорода, чистота исходных продуктов и др.), можно управлять размерами и формой образующихся усов. Оптимальные режимы восстановления некоторых металлов отражены в табл. 3.12.

К химическим способам получения монокристаллических волокон относят также способ ПЖК (пар – жидкость – кристалл) [1]. Механизм образования кристаллов основан на конденсации атомов газообразного материала в частице жидкого материала, являющегося промежуточной средой, перенасыщении жидкости и выделении

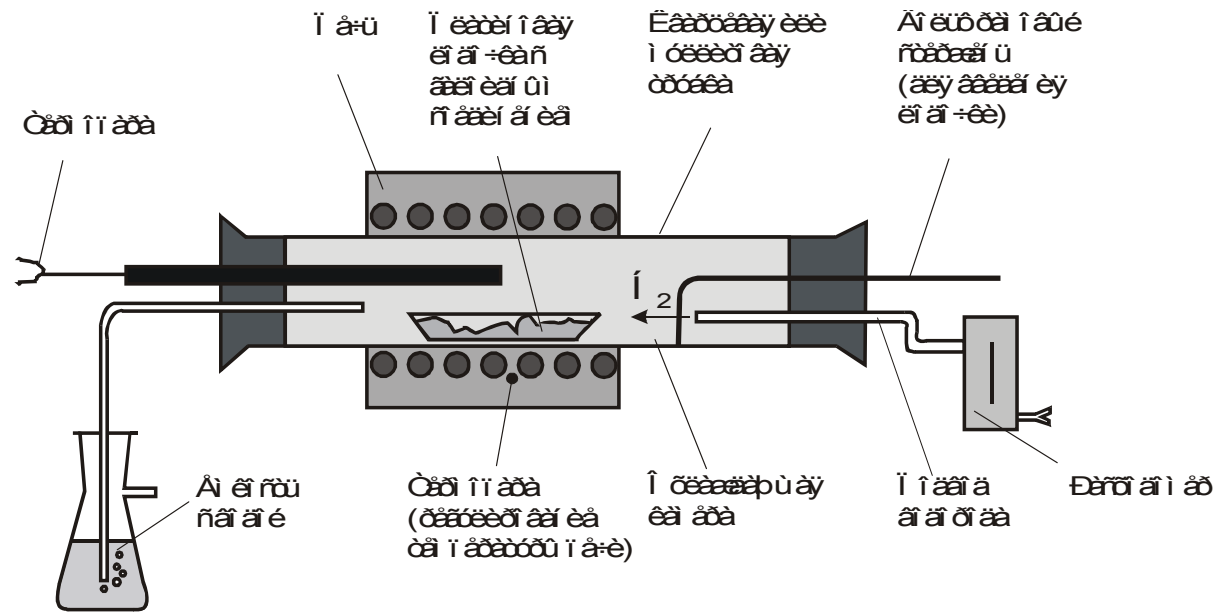


Рис. 3.32. Прибор для выращивания монокристаллических «усов»

Т а б л и ц а 3.12

**Оптимальные режимы получения нитевидных кристаллов методом восстановления галогенидов [1]**

Металл	Галогениды	Температура восстановления, °С	Максимальная длина волокон, мм	Давление галогенида, мм.рт.ст.
Cu	CuCl CuBr CuI	650	50	10,4
Ag	AgCl AgI	800	10	0,14
Ni	NiBr <sub>2</sub>	740	2	68
Co	CoBr <sub>2</sub>	650	3	8
Fe	FeCl <sub>2</sub> FeBr <sub>2</sub>	730 760	20	59

избыточного материала на подложке в виде усов. На рис. 3.33 [1] приведена схема выращивания кристаллов кремния. При реализации технологии ПЖК в качестве подложки используют кремниевую пластину. На нее наносят каплю золота, при температуре, близкой к температуре кристаллизации. Кремниевая подложка частично растворяется в золоте, образуется раствор Au-Si. Снаружи

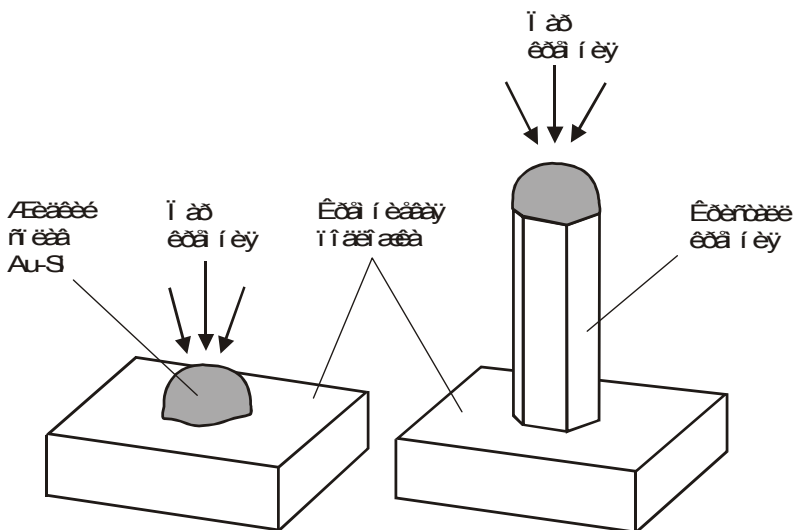


Рис. 3.33. Схема роста кристалла кремния по механизму пар–жидкость–кристалл (ПЖК)

подводится парообразный кремний, отдельные атомы которого конденсируются в капле. В результате конденсации происходит перенасыщение капли атомами кремния. Избыточный кремний выделяется на границе раздела жидкость – твердый кристалл, в результате чего происходит рост нитевидного кристалла.

По способу ПЖК получены кристаллы кремния, германия, арсенида и фосфида галлия. Растворителями служили золото, серебро, платина, палладий, никель и медь.

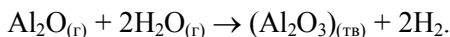
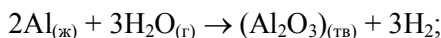
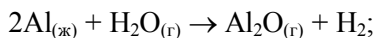
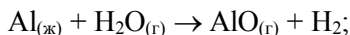
Нитевидные кристаллы тугоплавких соединений получают в основном **методом осаждения из парогазовой фазы**. При его реализации паро- или газообразные элементы химически взаимодействуют друг с другом или другими компонентами парогазовой смеси и выделяют искомое соединение в кристаллическом виде [1].

На рис. 3.34 [1] приведена схема установки для выращивания усов карбида кремния на графитовой ленте. Установка представляет собой герметичную проходную печь, к торцам которой прикреплены камеры. При вращении роликов через рабочее пространство печи протягивается графитовая лента, на которой происходят образование и рост нитевидных кристаллов. Температура, при которой идет процесс, составляет 1250...1350 °С. Рост кристаллов происходит за счет пиролиза метилтрихлорсилана



или в результате взаимодействия газовой углеродсодержащей среды с шихтовыми материалами, находящимися в контейнере. Длительность цикла составляет 5...7 суток. После окончания цикла графитовая лента разматывается с барабана и от нее отделяются нитевидные кристаллы карбида кремния.

Получение кристаллов оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  происходит при выполнении следующих реакций [1]:



Окисляется алюминий влагой, содержащейся в водороде.

На рис. 3.35 [1] приведена схема ростовой сборки, применяемая для выращивания нитевидных кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ростовая сборка представляет собой несколько плит, выполненных из высокоглиноземистого огнеупора, разделенных продольными перегородками. В пространство между перегородками продувается водород. Сборка





заполнена порошком алюминия. В результате выполнения описанных выше реакций в верхней части перегородок и на поверхности плит над перегородками вырастают нитевидные кристаллы.

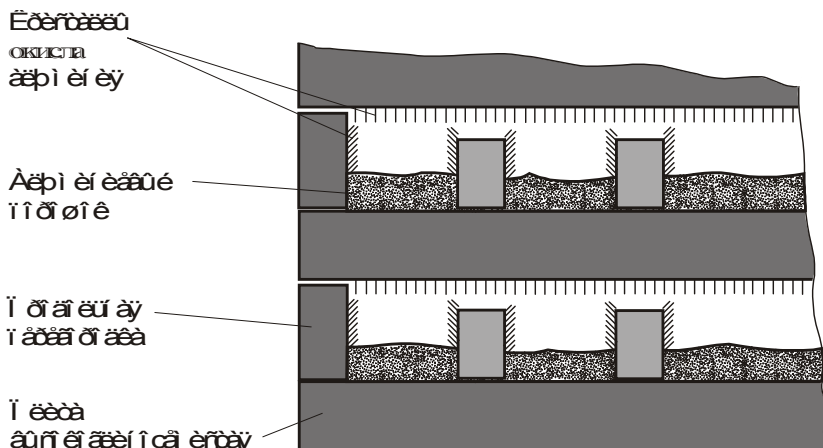


Рис. 3.35. Схема ростовой сборки для выращивания нитевидных кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Процесс выращивания монокристаллов проводят при  $1250\text{...}1300\text{ }^\circ\text{C}$  в водороде, содержащем  $0,05\text{...}0,10\%$   $\text{O}_2$ . Нагрев сборок осуществляют в полуметодических печах.

### 3.3. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ ПРЕПРЕГОВ

#### 3.3.1. ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕПРЕГОВ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ АРМАТУРЫ В СМОЛАХ

При производстве полимерных композиционных материалов широко используются промежуточные полуфабрикаты в виде препрегов. Полуфабрикаты этого типа обладают большой жизнеспособностью. При комнатной температуре срок хранения препрегов составляет  $\sim 3$  месяца. Охлажденные препреги могут сохранять свои свойства до 1 года [5]. Лучшие условия хранения препрега реализуются при температуре сухого льда.

Препрег представляет собой полуфабрикат, хранящийся в виде рулонов или пакетов. Слои препрега разделены пленкой. При комнатной температуре препреги приобретают технологические свойства

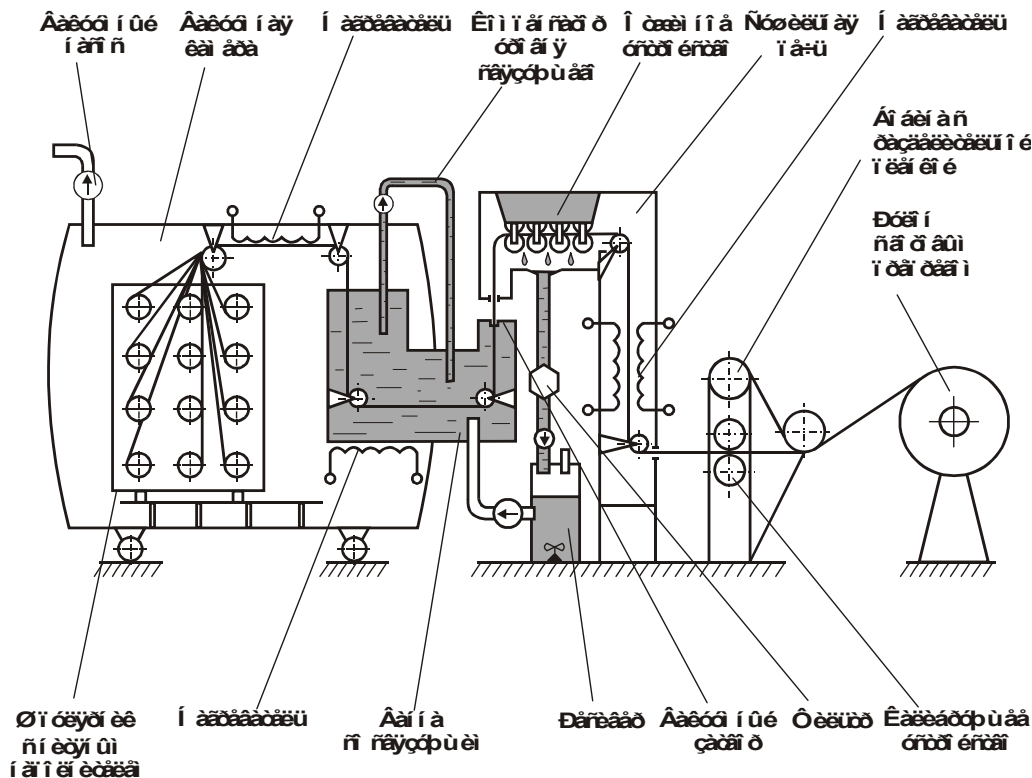


Рис. 3.36. Схема пропиточной установки для получения препрега

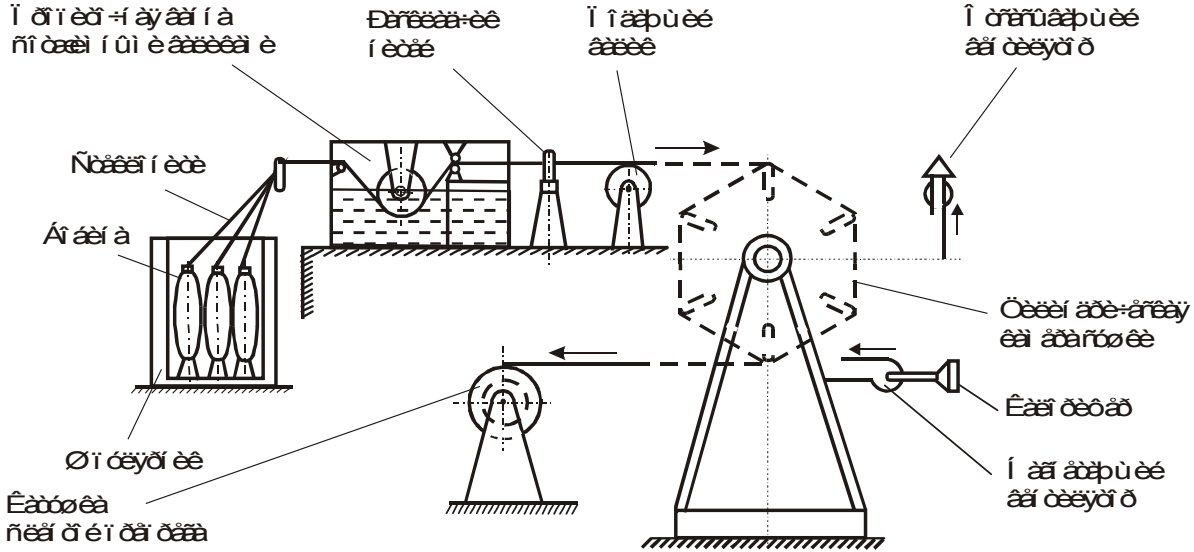


Рис. 3.37. Установка для получения препрега в виде ленты

«чистых» материалов. Степень липкости, характерная для данной температуры, делает удобным процесс ручной выкладки. Препреги могут раскраиваться на станках с числовым программным управлением.

Для изготовления препрегов используют пропиточные установки вертикального или горизонтального типов. На рис. 3.36 [5] приведена схема пропиточной машины вертикального типа. Нити наполнителя поступают со шпулярника, формируются в ленту, сушатся нагревателем, после чего попадают в ванну со связующим. Пропитанная связующим лента отжимается в специальном устройстве и сушится в печи. Готовый препрег покрывается разделительной пленкой и сматывается в рулон.

Препрег, полученный на специальных пропиточных установках, отличается высоким качеством пропитки, минимальными повреждениями волокон, равномерностью содержания связующего [5].

На рис. 3.37 приведена схема малогабаритной установки для получения препрегов [5]. Исходные нити поступают с бобин, протягиваются с высокой скоростью через пропиточную ванну, отжимаются вальцами, раскладываются в ленту и попадают в цилиндрическую камеру сушки. Подсушенная до требуемого состояния лента покрывается разделительной пленкой и сматывается на приемный барабан. Разделительная пленка предохраняет препрег от склеивания.

### **3.3.2. ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕПРЕГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ ДИСПЕРСНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

Для получения препрегов могут быть использованы различные типы связующего материала. Обычно связующее используется в виде смол. В последние годы разрабатываются и применяются методы получения препрегов с использованием полимеров, находящихся в тонкодисперсном порошкообразном состоянии [36]. Промышленно выпускается множество полимеров в порошкообразном состоянии, в том числе полиэтилен низкого и высокого давления, полипропилен, фторопласты, поливинилхлорид, поливинилбутираль, полиамиды, поликарбонат, полисульфон и другие материалы. По сравнению со многими используемыми смолами дисперсные полимеры отличаются меньшей себестоимостью переработки, более высоким качеством получаемого материала, простотой автоматизации технологических процессов их нанесения, меньшей степенью загрязнения биосферы.

Для нанесения порошковых материалов на волокнистый наполнитель их переводят в псевдооживленное («кипящее») состоя-

ние. Это состояние порошка достигается при определенных режимах продувания через него газа. Перевод порошкообразной системы в подвижное (виброожиженное) состояние возможен также под действием механических колебаний или при совместном воздействии продуваемого газа и механических колебаний (вибрации) [36].

Для получения препрегов на основе дисперсных полимеров используют электростатическое нанесение порошков на волокнистую арматуру. Процесс нанесения полимеров заключается в электрозарядении частиц порошка, переносе их во внешнем электрическом поле, осаждении и удержании на волокнах. В результате этого в объеме волокнистого наполнителя формируется электроосажденный слой заряженных частиц.

Разработано несколько схем нанесения порошкообразных полимеров на непрерывную волокнистую арматуру [36]. Одна из них показана на рис. 3.38 [36]. Препрег получают путем одностороннего нанесения порошкового связующего при просыпании поступающих из дозатора частиц через вибрирующую сетку на заземленную ленту арматуры. Закрепление связующего на ленте происходит при нагреве материала в термической камере. Сформированная таким образом лента препрега наматывается на приемный барабан.

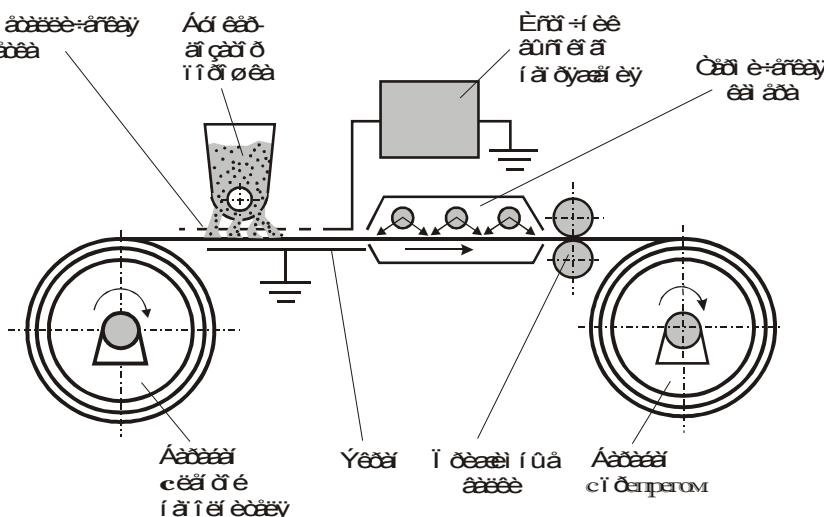


Рис. 3.38. Схема устройства для получения препрегов с использованием дисперсного порошка, просыпающегося на ленту через металлическую сетку – электрод [36]

В устройстве, изображенном на рис. 3.39 [36], лента, являющаяся основой препрега, поступает в верхнюю зону камеры псевдоожигения, контактирует с заземленным электродом и с прилипшими частицами выходит из камеры. Слой заряженных частиц образуется на поверхности и внутри ленты. Закрепление частиц на ленте происходит в процессе дальнейшего нагрева ленты в камере термической обработки.

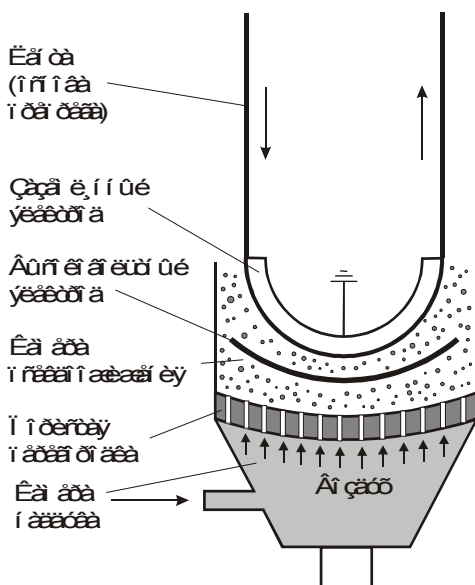


Рис. 3.39. Схема устройства для получения препрегов с использованием псевдоожигенного полимерного порошка [36]

На рис. 3.40 [36] показана схема получения препрега с горизонтальным расположением ленты. Лента с армирующим материалом поступает с барабана в зазор между камерой псевдоожигения и заземленным экраном. «Кипящий» слой полимера в камере псевдоожигения создается вибратором и воздухом, поступающим под давлением из камеры наддува через пористую перегородку. Электроосаждение частиц порошка полимера на волокнистую арматуру осуществляется под действием электрического поля, создаваемого между заземленным экраном и электродом, соединенным с источником высокого напряжения. Лента с осажденным на нее порошком поступает в термическую камеру, где под действием тепла

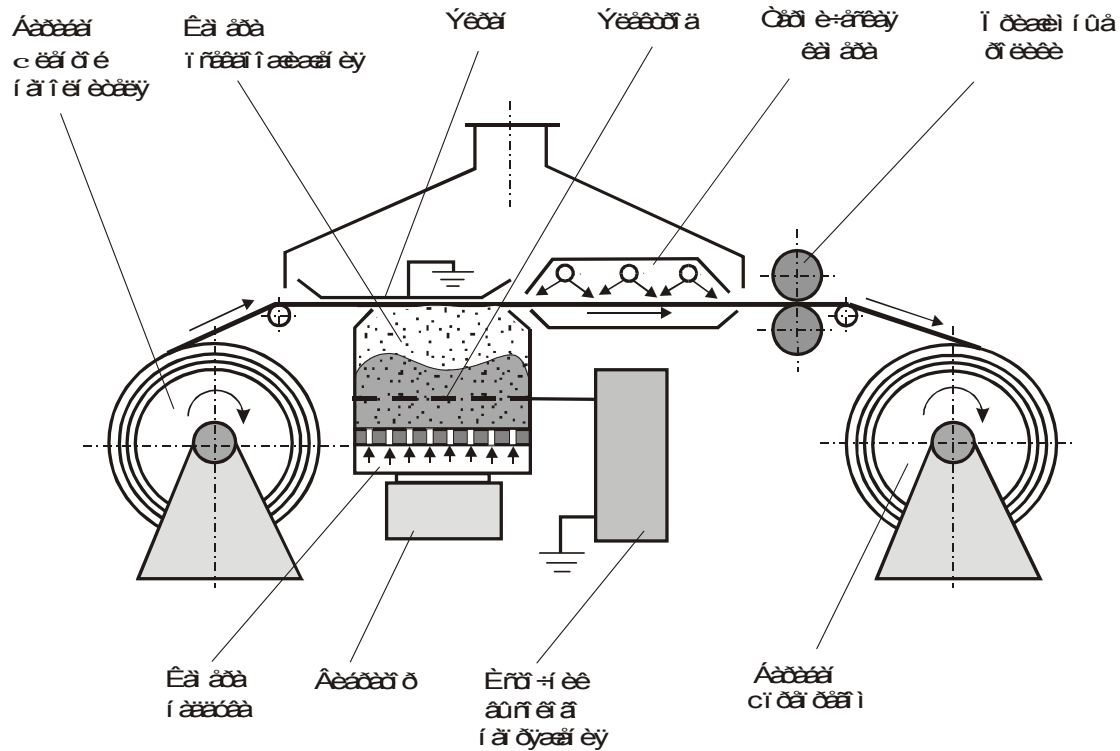


Рис. 3.40. Схема устройства для получения препрегов в квазиоднородном электрическом поле



происходит оплавление прилипших к волокнам частиц. После завершения термической обработки препрег наматывается на приемный барабан.

Используют несколько схем двустороннего нанесения порошка на ленту с армирующим материалом. Одна из них показана на рис. 3.41.

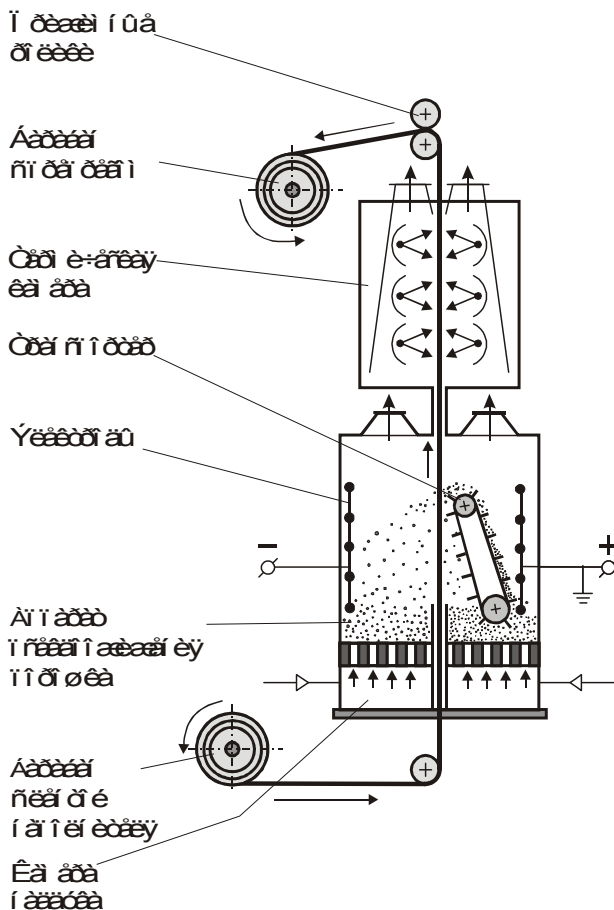


Рис. 3.41. Схема установки для двустороннего электроосаждения порошка на ленту наполнителя [36]

Технология получения препрегов, основанная на использовании дисперсных связующих типа ароматического полиамида, а

также армирующих материалов в виде стекло- и углеволокон, имеет значительные технические и экономические преимущества по сравнению с другими методами изготовления препрегов [36].

#### 3.4. ОБЪЕДИНЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Моноволокна, полученные различными методами, могут быть непосредственно использованы для упрочнения композиционных материалов. Однако часто волокна объединяются в пряжу. Пряжей называется нить из волокон, соединенных при помощи кручения [4]. Пряжа бывает однородной, т. е. полученной из одинаковых волокон, и смешанной (из смеси различных волокон). Пряжа может быть использована для армирования композитов в виде нитей, а также в виде тканей.

Для оценки линейной плотности волокон или нитей часто используют внештатную единицу – текс. Текс – это отношение массы нити (волокна)  $m$  к длине  $L$ .  $1 \text{ текс} = 1 \text{ г/км} = 1 \text{ мг/м}$ . В номерной системе величина  $N$  показывает, сколько метров нити содержится в единице массы, например в 1 г.

$$N = L/m.$$

Ткани, полученные при ткацкой переработке нитей и волокон, являются результатом закономерного переплетения продольно расположенных элементов (основы) и элементов поперечного расположения (утка). По конструктивному признаку различают материалы с полотняным, ситцевым, сатиновым, саржевым и трикотажным типом переплетения (рис. 3.42) [5]. Основными техническими характеристиками тканей являются: состав волокна, вид переплетения, способ отделки, ширина, толщина, масса квадратного метра, число нитей основы и утка на единицу длины (плотность ткани), разрывная нагрузка, удлинение при разрыве.

По ширине ткани подразделяют на узкие (40...75 см), средней ширины (75...100 см), широкие (100...150 см), очень широкие (150...200 см и более). При ширине 0,5...7,5 см ткани называют лентами [5]. Если масса одного квадратного метра ткани составляет до 100 г, то в этом случае ее считают легкой. При величине 100...500 г/м<sup>2</sup> речь идет о тканях средней массы и более 500 г/м<sup>2</sup> – о тяжелых тканях.

Схемы строения тканей полотняного и саржевого переплетения приведены на рис. 3.43, *а, б* [1]. В качестве примера в табл. 3.13 [5] приведены характеристики тканей, полученных на основе органических волокон. Недостатком материалов (тканей и сеток), получаемых способом ткацкой переработки, является необходимость

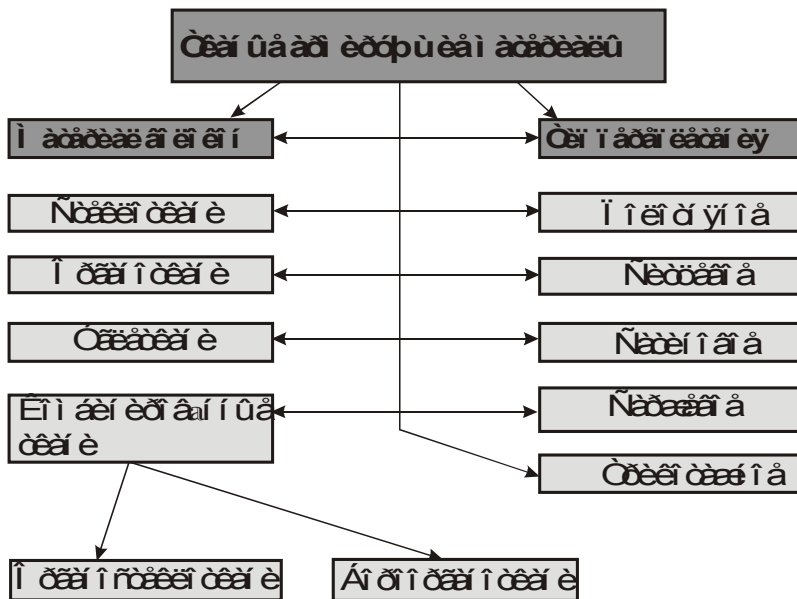


Рис. 3.42. Классификация тканых армирующих материалов

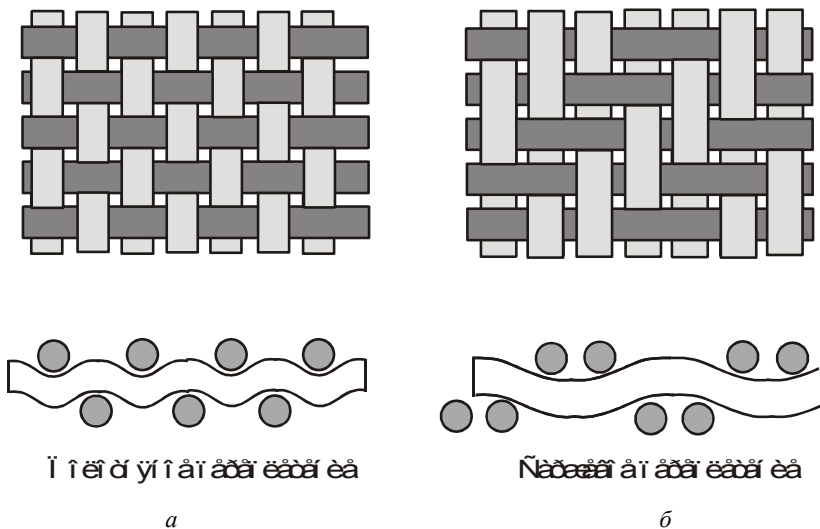


Рис. 3.43. Схемы полотняного (а) и саржевого (б) переплетений нитей в тканях

Таблица 3.13

## Характеристики тканей на основе органоволокон

Марка материала (страна)	Тип переплетения нитей	Поверхностная плотность $m$ , кг/м <sup>2</sup>	Толщина $h$ , мм	Плотность укладки нитей, текс/мм		Средняя прочность $\sigma^+_1$ , ГПа		Предельная деформация $\epsilon$ , %	
				по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку
СВМ (Россия)	Полотно	-	0,45	142	142	0,39	0,39	-	-
		0,11	0,25-0,3	44,1	47	0,24	0,27	14	12
		0,075	0,15	26,5	30	0,28	0,35	10	9
	Рогожка 2/2	0,18	0,35	59	74	0,27	0,31	9	11
		0,11	0,20	43	44	0,26	0,26	10	10
	Сатин 8/3	0,16	0,40	75	69	0,26	0,21	12	9
	Однонаправленная лента	0,17	0,35	168	25,7	71	-	7,5	-
Кевлар-49 (США)	Полотно	-	0,45	140	130	-	-	-	-

применения только достаточно пластичных волокон и пряжи. В наибольшей степени этот недостаток относится к металлическим проволокам. В местах контакта элементов основы и утка происходит деформация материала, образуются дефекты, что снижает механические свойства композиционных материалов.

Более широкие возможности использования волокон и пряжи реализуются при получении вязаных, трикотажных сеток. На рис. 3.44 [1] приведены схемы строения трикотажных сеток типа «кулирная гладь» и «ластик». Для изготовления трикотажных сеток может быть использована высокопрочная металлическая проволока диаметром 0,02...0,2 мм с относительно малым удлинением (1...3 %) [1]. Трикотажной переработкой могут быть получены комбинированные сетки (из различных материалов), сетки объемного переплетения.

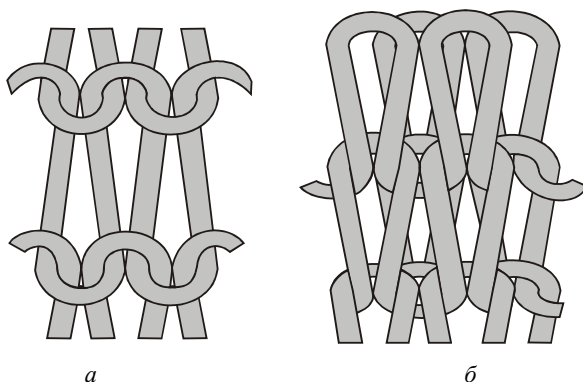


Рис. 3.44. Переплетение волокон в трикотажных сетках:  
а – кулирная гладь, б – ластик

Упрочняющие волокна могут быть объединены также и в нетканые материалы (типа войлока), в которых отсутствует их закономерная ориентация. Разработаны методы жидкостного, воздушного, гравитационного, вакуумного войлокования [1]. На рис. 3.45 [1] приведена схема жидкостного войлокования листового материала из металлических волокон. Основой для получения войлока этим методом служит суспензия, залитая в бак. Из бака суспензия поступает на сетку, покрытую фильтровальной бумагой. Перемещение сетки осуществляется валками. Для удаления из объема материала жидкости предусмотрены камеры. Полученный таким образом лист обжимается валками и при необходимости спекается в печи.

Особую форму композиционных материалов представляют так называемые сэндвичевые (сотовые) конструкции. Они применяются

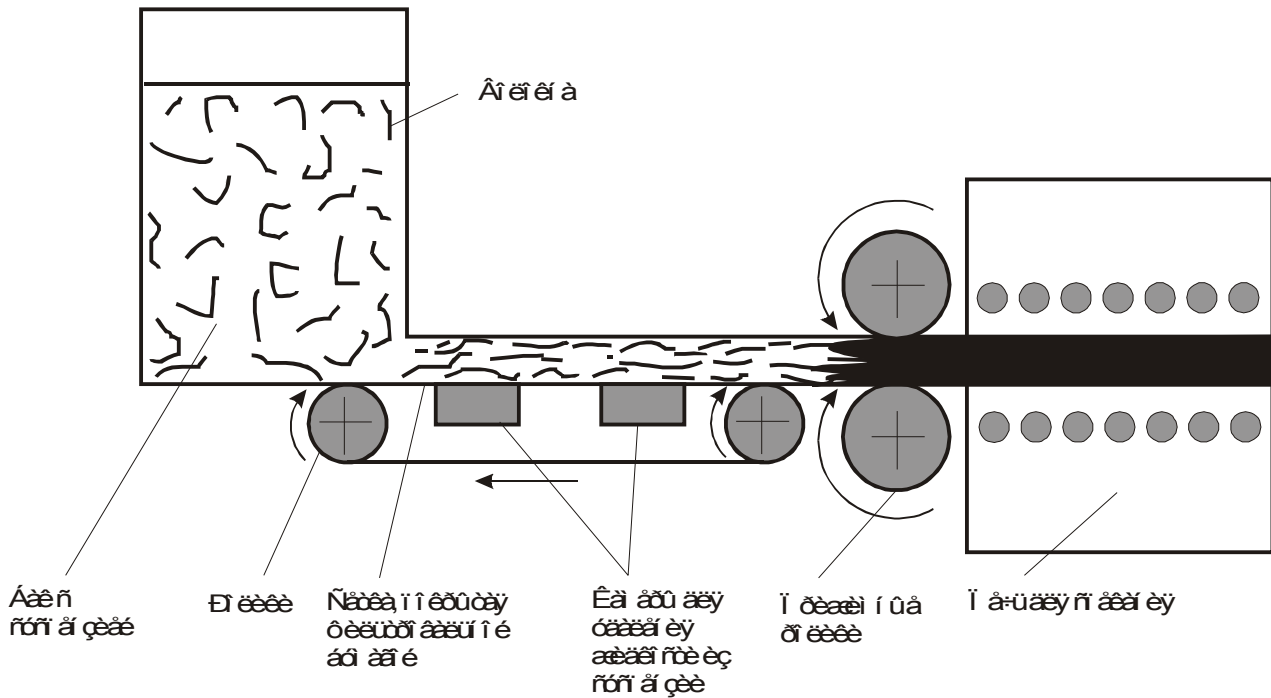


Рис. 3.45. Схема жидкостного войлокования непрерывного листового материала из металлических волокон

практически во всех видах гражданских и военных самолетов и вертолетов [24]. В качестве примера на рис. 3.46 [24] приведена схема строения сотовой конструкции. Конструкция содержит две прочные облицовочные пластины, наполнитель (легкую жесткую сердцевину) и два адгезионных слоя, связывающих облицовочные пластины с наполнителем. Форма ячеек в сотовых наполнителях может быть различной. Типичные примеры конфигурации ячеек приведены на рис. 3.47 [24].

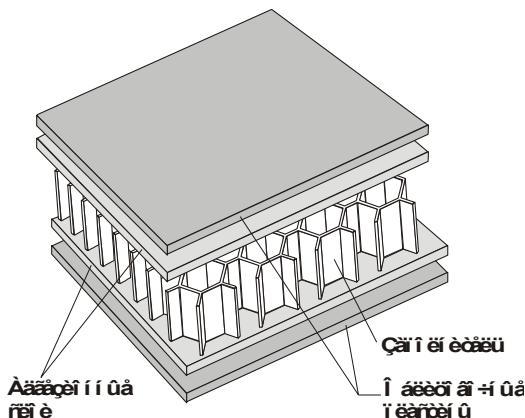


Рис. 3.46. Сэндвичевая (сотовая) конструкция

Сотовый наполнитель повышает изгибную жесткость конструкции. Эффективность сотовой конструкции может быть проиллюстрирована данными, приведенными в табл. 3.14 [24]. Эти данные соответствуют конструкциям различной толщины с алюминиевыми листами (рис. 3.48). Приведенные результаты можно считать уникальными, поскольку при относительном повышении плотности на 6 % изменение параметров конструкции от А к В привело к увеличению ее жесткости в 39 раз.

Т а б л и ц а 3.14

**Свойства сэндвичевых конструкций различной толщины**

Свойства сотовых конструкций	Тип конструкции (по рис. 3.48)		
	А	Б	В
Жесткость ( $D$ ), кг·см <sup>2</sup> /см	1822	13933	71004
Относительное изменение жесткости	1,0	7,4	39,0
Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>	29	30	31
Относительное изменение плотности	1,0	1,03	1,06

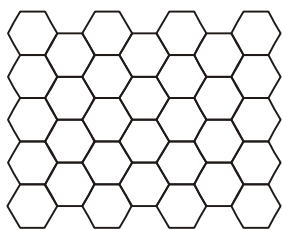
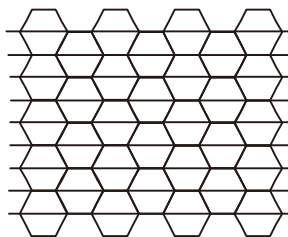
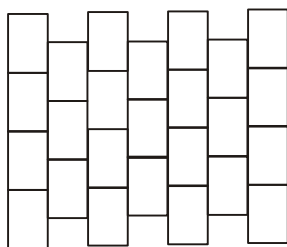
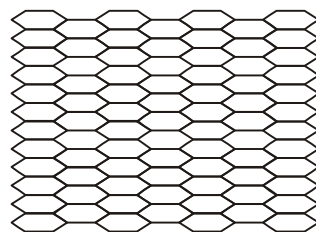
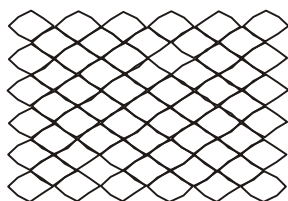
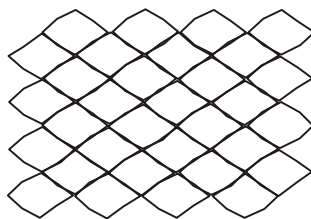
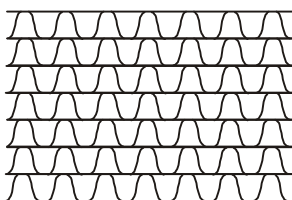
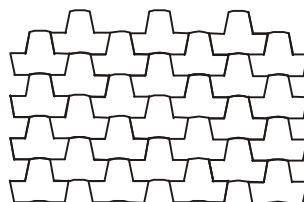
*a**б**в**г**г**е**ж**з*

Рис. 3.47. Различные виды конфигураций ячеек в сотовых заполнителях



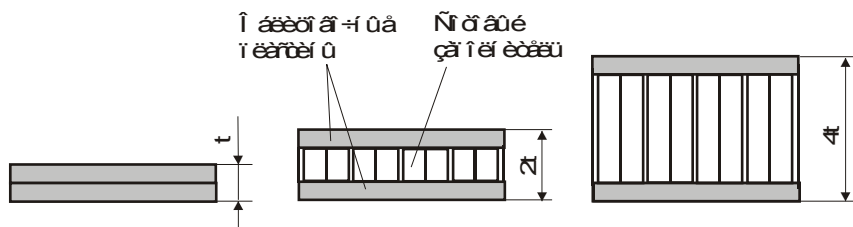


Рис. 3.48. Сэндвичевые конструкции с разной высотой сотового заполнителя

Материалами несущих пластин в сэндвичевых конструкциях могут служить стекловолоконистые препреги, препреги на основе углеродных волокон, алюминиевые, титановые сплавы, стали и др. Основные функции сотового заполнителя заключаются в обеспечении устойчивости несущих поверхностей и передаче сдвиговых нагрузок по толщине композита. Для успешного выполнения этих функций заполнитель должен быть жестким и легким. В качестве материала для изготовления сотовых заполнителей могут быть использованы дерево, металл, крафт-бумаги, арамидные бумаги, пены (пенополистирол, вспененный металл). Пенонаполненные структуры используются на практике около 40 лет. Эффективность стеклопластиковых сотовых структур подтверждена их применением в космических кораблях «Джемини» и «Аполло» [24].

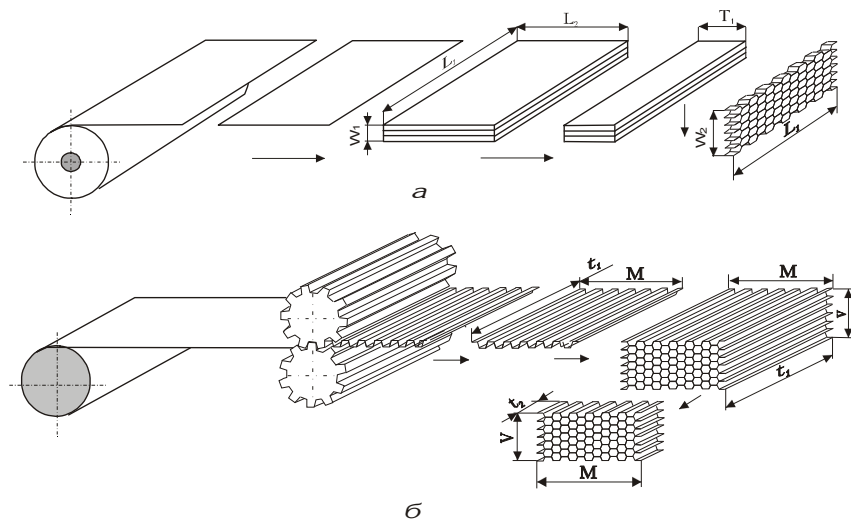


Рис. 3.49. Схемы изготовления сотового заполнителя с использованием процесса растяжения пакета (а) и рифления листа (б)

Сотовые структуры выпускаются с использованием, главным образом, двух технологических процессов (рис. 3.49). Один из них заключается в следующем (рис. 3.49, *а*). Из листового материала собирают пакет. По исходным линиям листы соединяют между собой. Далее собранный пакет растягивается, образуя ячеистую структуру. В соответствии со второй технологией на первой стадии осуществляется процесс рифления исходного листа (пластика, бумаги, металла). Для получения сотового заполнителя рифленные листы соединяются между собой (свариваются, склеиваются) (рис. 3.49, *б*). При использовании алюминиевых сплавов эффективная плотность сотового заполнителя, полученного по технологии растяжения пакета, составляет  $32...192 \text{ кг/м}^3$ , а заполнителя, полученного методом рифления, –  $128...880 \text{ кг/м}^3$  [24].



## 4. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Металлические композиционные материалы представляют собой очень широкий класс материалов. Следует особо отметить широкую гамму компонентов, используемых для изготовления композитов такого типа, и разнообразие структур, присущих металлическим композитам. Получение широкой номенклатуры композиционных материалов стало возможным, благодаря применению разнообразных технологических процессов. Общая классификация металлических композиционных материалов приведена на рис. 4.1 [5]. В зависимости от агрегатного состояния матричного материала

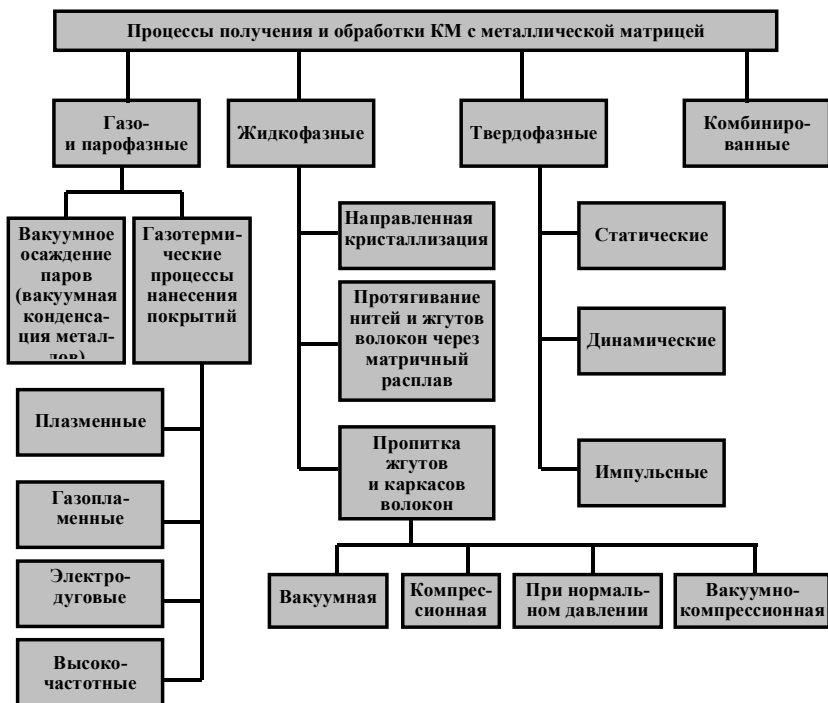


Рис. 4.1. Общая классификация процессов получения и обработки композитов с металлической матрицей

в процессе производства композитов различают твердофазные, жидкофазные, газо- и парофазные, а также комбинированные методы получения металлических композиционных материалов. В следующих параграфах рассматриваются некоторые важные особенности различных технологических процессов изготовления композитов с металлической матрицей.

## 4.1. ТВЕРДОФАЗНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.1.1. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПРОКАТКИ

Одним из наиболее производительных является метод получения металлических композиционных материалов, основанный на прокатке заготовок. Технология прокатки позволяет получать так называемые естественно-композиционные материалы. Для этого могут быть использованы, например, стали доэвтектоидного состава. В отожженном состоянии они имеют ферритоперлитное строение (рис. 4.2). При нагреве до температур, соответствующих межкритической области ( $A_{C1} - A_{C3}$ ), сталь имеет ферритоаустенитную структуру. Если осуществить прокатку стали в межкритической области температур и обеспечить немедленную закалку, то в результате будет получена ориентированная ферритомартенситная структура (рис. 4.2). Таким образом может быть сформирована ориентированная слоистая структура и в других сплавах, находящихся в гетерофазном состоянии.

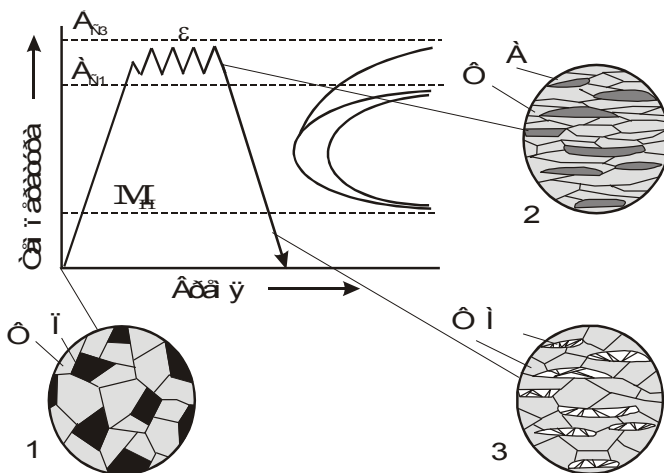


Рис. 4.2. Схема получения естественно-композиционного материала со слоистой ферритомартенситной структурой

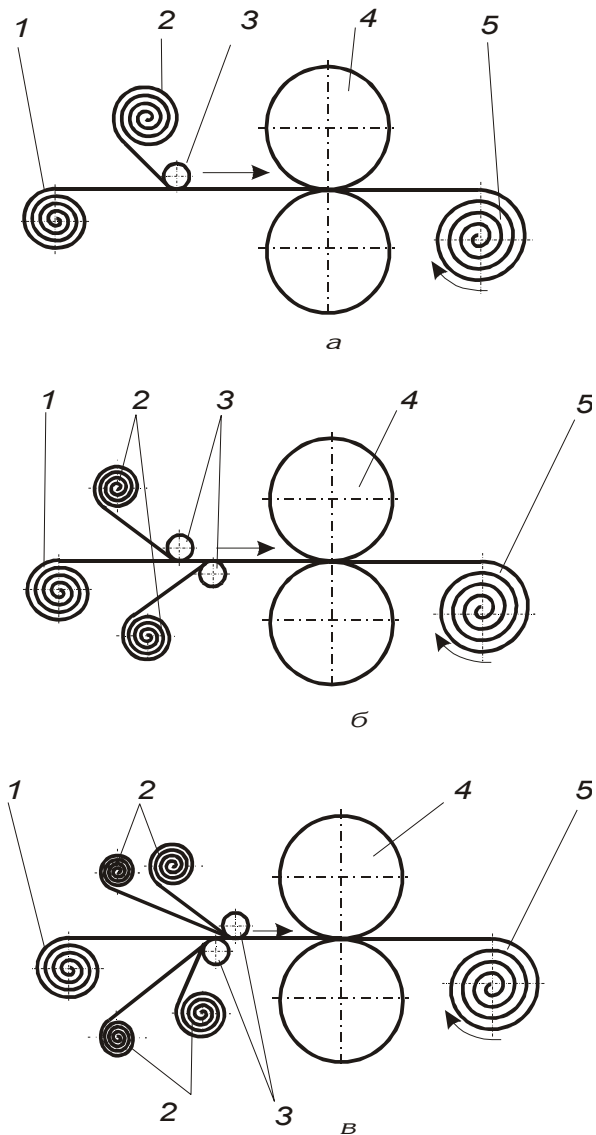


Рис. 4.3. Схема получения двух-, трех- и пятислойной полосы методом холодной прокатки в рулонах:

1 – разматыватель с рулоном полосы основного слоя, 2 – разматыватель с рулоном полосы лакирующего слоя, 3 – направляющие ролики; 4 – рабочие валки прокатного стана, 5 – моталка с рулоном многослойной полосы

На рис. 4.3 показаны схемы получения прокаткой двуслойных, трехслойных и пятислойных металлических лент [43]. Возможны и другие схемы прокатки слоистых металлических материалов.

На рис. 4.4 показана схема получения слоистого металлического композиционного материала по технологии пакетной прокатки. Эта технология позволяет получить композит с малой толщиной слоев (до 5 мкм). В соответствии с представленным технологическим процессом листовые заготовки собирают в пакет, нагревают и подвергают прокатке в горячем состоянии. Степень обжатия в валках должна быть достаточной для сварки листов по контактируемым поверхностям (десять процентов). Для исключения окисления поверхностей свариваемых листов может быть осуществлена сварка пакета

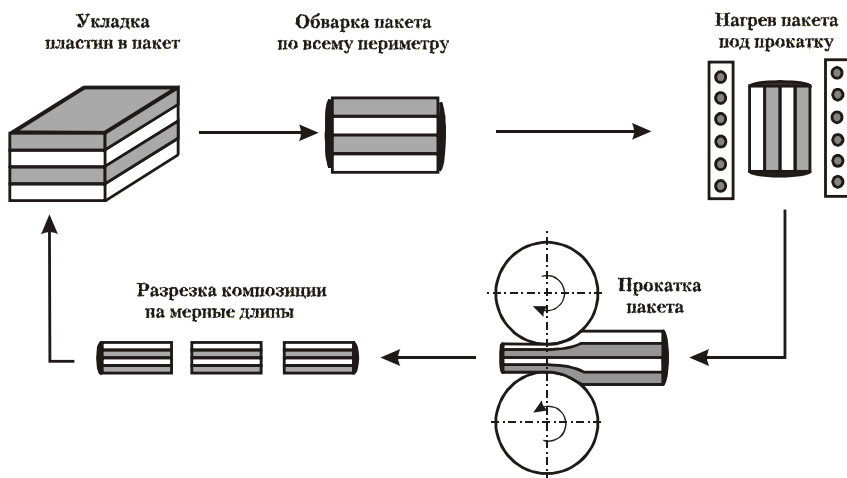


Рис. 4.4. Схема получения слоистых металлических композиционных материалов методом пакетной прокатки

по его периметру. Полученный при прокатке многослойный лист разрезается на несколько заготовок, которые снова собираются в пакет. Пакет обваривается, нагревается и снова подвергается прокатке. В результате многократного повторения процесса получается слоистый композиционный материал с малой толщиной листов. На рис. 4.5 показана структура слоистой композиции техническое железо-медь, полученной методом пакетной прокатки.

В качестве упрочняющих элементов металлических композиционных материалов, получаемых методом прокатки, могут использоваться металлические сетки, ленты, непрерывные и дискрет-

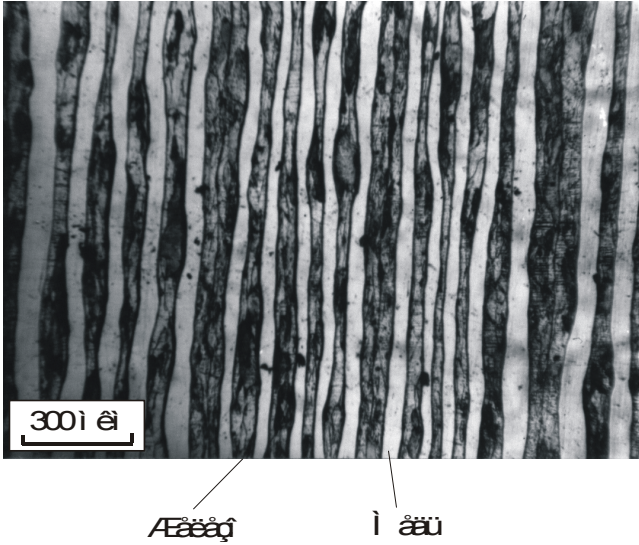


Рис. 4.5. Структура слоистого композиционного материала (техническое железо – медь), полученного методом пакетной прокатки

ные волокна. На рис. 4.6 показана схема непрерывного процесса прокатки металлических полос, армированных дискретными волокнами [1]. Волокна вдавливаются между листами матричного материала. Листы контактируют между собой и плотно обжимаются. В результате формируется прочное соединение.

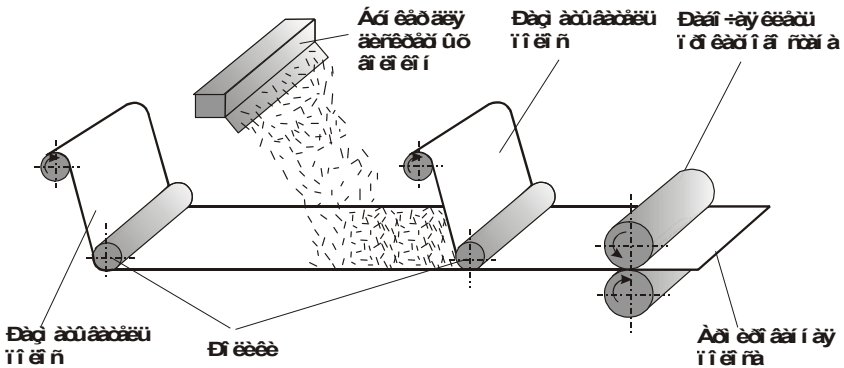


Рис. 4.6. Схема непрерывного процесса прокатки металлических полос, армированных дискретными волокнами

Основными технологическими параметрами процесса прокатки являются степень деформации и температура прокатки. При разработке технологических процессов для каждого типа изделия эти параметры выбираются индивидуально.

#### **4.1.2. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ПРЕССОВАНИЯ**

Прессование является основной операцией процесса изготовления композиционных материалов по методу диффузионной сварки. При выполнении этой операции происходит соединение отдельных элементов заготовок в компактный материал, т. е. формирование изделий. В большинстве случаев прессование заготовок композитов проводится в замкнутом объеме – в пресс-формах, состоящих из матрицы и двух пуансонов. Прессование композиционных материалов по сути является технологическим процессом, близким к операции прессования заготовок в технологии порошковой металлургии.

В процессе прессования происходит пластическая деформация материала матрицы, необходимая для заполнения пространства между волокнами упрочняющей фазы и для максимального уплотнения самой матрицы. При этом наряду с пластической деформацией на границе раздела между слоями либо частицами матрицы (на границах раздела матрица–матрица и матрица–волокно) протекают диффузионные процессы, обеспечивающие прочную связь на этих границах и необходимый уровень прочности композиционного материала [5].

Основными технологическими параметрами прессования композиционных материалов являются давление прессования, температура, время выдержки и среда, в которой осуществляется сам процесс.

Различают четыре разновидности технологии прессования композитов [5]:

- прессование в замкнутых пресс-формах и между обогреваемыми плитами;
- ступенчатое прессование;
- изостатическое, или автоклавное, прессование;
- динамическое горячее прессование.

#### **Прессование в замкнутых пресс-формах и между обогреваемыми плитами**

Для прессования используют обычные гидравлические прессы различной мощности, применяемые для обработки металлов давлением, в порошковой металлургии, в производстве пластмасс. В



качестве основной технологической оснастки используют специальные пресс-формы, нагреваемые до необходимой температуры. Диффузионная сварка осуществляется на воздухе, в вакууме или защитной среде.

На рис. 4.7 приведена схема диффузионной сварки в вакуумной камере гидравлического пресса [5]. Прессуемый пакет устанавли-

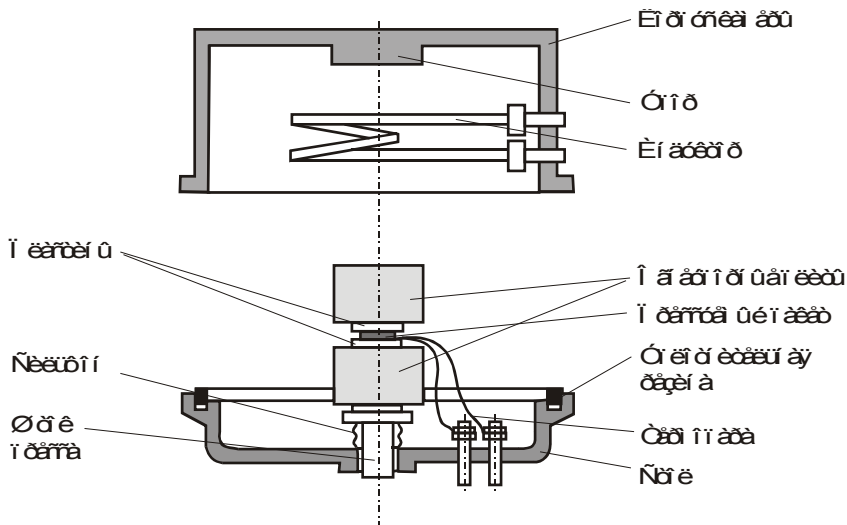


Рис. 4.7. Схема установки для горячего прессования

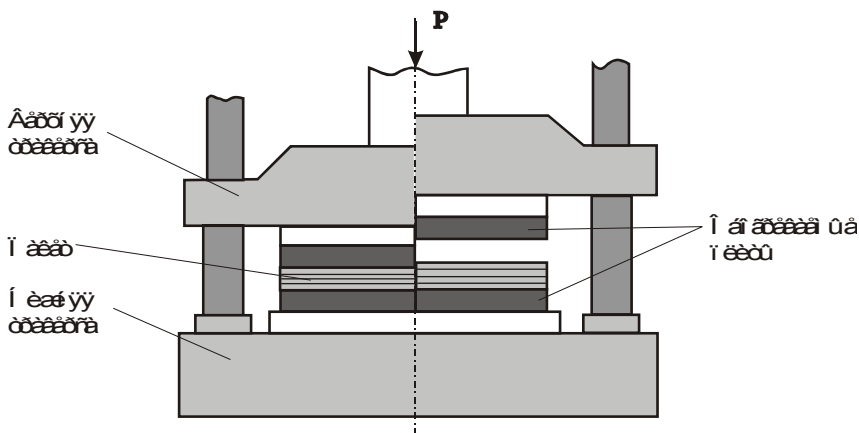


Рис. 4.8. Схема прессования листов бороалюминия на прессе с обогреваемыми плитами

ваются между пластинами (например, молибденовыми). Во избежание приваривания пакета к плитам на их поверхности наносят слой спиртовой суспензии оксида алюминия. Нагрев пакета осуществляется индуктором. Для термической изоляции прессуемого пакета и находящихся снаружи плит служат огнеупорные плиты, выполненные, например, из хромомagnesита. Величина вакуума в камере составляет  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  мм рт. ст.

Схематически процесс прессования бороалюминиевых листов между обогреваемыми плитами показан на рис. 4.8. Правая часть рисунка соответствует положению элементов в исходном перед прессованием состоянии, левая – выдержке сжатого бороалюминиевого пакета в нагретом состоянии.

### Ступенчатое прессование

Ступенчатое прессование – разновидность процесса прессования между обогреваемыми плитами [5]. Достоинства этого метода заключаются в возможности получения полуфабрикатов или изделий из КМ большой длины с использованием прессов с небольшими размерами прессующих плит. Эта возможность реализуется за счет периодической работы пресса. На первом этапе деформируется один из концов заготовки. После завершения прессования первого участка заготовка продвигается на один шаг, длина которого определяется размером прессующих плит. После обжатия заготовки и выдержки в течение времени, необходимого для сварки материала, выполняются последующие шаги. Количество перемещений заготовки определяется ее размерами (длиной) и степенью обжатия прессующими плитами

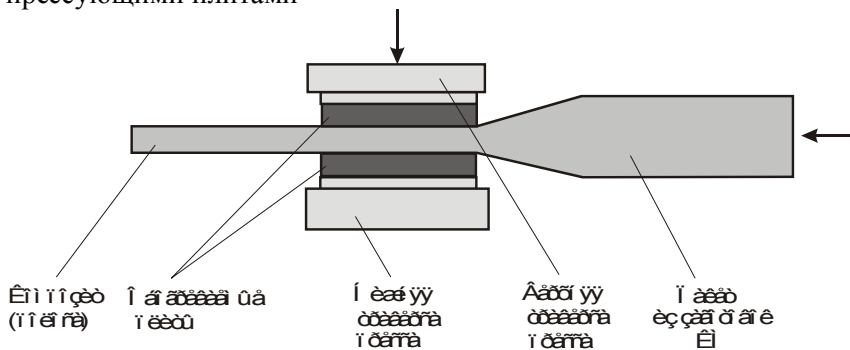


Рис. 4.9. Ступенчатое прессование длинномерных полуфабрикатов (полос, профилей) из бороалюминиевых композиций

Схема процесса ступенчатого прессования длинномерной полосы показана на рис. 4.9. Недостатком ступенчатого прессования является невысокая производительность процесса, что связано с необходимостью выдержки каждого из прессуемых участков при заданных давлении и температуре в течение значительного времени [5].

**Изостатическое, или автоклавное, прессование**

Схематически процесс изостатического горячего прессования приведен на рис. 4.10. На первой стадии осуществляется сборка заготовки с формующими элементами. Геометрия формующих элементов определяется формой будущего изделия (рис. 4.11). Для детали, приведенной на рис. 4.10, формующие элементы имеют Г-образную форму. Собранные воедино заготовка и формующие элементы помещаются в контейнер, способный деформироваться при оптимальной температуре нагрева. Контейнер вакуумируется, заваривается и помещается в рабочую камеру установки для изостатического горячего прессования. В камеру под давлением подается газ (гелий или аргон, реже – азот или воздух) и производится нагрев контейнера. После выдержки при рабочей температуре контейнер охлаждается и разбирается.

Для создания избыточного давления в камере используют диафрагменные или поршневые компрессоры. Для изостатического прессования в основном применяют установки, обеспечивающие давление в рабочей камере от 21 до 210 МПа [5]. Важнейшим тре-

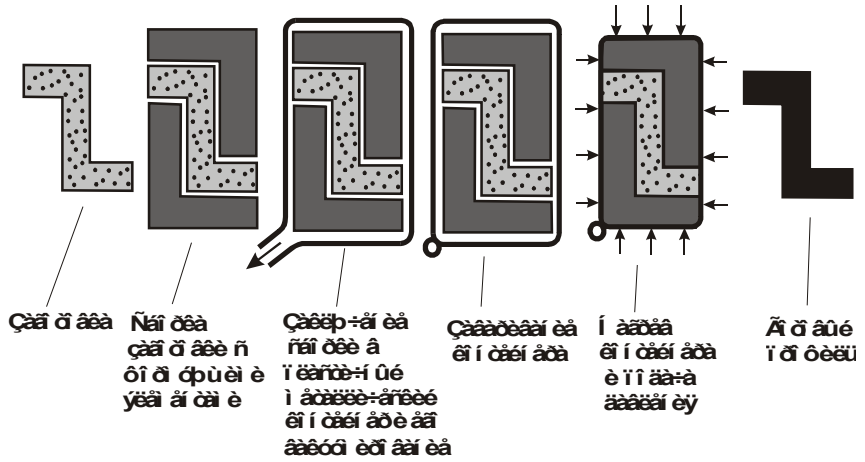


Рис. 4.10. Изостатическое прессование изделий из металлических композиционных материалов

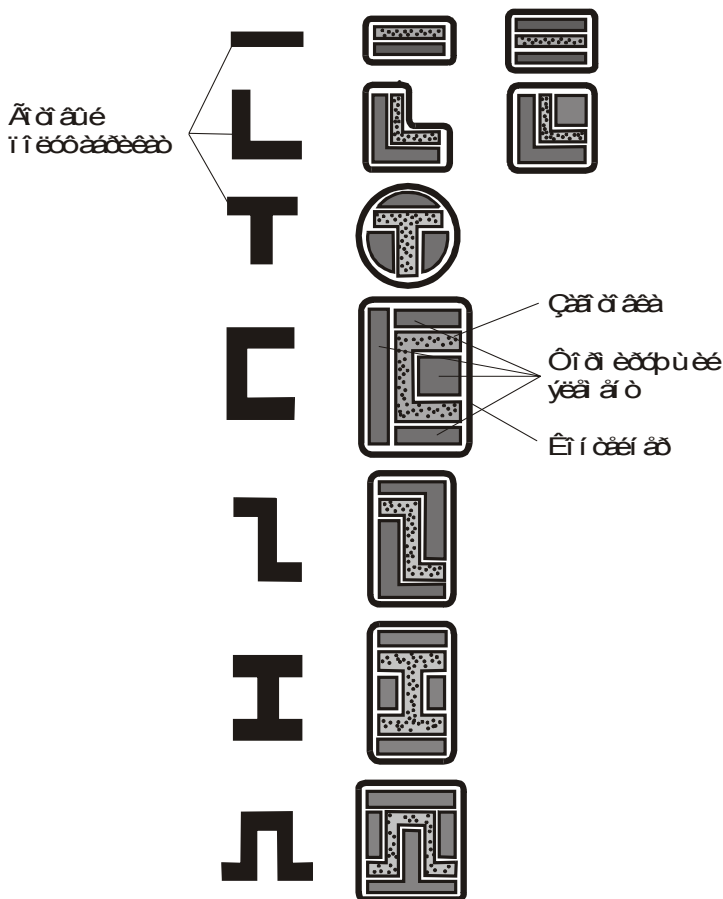


Рис. 4.11. Возможные виды полуфабрикатов, получаемых при изостатическом прессовании металлических композиционных материалов

бованием, предъявляемым к системе обеспечения температуры, является эффективный нагрев деформируемого контейнера при минимальном нагреве стенок камеры.

#### Динамическое горячее прессование

Процесс динамического горячего прессования заключается в динамическом приложении силы к деформируемой, предварительно нагретой заготовке. Процесс относится к категории импульсных

методов обработки материалов давлением [5]. В процессе динамического воздействия на заготовку происходит диффузионная сварка отдельных составляющих композиционного материала. Динамическое горячее прессование композитов обычно осуществляют на ковочных молотах в специальных пресс-формах или вакуумированных пакетах.

#### **4.1.3. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ**

Одним из важнейших методов формообразования металлических композиционных материалов в твердофазном состоянии является диффузионная сварка. Процесс получения металлических композиционных материалов методом диффузионной сварки по технологическим параметрам незначительно отличается от процесса сварки однородных материалов. Суть процесса заключается в выдержке прижатых друг к другу нагретых до определенной температуры тел. Температура нагрева и внешнее давление должны обеспечить эффективное развитие диффузионных процессов (масперенос из одного соединяемого тела в другое).

Схема установки для диффузионной сварки металлических композиционных материалов показана на рис. 4.12. Установка представляет собой водоохлаждаемую камеру, внутри которой закреплен стол. На столе устанавливается свариваемый пакет. Сверху пакет зажимается штоком, обеспечивающим необходимое давление. Вакуумным насосом из камеры откачивают воздух. Нагрев осуществляется вольфрамовыми, молибденовыми нагревателями, индукторами или электронным лучом. Электронно-лучевой нагрев применяется при сварке тугоплавких металлов и сплавов. Длительность сварки обычно составляет ~ 5...20 мин.

Процесс сварки осуществляется без расплавления металла матрицы. В месте сварки под действием высоких давлений и температуры происходит диффузионный перенос одного металла в другой. Процесс сварки осуществляют преимущественно в вакууме. Возможна сварка в инертной среде, а иногда и на воздухе [5]. Необходимым условием для получения металлических композиционных материалов методом диффузионной сварки является использование пластичной матрицы. Выполнение этого требования обеспечивает возможность пластического течения пластичной матрицы и заполнения пространства между элементами упрочняющего волокна.

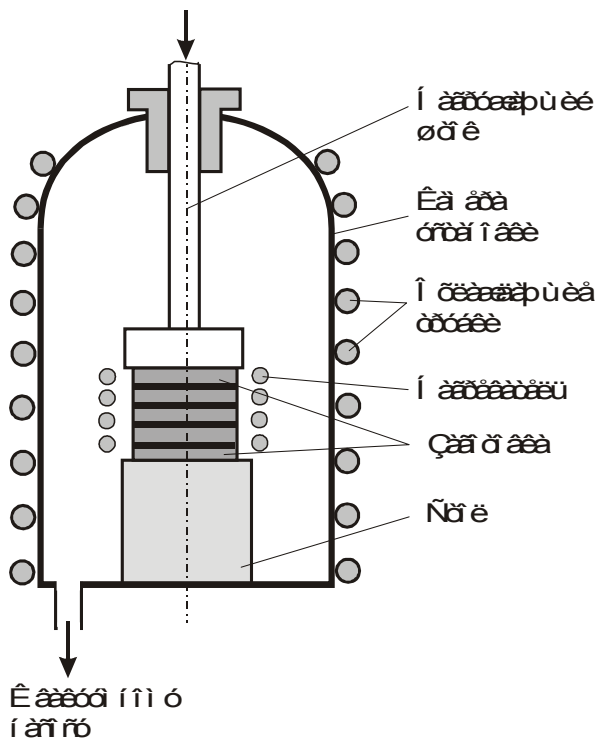


Рис. 4.12. Схема установки для диффузионной сварки

В качестве металлической матрицы обычно используется металлическая фольга из пластичного металлического материала. Матричный материал может быть предварительно тем или иным способом (например, плазменным, химическим или электрохимическим осаждением) нанесен на арматуру. Упрочнителем в металлических композиционных материалах служат металлические волокна, проволоки, нитевидные кристаллы. Возможно использование упрочнителя в виде сеток, тканей, жгутов.

Изготовление металлических композиционных материалов методом диффузионной сварки происходит с применением специального сварочного оборудования, прессов, автоклавов, изостатов, технологической оснастки. Принципиальная схема получения металлических композиционных материалов методом диффузионной сварки представлена на рис. 4.13. Процесс сварки заключается в выполнении следующих основных операций: подготовка поверхностей соединяемых элементов (матрицы и волокна), сборка пакета,

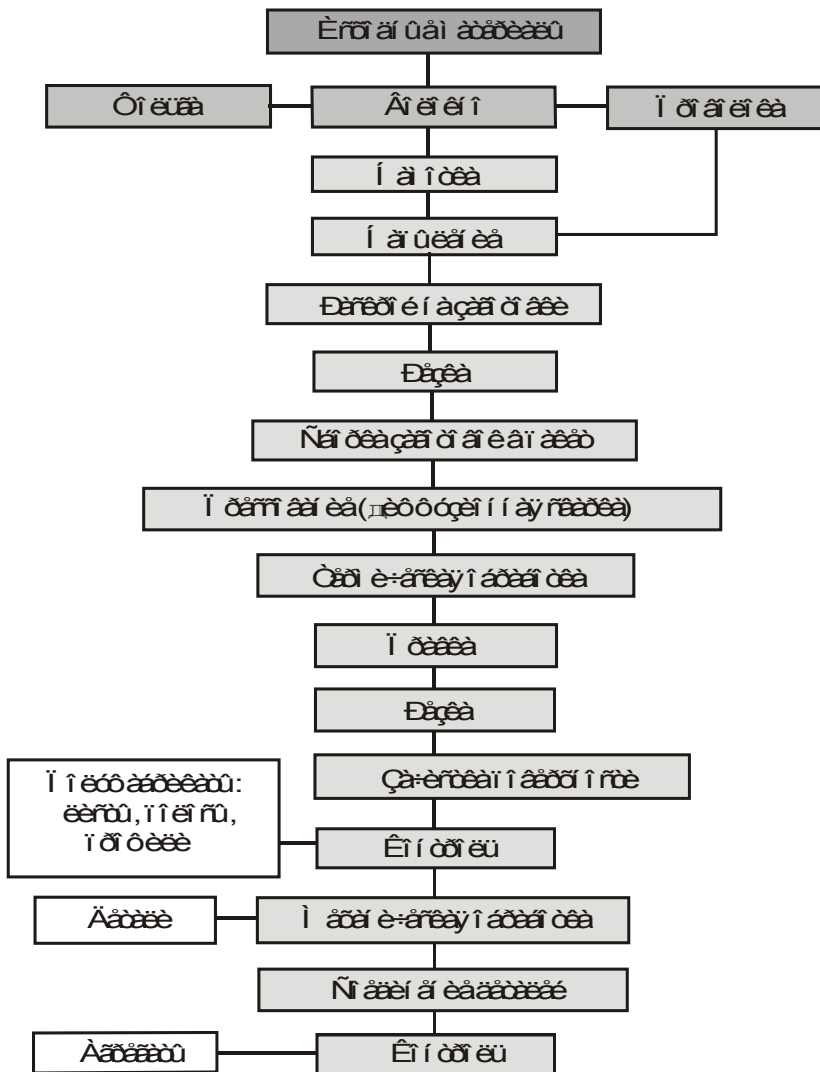


Рис. 4.13. Технологическая схема производства полуфабрикатов и изделий из металлических композиционных материалов методом диффузионной сварки

нагрев материала, создание давления, выдержка композиции под давлением при рабочей температуре, снятие давления.

Диффузионные процессы, обеспечивающие качество сварки, развиваются на границах раздела типа матрица–волокно и матри-

ца–матрица. Необходимо обеспечить наиболее благоприятные условия для развития диффузии, поэтому к состоянию контактирующих поверхностей предъявляются высокие требования. К основным методам подготовки поверхности матрицы относятся промывка, обезжиривание, механическая очистка, химическая обработка. Промывка осуществляется в спирте, горячей или холодной воде, в растворах с различными моющими средствами. Для обезжиривания поверхностей используют бензин, ацетон, специальные растворители. При необходимости осуществляется механическая очистка поверхности матричной фольги. Для этого используют шлифовальную бумагу, металлические щетки, абразивный инструмент.

Перед процессом диффузионной сварки для устранения смазочных материалов и окисных пленок армирующие волокна подвергают химической очистке в щелочных или кислотных средах. С целью повышения прочности на границе раздела матрицы и волокна на элементы арматуры методами химического, электрохимического осаждения или осаждения из газовой фазы наносят металлические покрытия.

Технологические параметры процесса подготовки поверхностей матричного материала и волокна выбирают экспериментально, учитывая при этом, что используемые материалы должны обеспечивать необходимое качество поверхностных слоев. Предполагается, что высокое качество поверхности должно сохраняться в течение времени, включающего промежуток между химической обработкой поверхностей и непосредственно диффузионной сваркой.

#### **4.1.4. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ**

Сварка взрывом – технологический процесс соединения однородных и разнородных материалов. Отличительной особенностью этого процесса является его кратковременность. Принципиальная схема сварки взрывом показана на рис. 4.14. Соединяемые заготовки располагают под углом друг к другу на расстоянии  $h_0$ . На верхнюю заготовку укладывают взрывчатое вещество, в котором закрепляют детонатор. Детонатор инициирует взрыв. При распространении взрывной волны возникает давление, прижимающее с большой скоростью верхнюю заготовку к нижней. Пластины контактируют друг с другом под углом  $\gamma$ . При распространении взрывной волны угол  $\gamma$  перемещается вдоль соединяемых поверхностей. В процессе соударения заготовок в приповерхностных слоях возникает пластическое течение материала. Поверхности сближаются



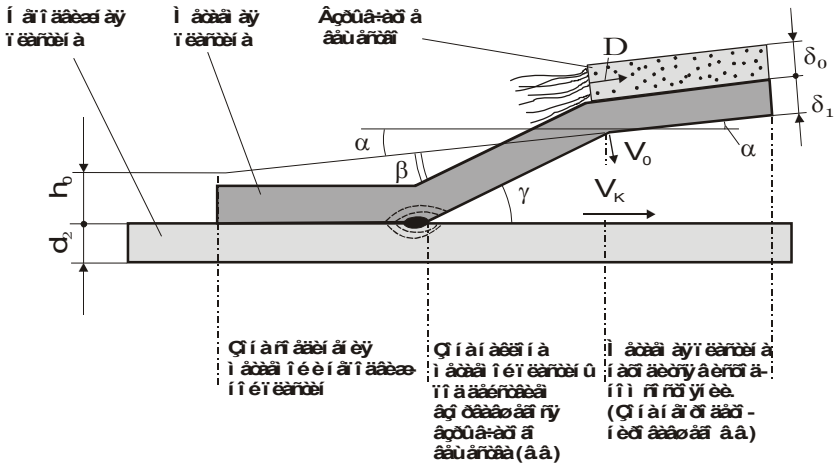


Рис. 4.14. Схема процесса сварки взрывом:

$\alpha$  – исходный угол наклона метаемой пластины;  $\beta$  – угол поворота пластины;  $\gamma$  – угол соударения пластин;  $V_k$  – скорость движения точки контакта пластин

на расстояние, соизмеримое с межатомным. Происходит сваривание материалов. Продолжительность сварки измеряется микросекундами. В связи с кратковременностью процесса активная диффузия элементов развиться не успевает.

Возможны различные варианты сварки взрывом. На рис. 4.15 представлена схема получения многослойной композиции [43]. В качестве заготовок в данном случае используются объекты в виде

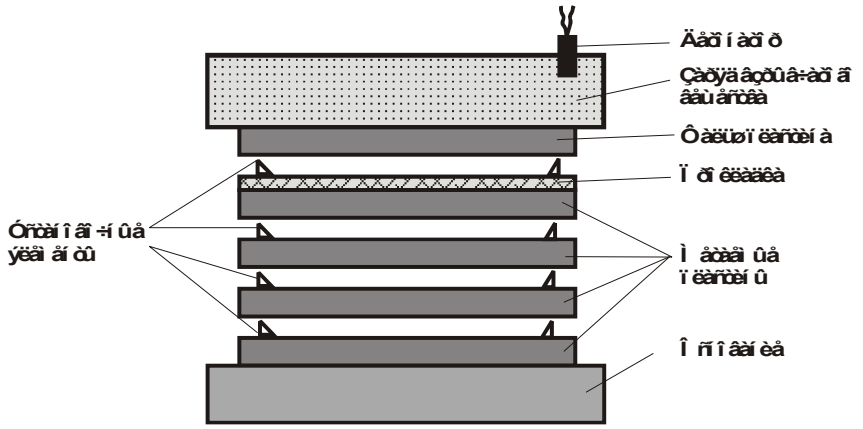


Рис. 4.15. Схема сварки взрывом многослойной заготовки

пластин. Для изготовления сваркой взрывом трубчатых слоистых металлических композиционных материалов могут быть использованы схемы соединения, приведенные на рис. 4.16. На первой схеме показано расположение взрывчатого вещества внутри трубчатых заготовок. На второй схеме изображен вариант, предусматривающий размещение взрывчатого вещества снаружи заготовок. Важным достоинством сварки взрывом является то, что она позволяет эффективно соединять разнородные материалы, даже те, которые сваркой плавлением не соединяются.

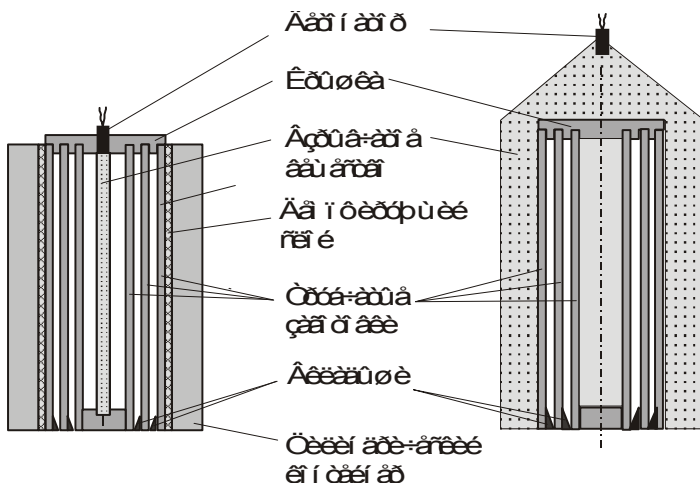


Рис. 4.16. Схема сварки взрывом многослойных трубчатых заготовок

В качестве заготовок для сварки взрывом могут быть использованы не только монолитные материалы. На рис. 4.17 показана схема получения металлического композиционного материала с упрочняющими элементами в виде волокон. Ориентированные определенным образом волокна укладываются на матричный материал, представляющий собой лист или фольгу. Количество слоев определяется конструкцией изделия и может изменяться от трех до нескольких десятков [5]. Волокна между слоями матричного материала могут располагаться с зазором или без зазора. Для размещения волокон на некотором расстоянии от пластин применяют пакеты специальной конструкции. Для этой цели могут быть использованы специальные натяжные рамы. При взрыве взрывчатого вещества метаемая плита плотно сжимает слои матричного материала между собой, в результате чего образуется прочное соединение.

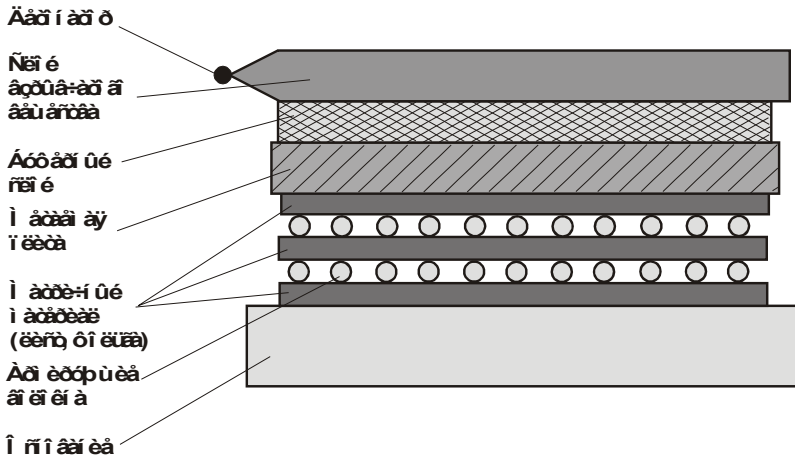


Рис. 4.17. Получение металлических композиционных материалов методом сварки взрывом

При сварке взрывом многослойных композиций необходимо учитывать, что скорость соударения верхних и нижних слоев пакета различна. При удалении от взрывчатого вещества скорость соударения уменьшается [45].

К основанию, на котором производится сварка взрывом, предъявляются определенные требования. Плотность материала основания и его акустическое сопротивление должны быть такими же, как и у композиционного материала. Это позволяет избежать расслоение получаемого материала и разориентации волокон в нем [5].

Полученные сваркой взрывом волокнистые композиционные материалы, в отличие от слоистых композитов, труднее поддаются очистке от окислов и других загрязнений. Поэтому перед сваркой волокна должны быть хорошо очищены. Очистка волокон осуществляется механическим путем, травлением, обезжириванием, промывкой.

Методом сварки взрывом могут быть получены композиционные материалы и в виде цилиндрических прутков. Схема реализации способа взрывного прессования цилиндрической заготовки приведена на рис. 4.18. Прессуемый материал расположен в стальной трубке, находящейся внутри взрывчатого вещества. В процессе динамического обжатия стальной трубы и находящегося в ней материала происходит прочное соединение элементов матричного материала между собой и матричного материала с элементами упрочняющей фазы.

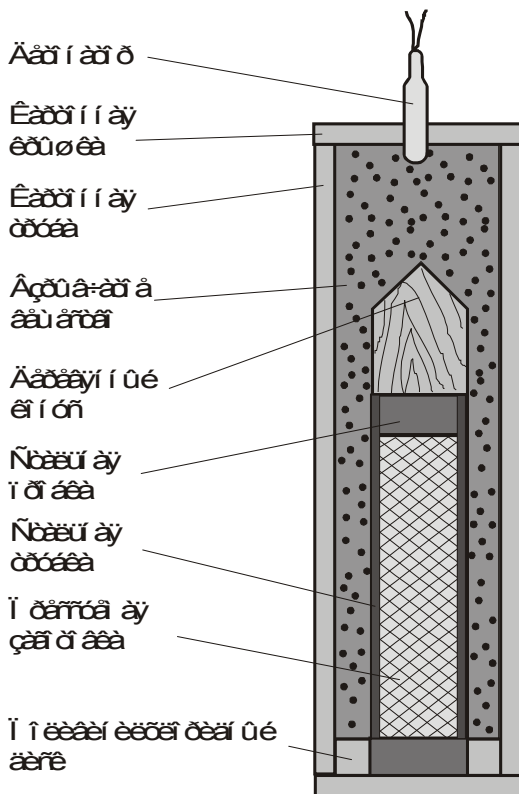


Рис. 4.18. Получение металлических композиционных материалов в форме цилиндрических заготовок методом взрывного прессования

На рис. 4.19 приведена схема взрывного прессования плоских заготовок [44]. Прессуемый материал располагается в контейнере. Нагружение контейнера осуществляется пластиной–поршнем, на которую воздействует давление, возникающее при подрыве взрывчатого вещества. Массивная «непривариваемая» ударная пластина–поршень служит источником энергии для пакета, находящегося ниже, и позволяет получать удар с сильным импульсом [45].

В качестве взрывчатых веществ могут быть использованы тротил, аммонит, гексоген, смеси этих веществ. Для получения качественных соединений при формировании слоистых и слоисто-волокнистых композиционных материалов рекомендуется использовать малобризантные порошкообразные взрывчатые вещества [5].

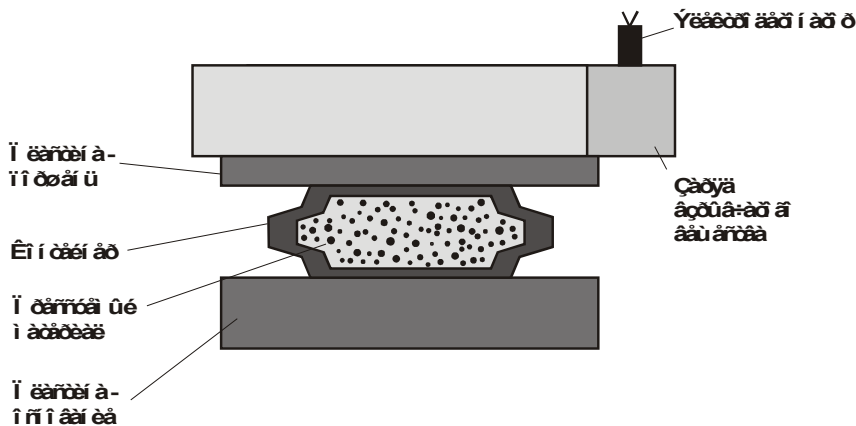


Рис. 4.19. Схема взрывного прессования плоских заготовок

При необходимости бризантное действие может быть ослаблено путем введения между слоем взрывчатого вещества и метаемой пластиной прослойки, изготовленной из резины, пластика или других материалов. Эти прослойки снижают вероятность разрушения волокон в ближних к взрывчатому веществу слоях заготовки.

Динамическое прессование заготовок может осуществляться в замкнутых объемах под действием пороховых зарядов. На рис. 4.20 приведена схема баллистического пресса [45]. При воздействии бойка на капсулю происходит воспламенение порохового заряда. Образующиеся газы давят на снаряд, который воздействует на пуансон.

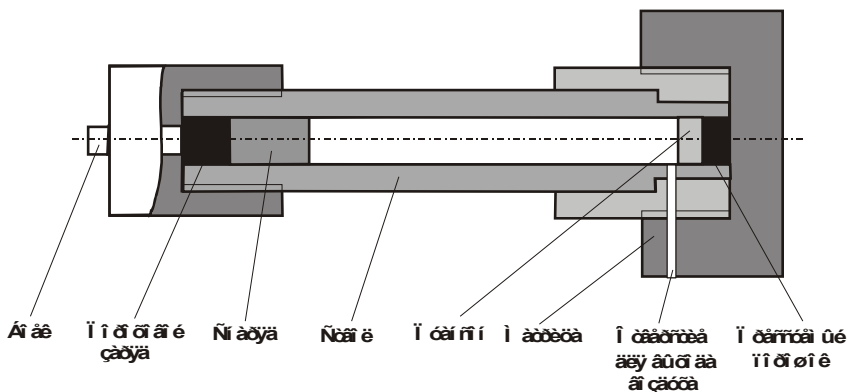


Рис. 4.20. Прессование пороховыми зарядами. Схема баллистического пресса

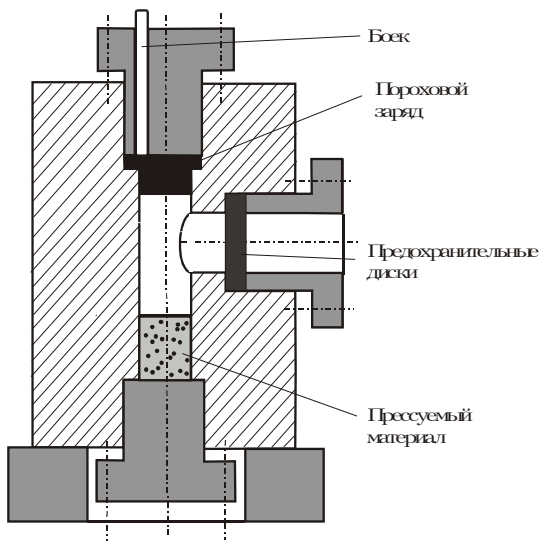


Рис. 4.21. Прессование непосредственным воздействием пороховых газов

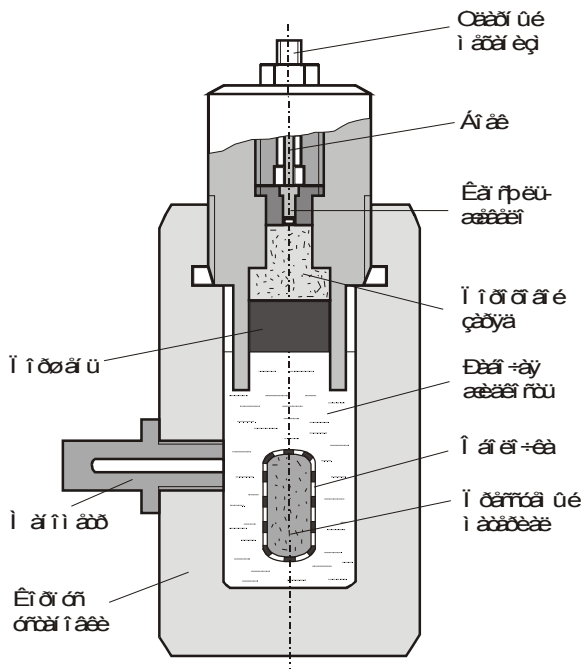


Рис. 4.22. Схема установки гидродинамического прессования

Пуансон, в свою очередь, уплотняет материал. Функцию уплотняющего пуансона могут выполнять непосредственно пороховые газы, воздействующие на прессуемый материал (рис. 4.21). На рис. 4.22 показана схема установки гидродинамического взрывного прессования. Для обеспечения давления прессования здесь также используется пороховой заряд. Газы, образующиеся при его воспламенении, дают на поршень, который равномерно передает давление на прессуемую заготовку через рабочую жидкость.

#### **4.1.5. СБОРКА ЗАГОТОВОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ОБРАБОТКОЙ ДАВЛЕНИЕМ**

При производстве металлических композиционных материалов твердофазными методами, основанными на обработке давлением, необходима предварительная сборка заготовок. Особенно важна эта операция в случае использования в качестве арматуры ориентированных волокон. Разработано много способов сборки заготовок. В данном разделе в качестве примеров рассматриваются несколько из них:

- сборка заготовок в виде «сэндвича»;
- сборка пакетов из монослоев,
- сборка прутковых и трубчатых заготовок.

Схема установки, позволяющей собирать заготовки в виде «сэндвича», приведена на рис. 4.23 [1]. В качестве матричного материала в данном случае используются листы необходимых размеров. Листы размещаются на съемной сборной оправке, закрепленной на валу III. При вращении этого вала на оправку нитеукладчиком, перемещающимся с помощью передачи типа винт-гайка, наматывается слой упрочняющего волокна. После нанесения волокон на лист матричного материала двигатель останавливают и с боков устанавливают еще одну пару листов. Движение нитеукладчика реверсируют с помощью коромысла с закрепленным на нем валом I. Если к диску бесступенчатого вариатора прижат правый фрикционный ролик, то нитеукладчик перемещается в одну сторону (например, вверх). Если же с помощью коромысла к диску прижимают левый фрикционный ролик, то в этом случае движение нитеукладчика осуществляется в другую сторону.

Количество наматываемых слоев в заготовке определяется геометрическими параметрами будущего изделия. По окончании намотки оправку с «сэндвичем» снимают с вала. Намотанные слои фиксируют, оправку разбирают и удаляют из заготовки. Полученную таким образом заготовку подвергают обработке давлением, например прокатке, прессованию, сварке взрывом.

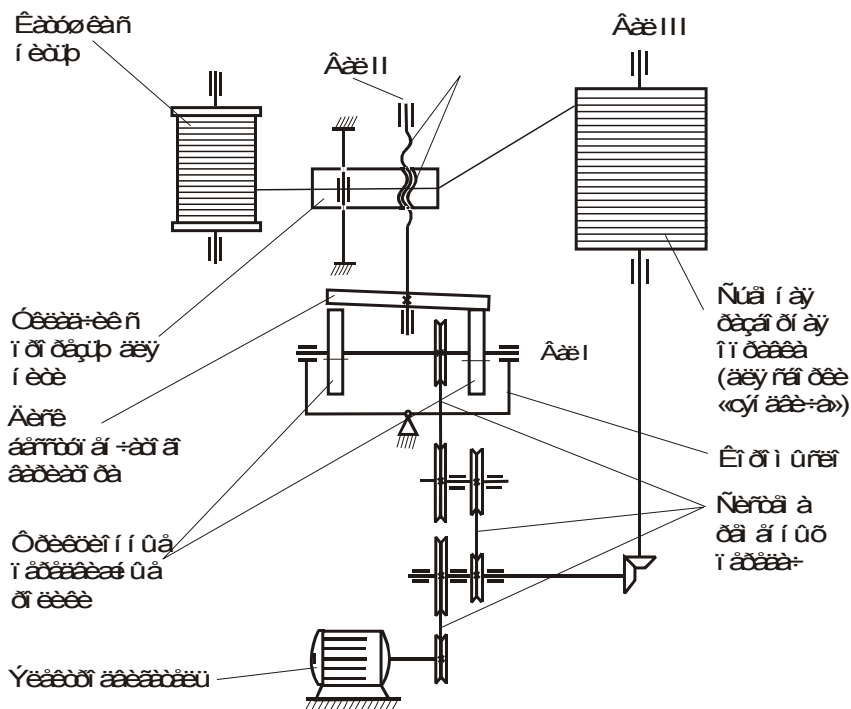


Рис. 4.23. Схема намоточного приспособления для сборки заготовок типа «сэндвич»

Если после установки каждой новой пары пластин поворачивать пакет на 90 градусов, можно получить заготовку с продольным и поперечным армированием матричного материала волокнами. Способом намотки можно получить и заготовки трубчатой формы. Для этого используют цилиндрическую оправку, которая после намотки слоя волокна оборачивается новым слоем матричного материала [1].

Второй из отмеченных способов – намотка монослоев – схематически отражен на рис. 4.24. Этот способ показан на примере получения бороалюминиевых композиционных материалов [5]. На первом этапе осуществляется намотка одного слоя борного волокна на цилиндрическую оправку с закрепленной на ней алюминиевой фольгой (рис. 4.24, а). Намотка осуществляется с требуемыми шагом и углом. Затем вращение барабана прекращают и вдоль образующей барабана беззольным клеем фиксируют волокна и алюминиевую фольгу. После отверждения клея вдоль этой образующей



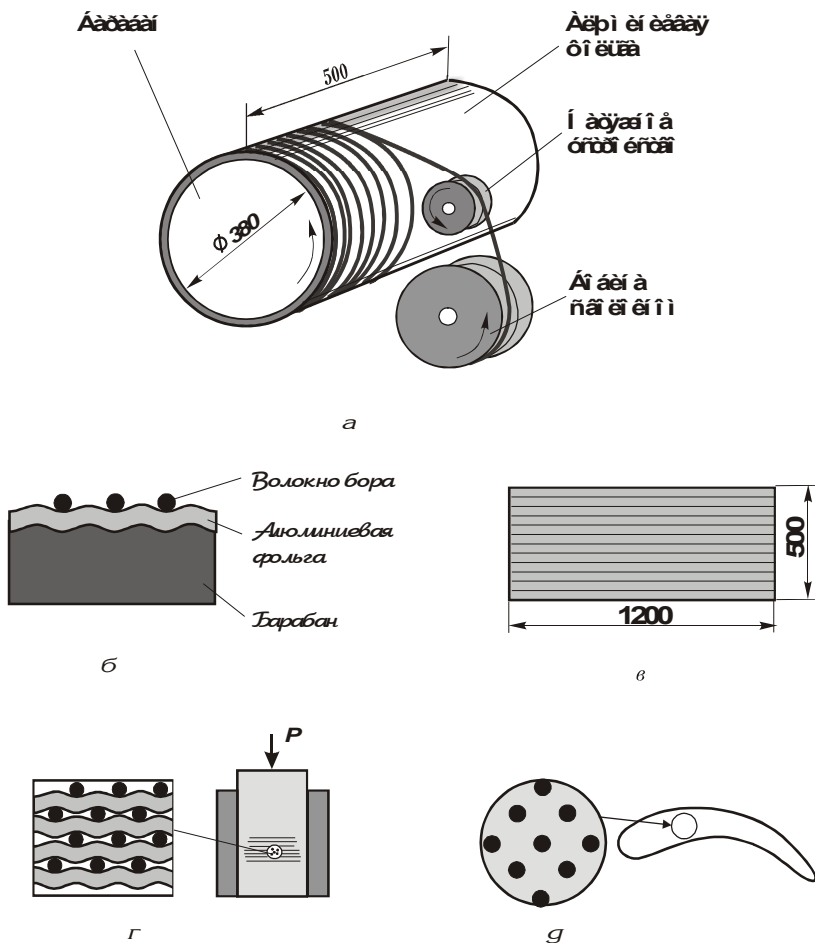


Рис. 4.24. Схема формирования бороалюминиевых МКМ способом намотки монослоев:

*a* – схема намотки волокна на цилиндрическую оправку; *б* – строение одного слоя; *в* – разрезанная и выпрямленная заготовка с волокнами на поверхности; *г* – прессование стопки монослоев; *д* – готовое изделие

полученный слой разрезают и разворачивают. В итоге получается заготовка в виде алюминиевой фольги с закрепленными на ней ориентированными в одном направлении волокнами (рис. 4.24, в). На цилиндрический барабан закрепляют новый лист алюминиевой фольги и по описанной технологии готовят следующую заготовку. Полученные в необходимом количестве заготовки (монослои) по-

мещают в пресс-форму и уплотняют по технологии прессования (сваркой взрывом или другим способом) (рис. 4.24, *з*). На последнем этапе из таких заготовок получают изделия окончательной формы (рис. 4.24, *д*).

Если из металлических композитов необходимо получить изделия в виде труб или прутков, то используют прокатку, прессование, экструзию и волочение [1]. Схемы получения заготовок для них приведены на рис. 4.25. На рис. 4.25, *а* показано строение исходного монослоя, состоящего из матричной полосы и рифленой матричной фольги, между которыми располагаются упрочняющие волокна. Монослой может иметь и другое строение. На матричную фольгу укладывают упрочняющие волокна и проволоку, изготовленную из матричного металла (рис. 4.25, *б*). Монослои сворачивают в плотные рулоны, как показано на рис. 4.25, *в*. Рулоны служат заготовками для последующей обработки давлением.

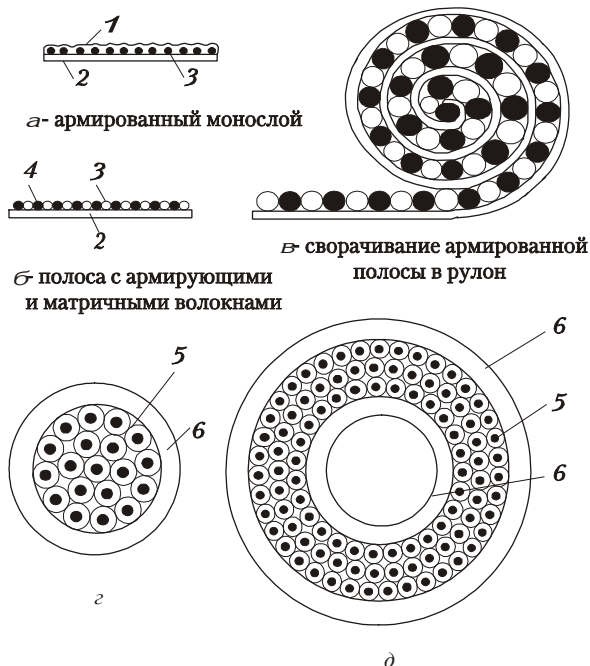


Рис. 4.25. Схема получения армированных рулонных прутковых (*а...в*) и трубчатых заготовок (*з, д*) из биметаллической проволоки:

1 – матричная рифленая фольга; 2 – матричная полоса; 3 – армирующее волокно; 4 – волокно из металла матрицы; 5 – биметаллическая проволока; 6 – трубчатая оправка

Заготовки в форме прутков могут быть получены путем заполнения внутреннего пространства трубы биметаллической проволокой (рис. 4.25, з). Сердечник проволоки является упрочняющим элементом получаемого композита, а плакирующий слой выполняет функцию матричного материала. При укладке биметаллической проволоки между внутренней и наружной трубами формируют заготовки для получения из композитов изделий трубчатой формы (рис. 4.25, д) [1].

## **4.2. ЖИДКОФАЗНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **4.2.1. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ**

Одним из наиболее перспективных технологических процессов получения композиционных материалов является метод пропитки. Композиционные материалы, полученные этим методом, широко применяют для изготовления электрических контактов, подшипников скольжения, конструктивных элементов с повышенными демпфирующими свойствами, используют в качестве высокопрочных, термостойких, жаропрочных, окислостойких материалов и др.

В качестве основных достоинств метода пропитки, отмечают [32]:

- 1) возможность получения изделий сложной формы;
- 2) повышенная производительность процесса;
- 3) слабое силовое воздействие на хрупкие компоненты композита;
- 4) возможность использования жгутовых и тканых армирующих материалов;
- 5) возможность максимальной автоматизации и реализации непрерывных технологических процессов.

Недостатки технологии следующие:

- 1) сравнительно высокие температуры нагрева материалов;
- 2) необходимость строгого регулирования степени взаимодействия жидкой и твердой фаз в ходе технологического цикла (из-за большой скорости протекания диффузионных и химических процессов на границе раздела фаз);
- 3) ограниченность круга компонентов в связи с необходимостью смачивания и большой разницей в температурах плавления.

Некоторые композиты можно получить лишь методом пропитки, применение для этого других методов либо невозможно, либо нерационально. Метод пропитки используют для изготовления

металлов, армированных углеродными волокнами, ряда псевдосплавов и керметов, предназначенных для высокотемпературной эксплуатации. Методом пропитки можно изготовить не каждый композиционный материал с металлической матрицей. Существенные ограничения накладывает межфазное взаимодействие. Для систем, образованных из компонентов, не растворимых один в другом в жидком и твердом состояниях, этот метод обычно эффективен, если обеспечивается смачивание более тугоплавкого компонента расплавом менее тугоплавкого [32]. Однако круг таких композиций ограничен. Возникают проблемы смачивания, совместности компонентов, структурной стабильности.

#### 4.2.1.1. Смачивание поверхности и пропитка пористых тел

Для изготовления композиционных материалов методом пропитки решающее значение имеет характер смачивания жидкостью поверхности твердого тела. Различают иммерсионное и контактное смачивание [32]. Иммерсионное смачивание наблюдается в случае полного погружения твердого тела в жидкость. Контактное смачивание происходит при соприкосновении твердой, жидкой и газообразной фаз. Ниже анализируются случаи контактного смачивания.

На рис. 4.26 схематически отражены три разных варианта смачивания твердой поверхности каплей жидкого материала. Угол между касательной к поверхности капли и смоченной поверхностью называется краевым углом смачивания  $\Theta$ . Основными параметрами, характеризующими энергетическое состояние капли, расположенной на поверхности твердого тела, являются удельная свободная поверхностная энергия  $f$  и величина поверхностного натяжения  $\sigma$ .

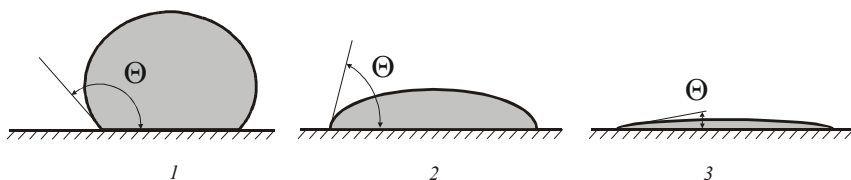


Рис. 4.26. Форма капли на поверхности твердого тела:

1 – смачивание поверхности жидкостью отсутствует; 2 – ограниченное смачивание; 3 – полное смачивание ( $\Theta \sim 0$ )

Краевой угол смачивания твердого тела жидкостью  $\Theta$  связан с величинами поверхностного натяжения фаз уравнением Юнга

$$\cos \Theta = (\sigma_{\text{т-г}} - \sigma_{\text{т-ж}}) / \sigma_{\text{ж-г}},$$

где  $\sigma_{\text{т-г}}$  – поверхностное натяжение границы раздела между твердым телом и газом;  $\sigma_{\text{т-ж}}$  – поверхностное натяжение границы между твердым телом и жидкостью;  $\sigma_{\text{ж-г}}$  – поверхностное натяжение границы между жидкостью и газом.

Исходя из наблюдаемых значений краевого угла, различают следующие варианты взаимодействия капли с поверхностью твердого тела (рис. 4.26): несмачивание ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ); ограниченное смачивание ( $0 < \theta < 90^\circ$ ) и полное смачивание, когда равновесный краевой угол  $\theta \rightarrow 0$ . Случай полного смачивания наблюдается, когда работа адгезии в 2 и более раза превышает поверхностное натяжение жидкости.

В реальных случаях краевой угол смачивания может заметно отличаться от равновесного. На величину смачивания существенно влияют шероховатость поверхности, полиморфные превращения фаз, участвующих в смачивании, и другие факторы, выводящие систему из термодинамического равновесия. Например, оксидная пленка, образующаяся на поверхности твердых тел, может как увеличивать, так и уменьшать угол смачивания. В ряде случаев оксидная пленка разрушается, как это происходит при контакте молибдена и вольфрама с жидким оловом. При сравнительно низких температурах в этих системах формируются большие краевые углы, но при достаточном нагреве оксиды вольфрама и молибдена сублимируют, и смачивание резко улучшается [32, 37].

Пропитка материала может происходить самопроизвольно, под действием капиллярного давления. Капиллярное давление обуславливает подъем смачивающей и опускание несмачивающей жидкости в капиллярной трубке. Если принять, что плотность жидкости много больше плотности пара  $\rho_{\text{ж}} \gg \rho_{\text{п}}$ , то по формуле Жюрена, для цилиндрического капилляра радиусом  $r$  высота подъема жидкости равна

$$l = 2\sigma_{\text{ж-г}} \cos \theta / r g \rho_{\text{ж}}, \quad (4.1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Одной из характеристик, введенных для капиллярных систем, является понятие капиллярного потенциала  $\psi_{\text{к}}$ . Эта величина введена по аналогии с потенциалом поля тяжести.

$$\psi_{\text{к}} = 2\sigma_{\text{ж-г}} \cos \Theta / (r \rho_{\text{ж}}). \quad (4.2)$$

Смачивающая жидкость под действием капиллярных сил всегда перемещается от низшего потенциала к высшему, т. е. происходит перекачка жидкости из широких капилляров в узкие. Это означает, что в пористом материале пропитывающая жидкость будет перемещаться из крупных пор в мелкие. И, наоборот, несмачивающая жидкость перемещается от высшего потенциала к низшему.

Пропитка жидкостью пористого тела будет происходить только при условии уменьшения свободной энергии  $F$  системы. При пропитке граница раздела твердое тело – газ заменяется границей раздела твердое тело – жидкость. Поэтому условием самопроизвольной пропитки будет неравенство

$$\sigma_{т-г} - \sigma_{т-ж} > 0 \quad (4.3)$$

или

$$\sigma_{ж-г} \cos \theta > 0. \quad (4.4)$$

Самопроизвольная пропитка твердого тела возможна только в том случае, если расплавленный металл смачивает поверхность. Это происходит при  $\theta < 90^0$ . Чем меньше угол смачивания, тем легче осуществляется пропитка материала. При приближении величины угла  $\theta$  к  $90^0$  для полной пропитки необходимо прикладывать внешнее давление. Уменьшить величину поверхностного натяжения системы жидкость–газ можно введением в пропитывающую жидкость поверхностно-активных добавок, которые могут адсорбироваться на поверхности, улучшая при этом смачивание.

Последнее из приведенных уравнений определяет возможность самопроизвольной пропитки жидкостью пористого тела. Если условие самопроизвольной пропитки не выполняется, то металл не проникнет вглубь пористого каркаса при любой длительности контакта фаз.

При частичной пропитке пористого тела и наличии в нем градиента температур возникает явление термоосмоса. При этом жидкость течет из нагретых мест в более холодные. Скорость движения жидкости при этом прямо пропорциональна градиенту температур и радиусу капилляра [32]. Движущая сила термоосмоса – изменение капиллярного потенциала в зависимости от температуры. Явление термоосмоса объясняют также испарением жидкости в нагретых местах и конденсацией ее в холодных местах или движением жидкости под действием сил вязкости, вызываемых градиентом давлений в паровой фазе [32, 38].

#### *4.2.1.2. Технологические процессы получения композиционных материалов, основанные на пропитке армирующих каркасов расплавленным металлом*

В настоящее время используется несколько технологических схем получения металлических композиционных материалов, основанных на пропитке армирующего каркаса металлическим расплавом. Основным критерием, позволяющим разделить известные технологические методы пропитки, является способ приложения давления к жидкому металлу, заставляющего заполнять свободные промежутки армирующего каркаса [32]. В соответствии с этим критерием можно выделить следующие методы пропитки:

1) не требующие приложения внешних сил (заполнение межволоконных промежутков только за счет капиллярных эффектов);

2) основанные на вакуумном всасывании жидкого металла в межволоконные промежутки (заполнение пустот за счет разности между атмосферным давлением и давлением, создаваемым в порах армирующего каркаса при его вакуумировании; величина этой разницы не может превышать величину атмосферного давления);

3) основанные на приложении к жидкому металлу избыточного давления, превышающего атмосферное (с помощью сжатых газов и др.).

##### *4.2.1.2.1. Самопроизвольная пропитка*

Самопроизвольная пропитка, или пропитка при нормальном давлении, осуществляется по нескольким схемам [32]:

1) при полном погружении пористого каркаса в пропитывающую жидкость;

2) при расплавлении пропитывающего материала, находящегося на верхнем торце армирующего каркаса (пропитка сверху);

3) при опускании нижнего торца армирующего каркаса в жидкость (пропитка снизу).

Технологические процессы такого рода не требуют приложения к жидкому металлу внешних сил. Главное условие самопроизвольной пропитки – смачивание жидкой фазой поверхности пропитываемого материала. Известны следующие системы материалов для самопроизвольной пропитки (по принципу матрица–волокно): магний – бор, тантал; алюминий – бор, сталь, графит, карбид вольфрама; медь – вольфрам, молибден и др.

Основные преимущества этого метода заключаются в возможности использования простой литейной оснастки и получения из-

делий сложной конфигурации. Существенным недостатком является наличие пор и пустот, образующихся в результате объемной усадки при кристаллизации и недостаточного заполнения межволоконного пространства [32]. Методы пропитки армирующего каркаса при нормальном давлении жидкого расплава применимы в тех случаях, когда в расплавленной матрице волокна термодинамически стабильны.

Вследствие высокой реакционной способности большинства материалов при повышенных температурах самопроизвольную пропитку обычно ведут в инертной атмосфере или в вакууме. На рис. 4.27 показан пример установки для пропитки пористых каркасов в инертной атмосфере [32]. Она состоит из графитового тигля с матричным сплавом и заливочной камеры, заключенных в контей-

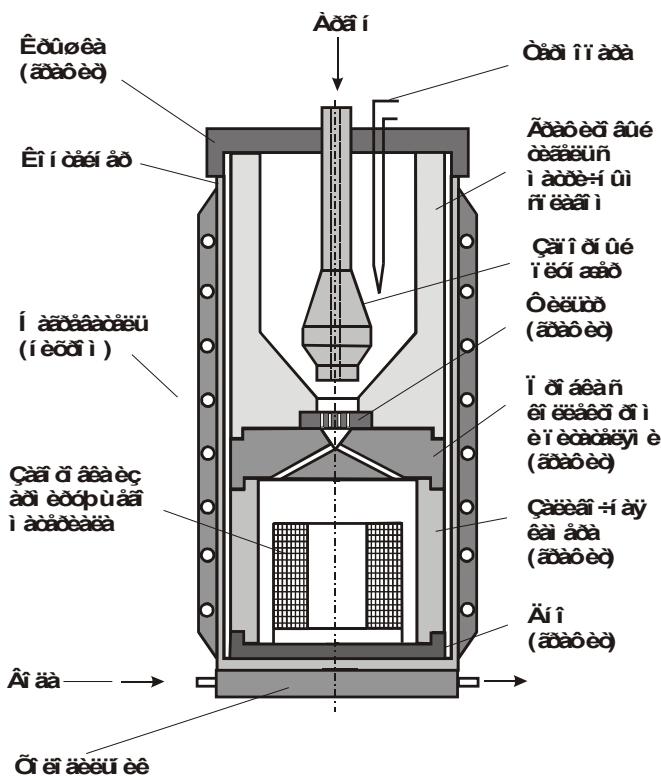


Рис. 4.27. Схема установки для получения композиционного материала методом самопроизвольной пропитки армирующего каркаса в инертной атмосфере



нер, выполненный из коррозионно-стойкой стали. Снаружи контейнера расположен нагреватель. Нижняя часть плавильного тигля имеет форму, соответствующую форме запорного плунжера. Между тиглем и заливочной камерой установлены графитовый фильтр с отверстиями небольшого диаметра и графитовая пробка с коллектором и питателями. Сверху установка закрыта графитовой крышкой. В нижней части расположен холодильник с проточной водой.

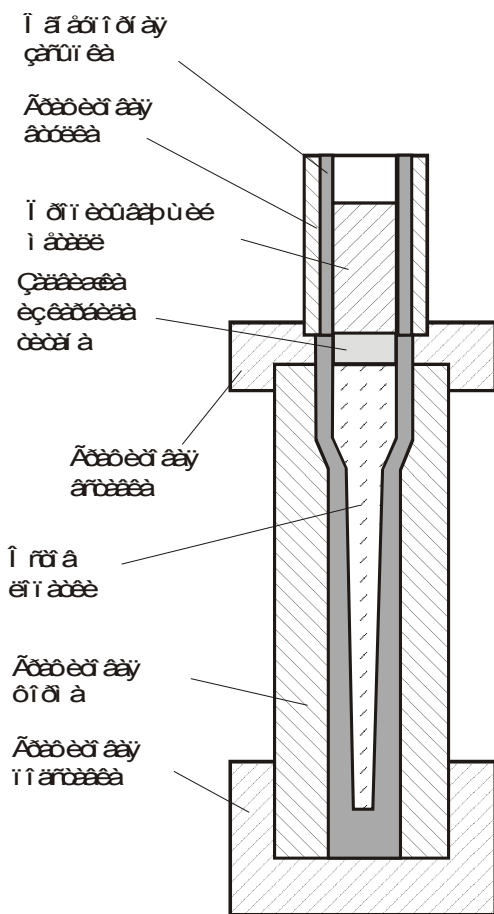


Рис. 4.28. Схема установки для получения лопаток из кермета методом самопроизвольной пропитки

В заливочную камеру устанавливается заготовка из намотанных на оправку или уложенных в определенном порядке волокон. Через отверстие в запорном плунжере в тигель подается инертный газ – аргон, включается нагрев и матричный материал расплавляется. После достижения расплавом необходимой температуры плунжер поднимается и жидкий металл поступает в заливочную камеру, пропитывая армирующие волокна [5, 32].

На рис. 4.28 приведена схема самопроизвольной пропитки лопаток из пористого карбида титана. В данном случае реализуется схема пропитки каркаса сверху. На первой стадии происходит расплавление пропитывающего металла, затем открывается задвижка и металл вступает в контакт с керамическим каркасом лопатки. По такой технологии получают лопатки с рабочей частью из кермета [32]. Для удаления усадочной раковины и пор в прибыль получаемой заготовки нагреватель установки может перемещаться в вертикальном направлении.

#### 4.2.1.2.2. Непрерывная пропитка

Для получения материалов, армированных непрерывными волокнами, используются схемы непрерывной пропитки. Этот процесс является разновидностью самопроизвольной пропитки. Суть метода непрерывной пропитки заключается в протягивании пучков непрерывных волокон через ванну, в которой находится расплавленный матричный металл. В общем виде две схемы подачи волокон в матричный расплав показаны на рис. 4.29 [1]. Форма профиля получаемого изделия задается формой сечения кристаллизатора или фильеры. Вытягивание волокон из ванны с жидким металлом должно осуществляться со скоростью, обеспечивающей кристаллизацию матричного расплава.

Разработаны технологические установки, позволяющие пропитывать вертикальные и горизонтальные пучки волокон [32]. На рис. 4.30 показана схема вертикальной пропитки армирующего материала. Пучок, состоящий из заданного числа волокон с определенной степенью закрутки, проходя через ванну с расплавленным металлом, пропитывается им и поступает в формирующее отверстие. Проходя далее через холодильник и кристаллизуясь с заданной скоростью, композит приобретает необходимые свойства.

Горизонтальная установка непрерывной пропитки, разработанная в Физико-техническом институте Белорусской академии наук, показана на рис. 4.31. Установка состоит из узлов очистки волокон,





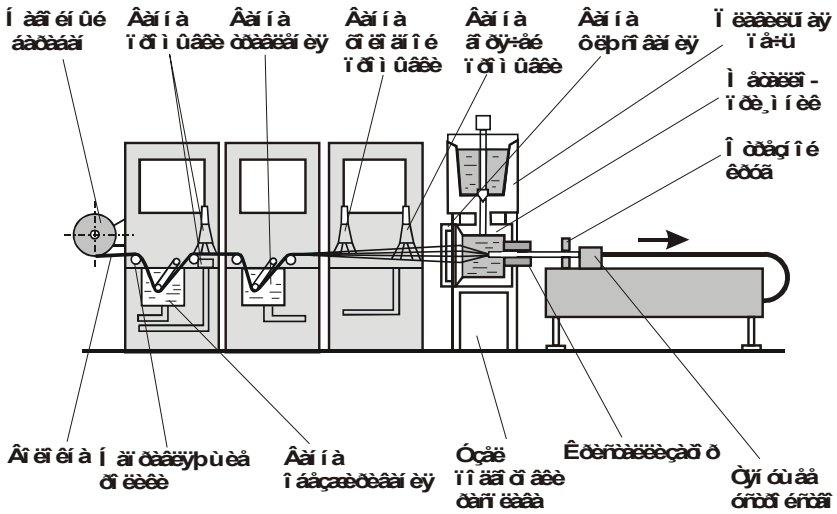


Рис. 4.31. Схема горизонтальной установки для получения армированных металлических композиционных материалов методом непрерывной пропитки [32]

чаемых методом непрерывной пропитки армирующего материала, показаны на рис. 4.32.

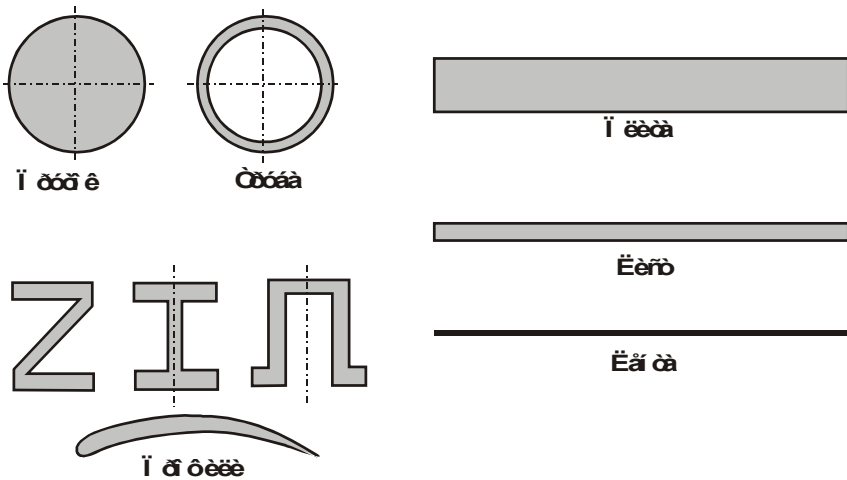
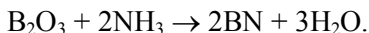


Рис. 4.32. Виды изделий, получаемых методом непрерывной пропитки волокон [32]

Схема самопроизвольной пропитки дает возможность предварительно нанести на волокна, разупрочняющиеся при контакте с жидкой матрицей, специальные покрытия. На рис. 4.33 показана схема изготовления алюминиевой ленты, армированной борными волокнами. На поверхности исходных борных волокон, проходящих через реактор окисления, образуется оксид бора  $B_2O_3$ . В реакторе азотирования волокна покрываются тонким слоем нитрида бора по реакции



Волокна с покрытием BN поступают в установку непрерывной пропитки. Пропитка армирующего материала осуществляется высокопрочным литейным алюминиевым сплавом, содержащим 5 % Cu, 1 % Ag, 0,3 % Mg, 0,2 % Ti. Пленка нитрида бора хорошо смачивается алюминиевым сплавом и предохраняет борные волокна от разупрочнения. При концентрации волокон 75 % временное сопротивление данного композиционного материала составляет 1630...1760 МПа, а средний модуль упругости – 304 ГПа. Такая лента, выпускаемая под маркой «нитборал», используется как полуфабрикат [32].

Разработаны и другие технологические процессы, совмещающие нанесение защитных покрытий на упрочняющие волокна и непрерывную пропитку. На рис. 4.34 приведена схема нанесения покрытия диборида титана на углеродные волокна и получения углеалюминиевого композиционного материала. Покрытие осаждается в камере реактора при 873...1073 К в процессе восстановительного синтеза из смеси хлоридов титана и бора в присутствии паров цинка [32]. Полученный таким образом защитный слой хорошо смачивается алюминием и обеспечивает надежную пропитку жгутов.

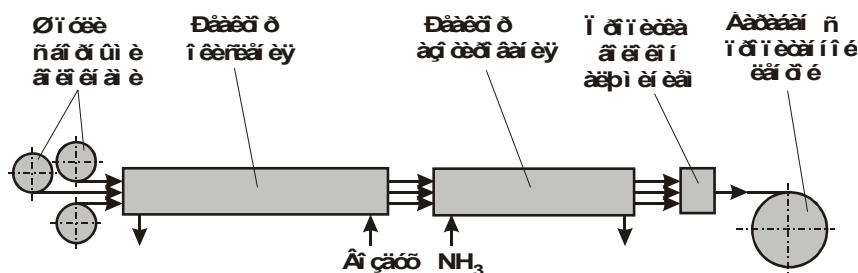


Рис. 4.33. Схемы процесса получения ленты из борного волокна методом пропитки алюминием

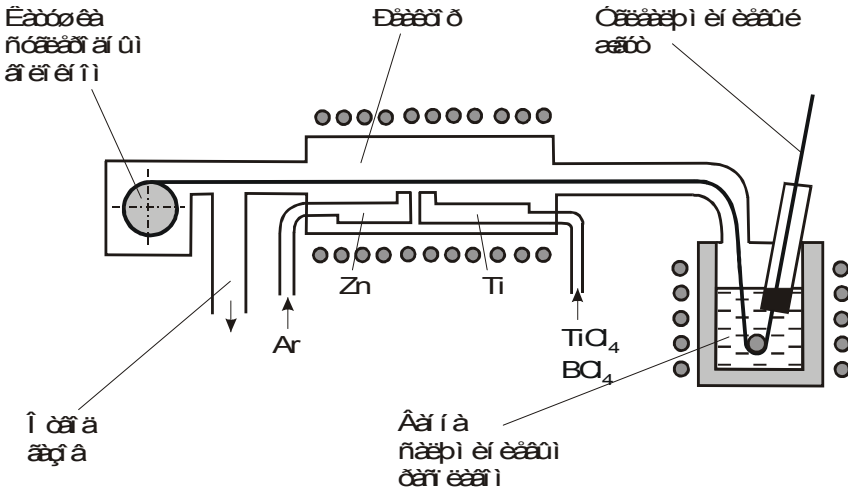


Рис. 4.34. Схема нанесения покрытия диборида титана на углеродные волокна и получения углеалюминиевого композиционного материала методом непрерывной пропитки жгутов

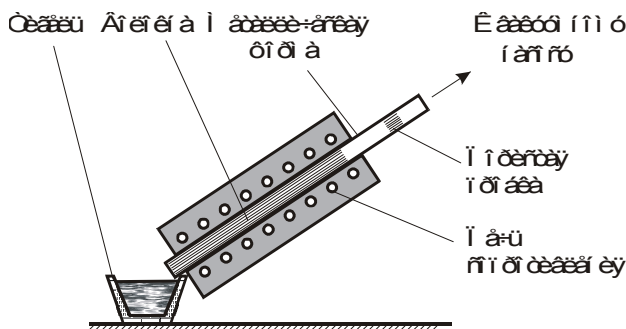
Метод непрерывной пропитки волокон отличается экономической эффективностью, высокой производительностью, легко поддается механизации и автоматизации. Метод позволяет получать длинномерные изделия различного сечения. При непрерывной пропитке возможно в широких пределах регулировать время контакта волокон с расплавом матрицы, распределять их заданным образом по сечению, получать предварительно напряженный композит за счет применения противонатяжения волокон [32].

#### 4.2.1.2.3. Вакуумная пропитка

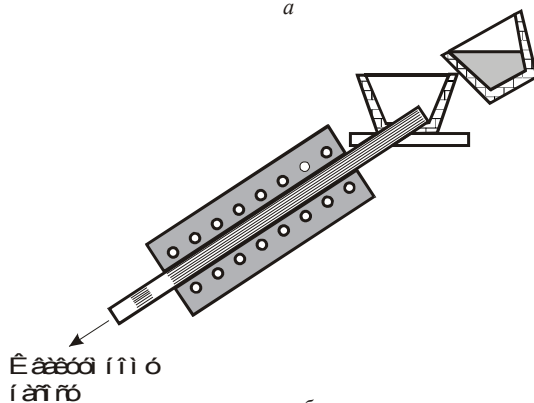
Вакуумную пропитку можно считать одной из разновидностей пропитки под давлением. Однако максимальное значение избыточного давления, прикладываемого к расплавленному металлу, не может быть выше одной атмосферы. Достоинства вакуумной пропитки связаны с улучшением смачивания волокон жидким расплавом, эффективной защитой волокон от окисления, сокращением времени контакта волокон с расплавом. Методом вакуумной пропитки получают композиционные материалы на основе магния и алюминия, упрочненные борными волокнами, композиты на основе никелевых сплавов, упрочненные вольфрамовой проволокой, композиты других типов [5].

Пропитку в вакууме впервые применил более тридцати лет назад А. Дин. Схема технологического процесса приведена на рис. 4.35, а. В трубку из жаропрочного материала, один конец которой подключен к вакуумному насосу, а другой запаян, укладывали отрезки вольфрамовой проволоки. После вакуумирования и нагрева до температуры пропитки трубка запаянным концом погружалась в матричный расплав. Запаянный торец расплавлялся и жидкий металл, под действием атмосферного давления, полностью заполнял трубку, пропитывая волокна. Этим способом была получена жаропрочная композиция нимоник 258 – вольфрам, получившая название «нимокаст-258» [32].

На рис. 4.35 показаны две схемы получения металлических композиционных материалов. Одна из них соответствует нижнему



а



б

Рис. 4.35. Схемы получения металлических композиционных материалов по методу вакуумной пропитки арматуры с нижним (а) и верхним (б) расположением тигля



(а), а другая – верхнему (б) расположению тигля с матричным расплавом. При реализации второго варианта пропитки длина получаемого изделия не ограничивается высотой подъема расплава, так как пропитка осуществляется под действием не только атмосферного давления, но и под давлением находящегося сверху столба жидкого металла. Таким способом можно получать изделия большой длины.

По технологии вакуумного всасывания в России был получен композиционный материал типа ВКН-1. Схема использованного процесса пропитки показана на рис. 4.36. В качестве армирующих элементов использовали вольфрамовые волокна марки ВА. Матричным материалом служил никелевый жаропрочный сплав ЖС6К. Объемное содержание волокон в композите составляет 45...50 %. Время контактирования жидкого металла с армирующими волокнами – не более 30 с. Этого времени недостаточно для структурных преобразований, приводящих к разупрочнению вольфрамовых волокон.

Для получения металлических композитов методом вакуумной пропитки могут быть использованы схемы, приведенные на рис. 4.37. При пропитке сверху (рис. 4.37, а) пористый каркас загружают в графитовый тигель, сверху помещают навеску матричного материала. После вакуумирования камеры и нагрева до расплавления матричного материала в камеру запускают воздух. Под действием атмосферного давления происходит пропитка пористого армирующего каркаса жидким металлом. При таком способе пропитки получают изделия без усадочных раковин, форма которых соответствует внутренней полости тигля.

При реализации технологии по методу пропитки снизу (рис. 4.37, б) на дно вакуумной камеры устанавливают тигель с матричным расплавом. Пористый каркас закрепляют в графитовом стакане с открытым дном. Из камеры откачивают воздух, после чего матричный металл нагревают до расплавления. При достижении расплавом оптимальной температуры стакан с пропитываемым материалом погружают открытым концом в жидкий металл, а в камеру запускают воздух. Под действием атмосферного давления металл заполняет пустоты пористого каркаса.

Вакуумную пропитку проводят в промышленных вакуумных плавильных печах, оснащенных индукционными, электроннолучевыми и других типов нагревателями. В некоторых случаях применяют специально разработанные установки [5]. В качестве примера на рис. 4.38 приведена схема установки, предназначенной для

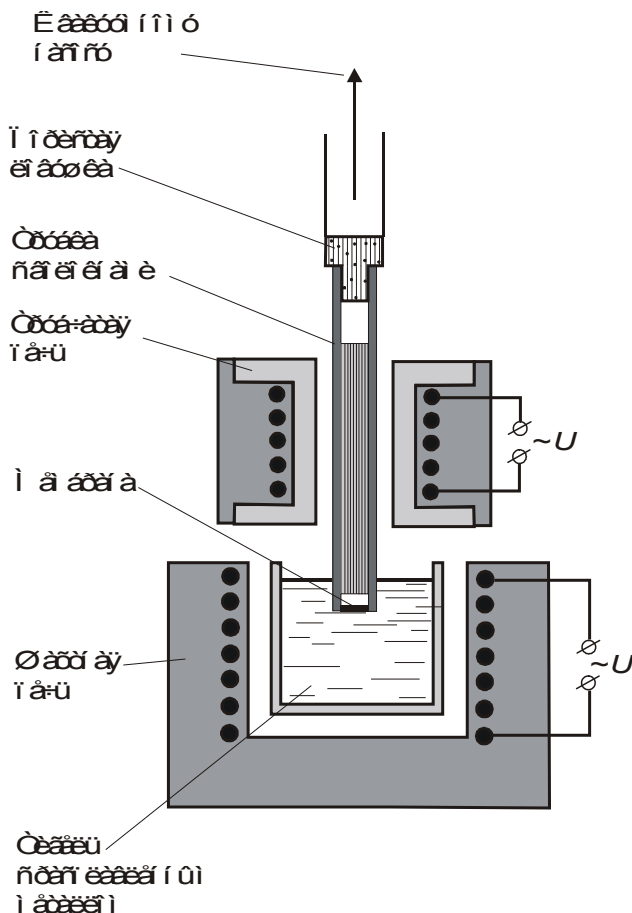


Рис. 4.36. Установка для получения прутковых металлических композиционных материалов методом вакуумного всасывания

пропитки волокнистых армирующих каркасов. Установка представляет собой кварцевую трубу, герметически закрытую с двух сторон пробками. Через одну из пробок из трубы откачивают воздух. Внутри трубы на керамической опоре устанавливают графитовую форму. Полость формы соответствует контурам будущего изделия. В форме размещают армирующий волокнистый каркас, который необходимо пропитать матричным материалом.

Для плавления матричного металла служит графитовый тигель, расположенный над формой. Отверстие между графитовым тиглем

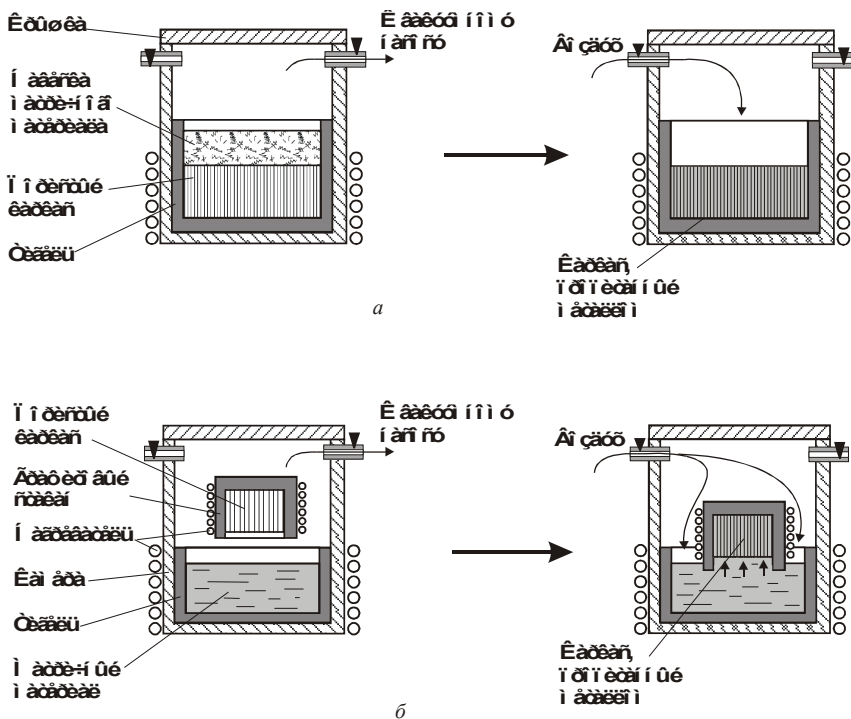


Рис. 4.37. Изготовление композиционных материалов методом вакуумной пропитки:

а – пропитка сверху и б – снизу

и формой с установленным в ней армирующим каркасом во время плавления матричного металла перекрыто графитовым штоком. Нагрев и плавление металла осуществляются индуктором, расположенным снаружи кварцевой трубы. Для предотвращения перегрева резиновых пробок, закрывающих трубу, используют тепловые экраны. По достижении расплавом необходимой температуры с помощью магнита, воздействующего через стальное кольцо на шляпку графитового штока, отверстие в форме открывается и металл под действием атмосферного давления устремляется в вакуумированную форму, заполняя межволоконные промежутки.

Технологической особенностью вакуумной пропитки является высокая скорость всасывания жидкого металла в пористый каркас. Результатом этого может стать эрозионное разрушение поверхности волокон. Во избежание разрушения элементов пропитываемого каркаса применяют регулирование подачи матричного материала.

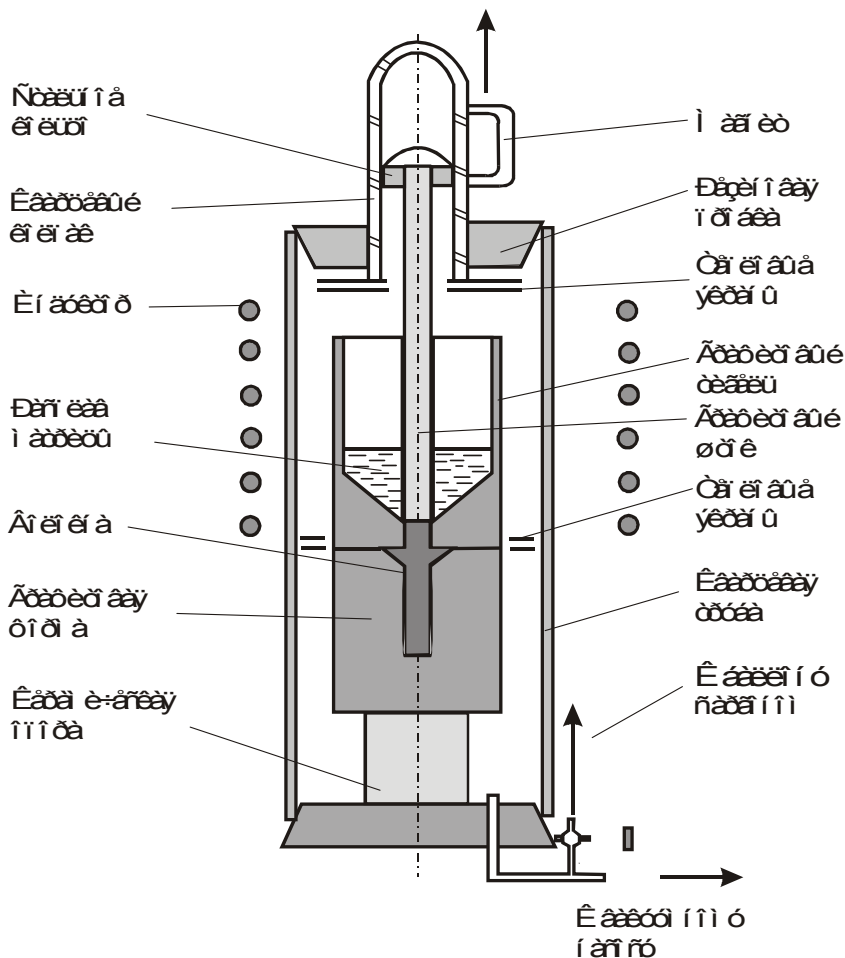


Рис. 4.38. Схема установки для пропитки волокон жидким металлом в вакууме

Скорость пропитки может управляться электромагнитным полем, как это показано на рис. 4.39 [32]. Для обеспечения требуемой скорости пропитки электромагнитный и вакуумный насосы включают одновременно. Расплавленный металл, поступающий в электромагнитный насос под действием атмосферного давления, удерживается в нем до окончательного удаления воздуха из полости формы, в которой установлена подлежащая пропитке заготовка из армирующего материала. Затем, регулируя напряжение, подаваемое на электромагнитный насос, плавно запускают металл по трубопроводу.

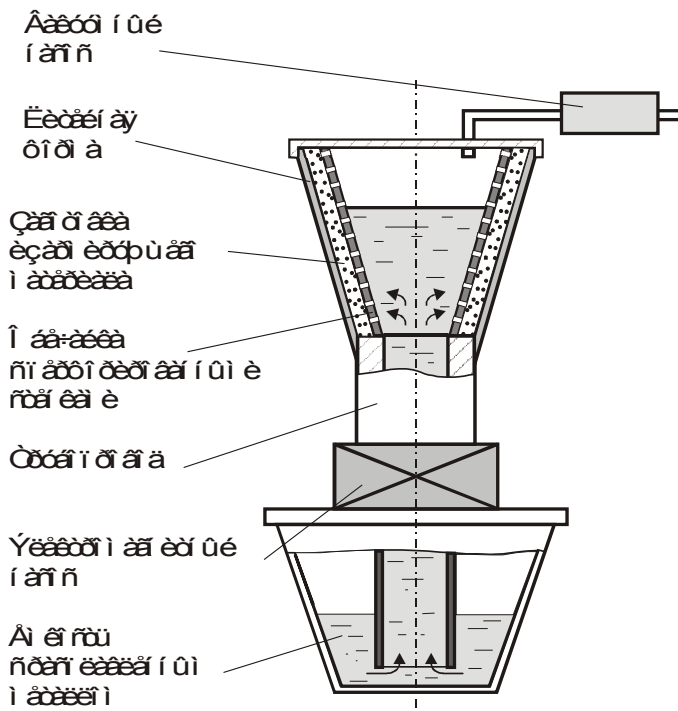


Рис. 4.39. Схема вакуумной пропитки с регулированием потока металла электромагнитным полем

Матричный расплав с необходимой скоростью поступает в литейную форму и пропитывает пористый каркас [32].

Технология вакуумной пропитки пористых каркасов магнием или его сплавами может быть реализована без специального вакуумного оборудования [32]. Для этого закрытый с одного конца контейнер с уложенными в нем волокнами погружается открытым концом в расплавленный магний. В результате взаимодействия магния с воздухом образуются твердые оксиды, нитриды и карбонаты. Реакция идет практически до полного связывания воздуха. В результате этого в контейнере давление газа снижается, т. е. образуется вакуум. Под действием атмосферного давления магний заполняет поры армирующего каркаса. Данный метод позволяет без применения вакуумного оборудования получать тонкостенные отливки сложной формы.

## 4.2.1.2.4. Пропитка под давлением

Пропитка армирующих каркасов под давлением осуществляется при величинах избыточного давления, превышающих  $\sim 0,1$  МПа [32]. Для компрессионной пропитки, или пропитки под давлением, широко используют машины литья под давлением. В этих машинах для создания давления на металл можно использовать как поршень, так и давление сжатого воздуха или инертного газа. На рис. 4.40 приведена схема получения углеалюминиевой композиции по методу пропитки под давлением. Установка для получения композиционного материала состоит из двух графитовых форм, разделенных прокладкой. Снизу и сверху формы закрыты крышками. В верхней крышке имеется отверстие для подачи инертного газа. Армирующий каркас из углеродного волокна устанавливают в нижней форме. В верхней форме помещен матричный металл (алюминиевый сплав). Матричный материал плавится в индукторе и под давлением аргона, достигающем  $\sim 0,5 \dots 1,0$  МПа, пропитывает армирующий углеродный каркас. Время пропитки каркаса составляет несколько минут [5].

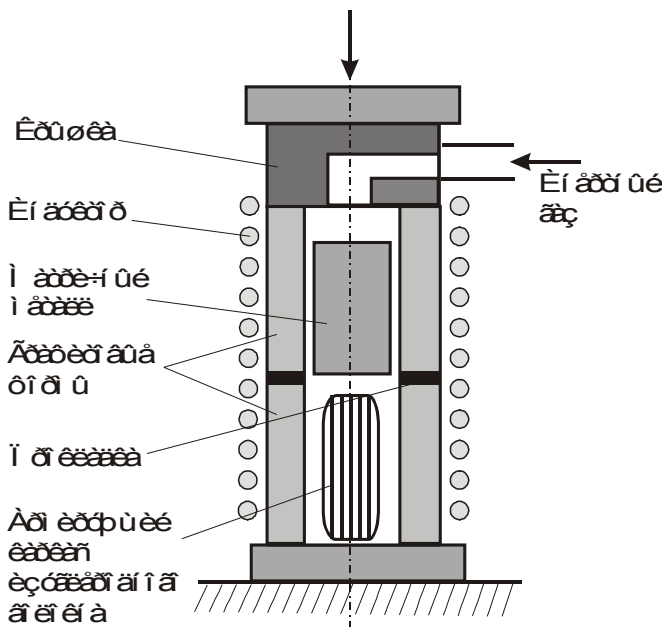


Рис. 4.40. Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом пропитки под давлением

Углеалюминиевые композиции могут быть получены по другой схеме, также основанной на приложении к материалу избыточного давления (рис. 4.41). В герметичный металлический контейнер помещается «сэндвич», состоящий из чередующихся слоев матричной фольги и армирующих углеродных волокон. После продувки контейнера аргоном и вакуумирования происходит нагрев его до температуры, соответствующей расплавлению матричного материала. После этого осуществляется обжатие контейнера на прессе. Во избежание появления пор давление не снимается до полной кристаллизации матрицы.

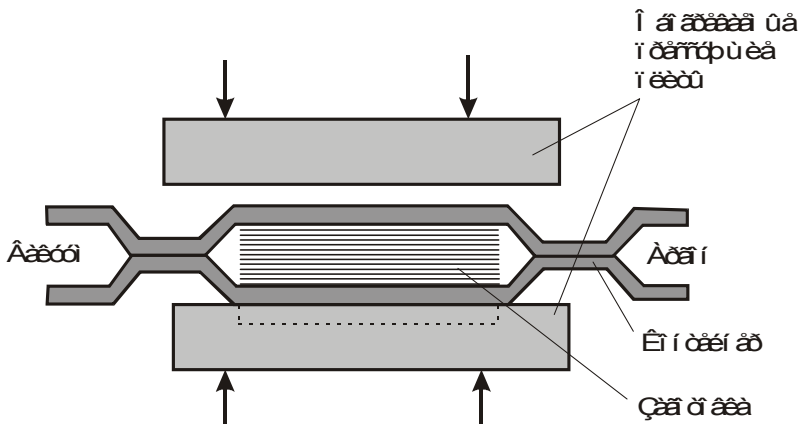


Рис. 4.41. Схема установки для получения углеалюминиевых композиций методом пропитки под давлением

При практической реализации способов пропитки армирующих каркасов могут быть использованы различные технологические приемы. На рис. 4.42 приведена относительно простая схема получения композита типа магний – титан [39]. Армирующий каркас получают путем намотки титановой проволоки на рамку (рис. 4.42, б). После намотки рамку скручивают в рулон (рис. 4.42, в). Полученный таким образом волокнистый каркас в натянутом состоянии помещают в графитовую форму, расположенную в стальном стакане. На графитовой форме расположена насадка, обеспечивающая вывод усадочной раковины из изделия. Сверху насадки укладывают штабик магниеволитиевого сплава. Верхняя часть стакана плотно забита стекловатой. Нагрев стакана осуществляют в печи при 900...920 К в течение 20 мин. Пропитку проводят в течение ~ 1 мин.

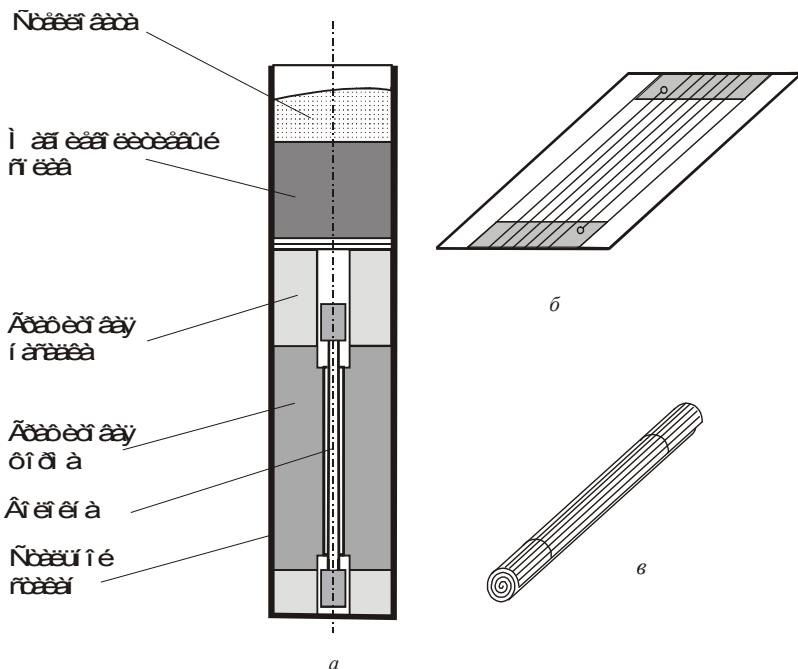


Рис. 4.42. Получение металлического композиционного материала методом пропитки армирующего каркаса:

а – форма для пропитки; б – схема укладки волокон с помощью рамки; в – рамка в скрученном состоянии

#### 4.2.1.2.5. Вакуумно-компрессионная пропитка

Вакуумно-компрессионная пропитка представляет собой комбинированный технологический процесс, сочетающий особенности вакуумной пропитки и пропитки под давлением. Схема выполнения этого процесса приведена на рис. 4.43 [5]. На первой стадии процесса осуществляется намотка волокна на оправку. В приведенном примере для получения изделия в виде полого цилиндра оправка имеет соответствующую форму. Далее оправка с намотанными волокнами устанавливается в герметичный контейнер (форму). Дно контейнера выполнено из тонколистового металла (0,15 мм). В верхней части контейнера имеется полый шток, через который в дальнейшем будет откачиваться воздух. Контейнер вместе с оправкой помещается в полость специальной установки. Шток контейнера через отверстие в водоохлаждаемой крышке выводится наружу.



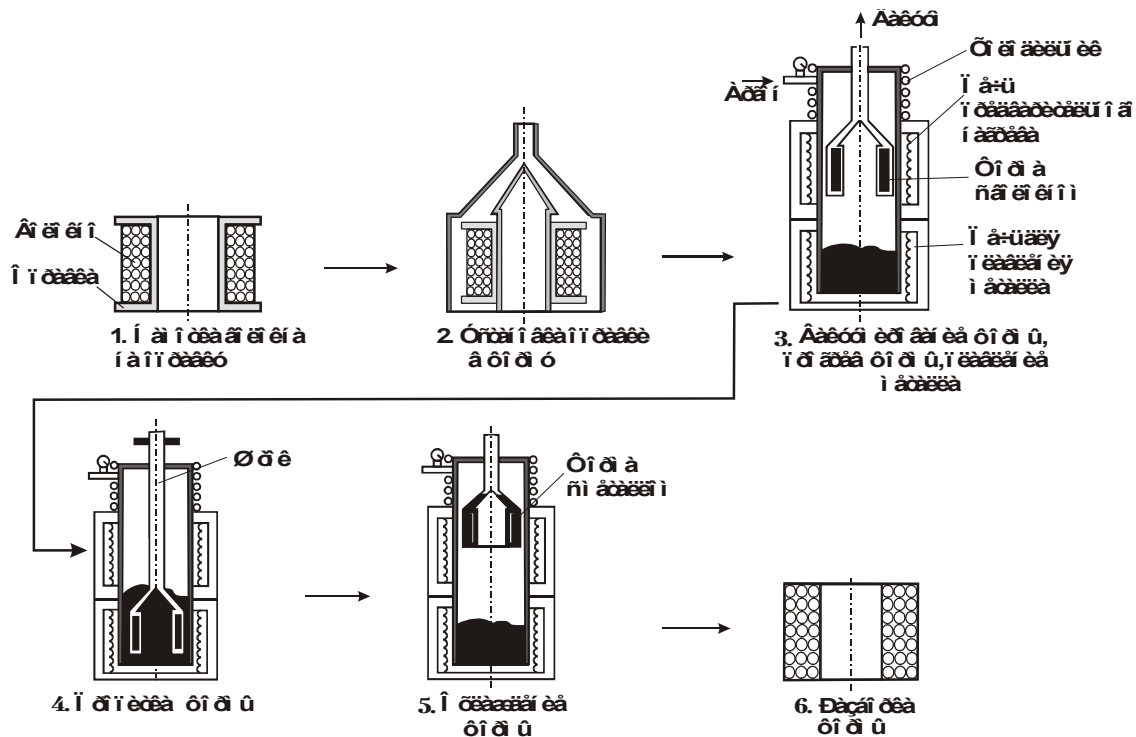


Рис. 4.43. Последовательные стадии изготовления металлического композиционного материала методом вакуумно-компрессионной пропитки

Установка представляет собой камеру с двумя зонами нагрева: зоной предварительного нагрева контейнера с находящимся в нем армирующим материалом и зоной плавления матричного сплава. Перед нагревом в камеру под давлением подается инертный газ, а из контейнера откачивается воздух. В то время как вакуумированный контейнер подвергается предварительному прогреву в верхней зоне установки, в нижней зоне осуществляется плавление матричного материала. После расплавления металла контейнер опускают, дно прокалывают иглами, расположенными на дне тигля, и матричный сплав, под действием давления газа и атмосферного давления, пропитывает пористый каркас. После пропитки армирующего материала контейнер поднимают в зону охлаждения. Пропитанное изделие извлекается из контейнера после завершения процесса кристаллизации и соответствующего охлаждения материала. Благодаря тому, что большая часть матричного материала находится в верхней части формы, усадочная раковина выводится из рабочей области изделия.

Для обеспечения качественной пропитки необходим тщательный расчет теплоемкости системы, учитывающий температуру подогрева, массу волокна, оправки или формы, объем выпоров и т. д. Так, например, если волокна недостаточно подогреты, то в матрице будут образовываться поры, связь между компонентами будет неравномерной по высоте изделия. Может наблюдаться и крайний случай, когда матрица затвердеет прежде, чем произойдет полная пропитка.

#### *4.2.1.2.6. Центробежная пропитка*

Для деталей вращения применяется центробежная пропитка, при которой расплавленный металл отбрасывается к стенкам вращающейся формы и пропитывает пористую заготовку. Отсутствие литников, выпоров, высокая точность получаемых изделий, часто исключая последующую механическую обработку, обеспечивает эффективность данной технологии.

Для выполнения центробежной пропитки используют специальные заливочные машины с вертикальной или горизонтальной осью вращения. Этим методом получают изделия в форме втулок, колец, труб. На рис. 4.44 показана схема получения металлического композиционного материала в форме втулки с использованием центробежной машины, обеспечивающей вращение формы вокруг вертикальной оси. Матричный металл из разливочного ковша заливают сверху в литейную форму с установленным в ней армирующим

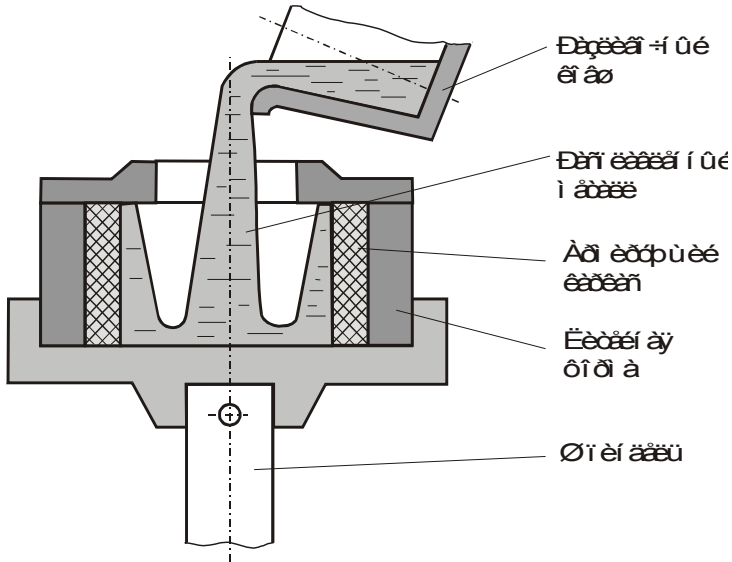


Рис. 4.44. Схема процесса получения металлического композиционного материала методом центробежной пропитки армирующего каркаса

каркасом. Форма закреплена на шпинделе, вращаемом электрическим двигателем. Расплавленный металл центробежными силами отбрасывается на армирующий каркас, постепенно пропитывая его. Литейная форма вращается до полного затвердения матричного расплава. После кристаллизации металла вращение формы прекращается и изделие извлекают из формы. Для увеличения срока службы литейной формы на ее рабочие поверхности наносят теплозащитные покрытия.

#### 4.2.1.2.7. Ультразвуковая пропитка

В 1929 г. В. Ричардс обнаружил, что под действием ультразвуковых колебаний жидкость в капиллярах может подниматься до более высоких значений, чем просто под действием капиллярного давления. Дополнительный подъем уровня жидкости при нормальном падении ультразвуковых волн связан с параметрами ультразвуковых колебаний, диаметром капилляра и температурой жидкости. Явление увеличения высоты подъема жидкости и скорости ее прохождения в капиллярах под действием приложенных извне ультразвуковых колебаний носит название звукокапиллярного

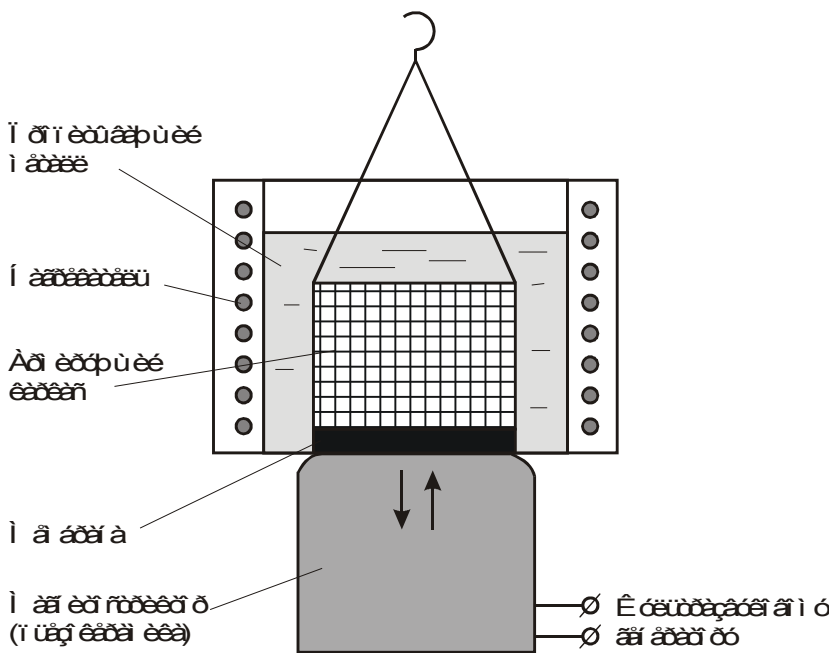


Рис. 4.45. Схема ультразвуковой пропитки армирующего каркаса

эффекта. Ультразвуковую пропитку успешно применяют в технологии пропитки, в несколько раз ускоряя процесс изготовления композиционных материалов. При частоте колебаний 23,5 кГц и интенсивности  $3,5 \cdot 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup> скорость пропитки пористых образцов маслом возрастает в несколько раз [32]. На рис. 4.45 показана одна из возможных схем пропитки с применением ультразвука. Простота и технологичность процесса позволяют включить ультразвуковую пропитку в поточную линию производства металлических композиционных изделий.

#### 4.2.1.2.8. Особенности применения методов пропитки для получения некоторых типов металлических композиционных материалов

Методы пропитки нашли достаточно широкое применение при производстве изделий из металлических композиционных материалов. Это основные методы производства композитов с алюминиевой матрицей, армированной углеродными волокнами [32]. Композиты этого типа могут быть получены по технологии пропитки под давлением, а также методом непрерывной пропитки

алюминием углеродного жгута с предварительно нанесенным покрытием (например, из диборида титана). Нанесение покрытий на углеродные волокна – один из эффективных путей улучшения смазываемости волокон алюминием или его сплавами.

Достоинствами композитов типа Al–C являются высокие демпфирующие характеристики, низкий коэффициент термического расширения, высокие тепло- и электропроводность. Этим материалам свойственна низкая чувствительность к надрезам. Критическая длина трещины в углеалюминии в 2 раза больше, чем в композитах типа Al–B [32]. Недостаток композитов Al–C – низкая коррозионная стойкость. Повышению коррозионной стойкости углеалюминия способствует нанесение защитных покрытий, не допускающих непосредственного контакта углеродных волокон с алюминиевой матрицей. Низкая коррозионная стойкость углеалюминия препятствует широкому промышленному применению этого материала. Имеются сведения о применении композитов типа Al–C для изготовления деталей в виде труб и профилей другого типа, предназначенных для военной техники (управляемых снарядов, торпед, ракет «Трайидент», спутников) [32].

Особенность процессов получения пропиткой композиций типа алюминий–борное волокно заключается в необходимости строгого контроля температуры и времени контакта жидкой фазы с волокном. Превышение значений этих технологических параметров относительно оптимума приводит к разупрочнению борных волокон. Если время контакта расплавленного матричного материала с волокнами не превышает нескольких секунд, то в этом случае поверхность волокон бора остается неповрежденной [32]. Практически обеспечить такую малую длительность контакта позволяет технология получения металлических композиционных материалов методом непрерывной пропитки. Поэтому непрерывная пропитка считается наиболее подходящим технологическим методом при производстве бороалюминиевых композиций. Тем не менее непрерывная пропитка не позволяет достичь таких же высоких механических свойств материалов типа Al–B, как и твердофазные способы, например горячее прессование. Бороалюминий, полученный методом непрерывной пропитки, имеет предел прочности на уровне 650...1150 МПа. Горячее прессование обеспечивает  $\sigma_b = 1400...1700$  МПа.

Методом непрерывной пропитки получают бороалюминиевую проволоку. В дальнейшем такая проволока используется для получения композиционных материалов твердофазными и жидкофазными методами. Для защиты борного волокна от отрицательного

воздействия жидкой фазы применяют покрытия из нитрида бора, карбида кремния SiC и карбида бора B<sub>4</sub>C. Материал, полученный путем пропитки алюминием борных волокон с покрытием из нитрида бора, называется нитборалом [32]. Объемное содержание волокон в нитборале достигает 75 %.

Применению технологии пропитки для изготовления композитов типа алюминий–карбид кремния препятствует плохая смачиваемость волокон карбида кремния при температурах ниже 1273 К. При 1323...1373 К свободная пропитка возможна, однако при этих температурах происходит резкое разупрочнение волокон. Механические свойства полученных при этих температурах композитов оказываются низкими. Твердофазные способы получения композитов типа Al–SiC более предпочтительны.

Перспективным считается использование в качестве матричного материала магния и его сплавов. Это объясняется хорошей смачиваемостью магнием таких материалов, как стальные, борные, карбидокремниевые, титановые волокна. Важным обстоятельством является то, что магний и его сплавы практически не растворяют перечисленные материалы [32]. Для реализации технологии пропитки это имеет принципиальное значение.

Методом пропитки могут быть изготовлены композиционные материалы типа магний–борное волокно. Технологическими процессами, позволяющими получить композиты такого типа, являются пропитка в вакууме, непрерывная пропитка, пропитка в инертной среде. Механические свойства боромагниевого композитов, полученных методами пропитки и твердофазными методами, существенно не отличаются [32].

Метод пропитки считается рациональным для получения композиционных материалов с магниевой матрицей, армированной углеродными волокнами. Углеродные волокна магнием смачиваются плохо. Эта проблема решается путем нанесения на волокна покрытий, например титановых или никелевых. Композиционные материалы типа Mg–C имеют более низкую плотность по сравнению с чистым магнием. Удельная прочность таких композитов в 1,3...1,8 раза выше, чем у лучших магниевых сплавов, а удельная жесткость – в 4 раза [32].

Методы твердофазного получения композиций с магниевой матрицей не имеют особых преимуществ по сравнению с методами, основанными на пропитке армирующего каркаса. Получение композитов типа Mg–C и Mg–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методами пропитки считается наиболее оптимальным технологическим решением [32]. Недостаток композитов с магниевой матрицей – низкая коррозионная

стойкость. Устранение этого недостатка возможно путем применения технологии плакирования композитов листами алюминия или другими материалами.

Применение технологии получения жаропрочных композитов методом пропитки сдерживается высокими температурами плавления используемых для этого матричных материалов. Высокотемпературный нагрев ведет к растворению армирующих волокон, их резкому разупрочнению. В качестве упрочняющих элементов для получения жаропрочных композиционных материалов подходящими считаются вольфрамовая проволока, волокна карбида кремния и оксида алюминия. Успешным примером разработки жаропрочного композита считают материал марки ВКН-1, полученный путем вакуумной пропитки вольфрамовой проволоки никелевым сплавом типа ЖС6К [40]. При комнатной температуре предел прочности матричного сплава ЖС6К составляет 950 МПа, что существенно выше, чем у композита ВКН-1 ( $\sigma_B = 580$  МПа). Зато при 1373 К прочность композиционного материала выше, чем матричного сплава (538 и 317 МПа соответственно).

Методы пропитки широко используются для получения материалов типа псевдосплавов [32]. В псевдосплавах одна из составляющих обычно получается из порошка. Методом порошковой металлургии из порошка прессуют пористый каркас. На следующей стадии осуществляют его спекание. Для получения псевдосплава спеченный каркас пропитывают более легкоплавким металлом, слабо или вообще не взаимодействующим с материалом каркаса. После кристаллизации пропитывающего материала полученная композиция представляет собой два взаимопроникающих каркаса. К числу псевдосплавов с каркасной структурой относятся железомедные, железолатунные, вольфрамомедные, вольфрамосеребряные, молибденомедные и другие материалы. Материалы с каркасной структурой рекомендуется использовать в тех случаях, когда необходим высокий уровень прочностных свойств при повышенных температурах. Даже при полном расплавлении легкоплавкого материала, тугоплавкий материал сохраняет несущую способность.

Для получения методом пропитки структуры не каркасного, а матричного типа операция спекания каркаса выполняться не должна. Для этого свободно насыпанный порошок тугоплавкого материала пропитывается матричным металлом [32].

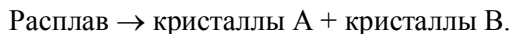
Метод пропитки широко используется для изготовления керметов (керамико-металлических материалов), под которыми понимаются материалы, представляющие собой композиции одной или нескольких керамических фаз с металлами. В керметах один из

компонентов (как правило, занимающий большую часть объема материала) – тугоплавкое соединение (оксид, карбид, нитрид, борид или их комбинация), а второй – металл.

#### **4.2.2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЭВТЕКТИК**

Метод направленной кристаллизации эвтектик позволяет получить гетерофазные сплавы в виде матрицы и элементов упрочняющей фазы в форме волокон или пластин, прочно соединенных друг с другом. Важнейшим достоинством данного метода является возможность получения композиционного материала всего за одну операцию (в процессе кристаллизации расплава). В данном случае нет необходимости готовить отдельно волокна и матричный материал, а затем тем или иным способом совмещать их в единое целое. При получении эвтектических композиционных материалов не возникает вопросов, связанных с химической совместимостью образующихся фаз, прочностью межфазных связей. Практически отпадают такие характерные для других способов получения МКМ проблемы, как неполное смачивание матричным сплавом упрочняющих волокон или образование окислов на поверхности раздела волокна и матрицы [21]. В эвтектических композиционных материалах волокна и матрицы не реагируют друг с другом. Они не растворяются или мало растворяются друг в друге.

Эвтектикой называется механическая смесь двух или более видов кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкого расплава. В переводе с греческого «эвтектика» означает «легко плавящаяся» [41]. Эвтектический материал имеет определенный химический состав. Особенностью эвтектик является то, что кристаллизация фаз происходит при постоянной, самой низкой для данной системы температуре. В общем виде эвтектическая реакция имеет вид



Между скоростью кристаллизации  $V$  и межпластиночным (межволоконным) расстоянием  $\lambda$  существует взаимосвязь [21]

$$\lambda^2 V = \text{const.}$$

Кристаллы А и В могут быть твердыми растворами и химическими соединениями.

В зависимости от химического состава и условий образования эвтектики могут иметь различную дисперсность и морфологию.



Одна из фаз может быть выделена в виде глобулей, волокон, пластин. Возможно образование колоний эвтектики с неправильной формой выделений (выделений смешанного типа). Форма армирующей фазы в эвтектике (пластины или волокна) зависит от ее объемной доли. Как правило, при объемной доле менее 32 % упрочняющая фаза имеет волокнистую форму. В некоторых эвтектических системах, например Al-Al<sub>3</sub>Ni, Pb-Ag, Sn-Zn, переход от волокнистой структуры к пластинчатой происходит со снижением скорости кристаллизации [3].

Существует разделение эвтектик на нормальные и аномальные. Нормальные эвтектики (эвтектики с «правильной» структурой) образуются при росте фаз из расплава с одинаковой скоростью. Аномальная эвтектика (с «нарушенной» структурой) возникает, когда одна из фаз растет быстрее, ветвясь в расплаве. Вторая фаза кристаллизуется, заполняя пространство между ветвями первой. Типичной аномальной эвтектикой является эвтектическая система Al-Si. В некоторых аномальных эвтектиках этот последний недостаток может быть исправлен путем подбора условий кристаллизации.

Если эвтектика имеет одну из фаз в форме пластин или волокон, то обычно в пределах отдельных колоний наблюдается закономерная ориентация этих элементов, т. е. в пределах колонии эвтектики должна проявляться анизотропия механических свойств. В пределах образца или изделия с эвтектической структурой, сформированной в условиях обычного охлаждения сплава, анизотропия свойств не проявляется, т. е. материал по существу является изотропным. Это связано с хаотичной ориентацией множества образующихся колоний. Материал такого типа в соответствии с определением, приведенным в начале учебного пособия, композиционным считать нельзя.

Суть методик получения эвтектических композиционных материалов, т. е. эвтектик с четко ориентированной структурой, заключается в целенаправленном управлении структурой композиции путем контроля величины и направления градиента температуры  $G$  и скорости движения фронта кристаллизации  $V$ . В основе процесса направленной кристаллизации эвтектик лежит тот факт, что в процессе охлаждения расплава образующийся кристалл растет в направлении теплоотвода. Если обеспечить управляемый отвод тепла в направлении оси изложницы, то образующиеся кристаллы будут ориентированы в осевом направлении. На рис. 4.46 в качестве примера показано строение направленно кристаллизованной эвтектики MnSb-Sb в продольном и перпендикулярном направлениях.

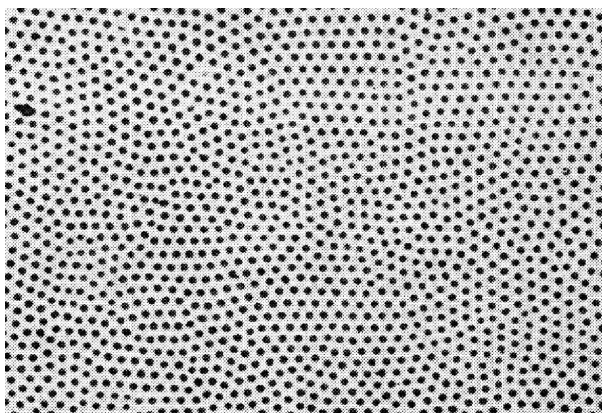
*a**б*

Рис. 4.46. Микроструктура эвтектики MnSb-Sb в поперечном (а) и продольном (б) сечениях [21]

Одно из важнейших условий направленности структуры – сохранение плоского фронта кристаллизации. Ориентированность структуры эвтектических композитов может быть нарушена как чрезмерно низким градиентом температуры у фронта кристаллизации, так и ускоренным движением фронта кристаллизации.

В эвтектиках прочностные свойства волокон, как правило, выше, чем пластин. Поэтому предпочтительно получение эвтектических композиционных материалов с элементами упрочняющей фазы в форме волокон [3].

Схема установки для направленной кристаллизации эвтектик приведена на рис. 4.47. Графитовый тигель с объёмом исходного материала загружается снизу в неподвижную печь. Материал расплавляется, затем печь медленно поднимается вверх. Скорость перемещения печи относительно тигля составляет  $\sim 5 \dots 1000$  мм/ч. Нижняя часть тигля охлаждается водой, обеспечивая отвод тепла в осевом направлении. Кристаллы образующейся при охлаждении расплава эвтектики также растут в продольном направлении тигля. Постепенно, перемещаясь вдоль тигля, печь выходит в верхнее положение. При этом происходит расплавление исходной заготовки

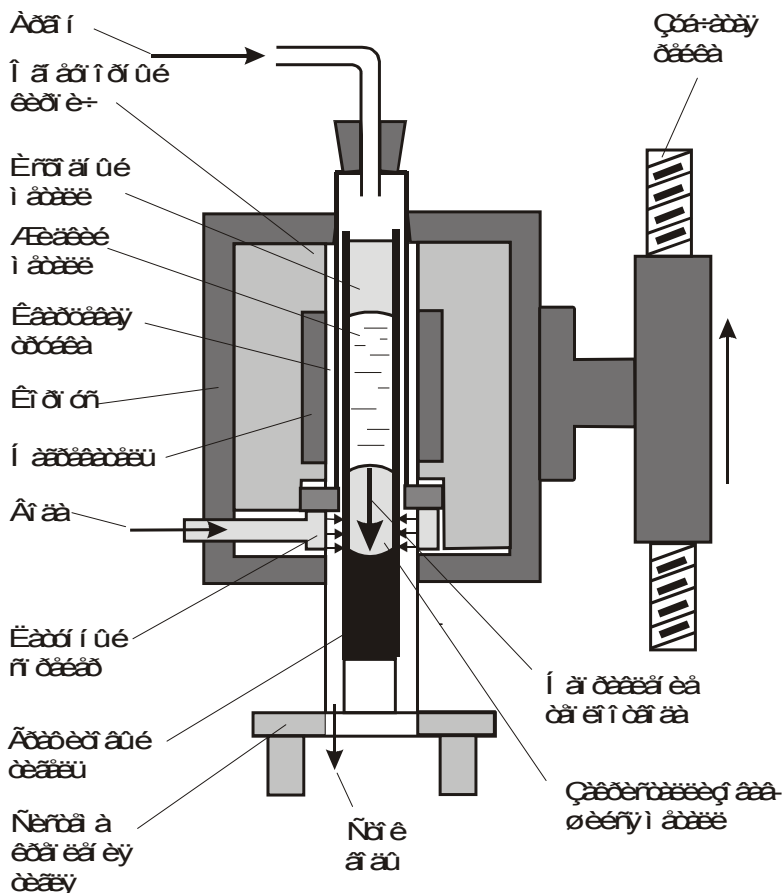


Рис. 4.47. Схема установки для направленной кристаллизации эвтектик

и последующая кристаллизация расплава с образованием ориентированной двухфазной структуры.

По применению эвтектические композиционные материалы разделяют на материалы конструкционного назначения (композиты на основе легких сплавов, жаропрочные КМ) и материалы с особыми физическими свойствами (полупроводниковые, ферромагнитные материалы и др.) [3]. Конструкционные эвтектические композиционные материалы проявляют высокое сопротивление пластическому течению вплоть до температур, близких к температуре плавления. Это позволяет использовать эвтектические композиционные материалы на базе тугоплавких составляющих для изготовления элементов газовых турбин, главным образом лопаток.

Магнитотвердые композиты могут быть использованы в качестве постоянных магнитов, поскольку обладают большой коэрцитивной силой [3]. Большинство пластинчатых эвтектик с ориентированной структурой отличаются ярко выраженной анизотропией электрического сопротивления, что позволяет использовать их в качестве переменных резисторов.

Существенными недостатками, проявляющимися при проектировании, изготовлении и использовании эвтектических композиционных материалов, являются ограниченность количества сплавов, в которых возможно протекание эвтектических реакций; невозможность варьирования объемной долей волокна (величина постоянная); высокая хрупкость, присущая в основном эвтектикам пластинчатого типа.

#### 4.2.3. АЛЮМОПЕНОКОМПОЗИТЫ

Один из современных классов материалов составляют так называемые пенометаллы. Пенометаллы могут быть получены по технологии порошковой металлургии и жидкофазными методами. Пенометалл представляет собой легкий пористый материал с металлическими стенками ячеек. Плотность пенометаллов мала и составляет  $\sim 0,05 \dots 1,0 \text{ г/см}^3$ . Некоторые из пенометаллических материалов с закрытой пористостью способны плавать в воде. Яркими представителями пенометаллов являются алюмопенокомпозиты (АПКМ) [33, 34].

Благодаря ячеистому строению алюмопенокомпозиты обладают высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, способностью гасить акустические и электромагнитные колебания, а также поглощать энергию удара. Малая плотность АПКМ позволяет изготавливать из них крупногабаритные панели сверхмалой

массы. Алюмопенокомпози́ты весьма перспективны в автомобилестроении для изготовления элементов конструкций, обеспечивающих безопасность людей при авариях (энергопоглотителей в виде бамперов и других элементов стержневого типа). Во время удара энергия эффективно расходуется на захлопывание ячеек металлической пены и пластическую деформацию конструкции в целом. По степени поглощения энергии алюмопенокомпози́ты близки к идеальным энергопоглотителям [34]. АПКМ являются коррозионно-стойкими, износостойкими, экологически чистыми материалами. Технологические особенности производства АПКМ, относительно низкая стоимость сырья позволяют применять компози́ты такого типа практически во всех отраслях промышленного производства.

Алюмопенокомпози́т представляет собой пеноалюминий, стабилизированный керамическими частицами SiC или  $Al_2O_3$  [33]. Особенности влияния объемной доли и размеров частиц на параметры образующейся пены отражены на рис. 4.48 [34]. Для получения алюмопенокомпози́та в расплавленный компози́т необходимо ввести пузырьки газа. Практически могут быть использованы пузырьки любого молекулярного газа. При их всплытии образуется плотная, устойчивая ячеистая жидкая пена. Стабилизации пены во время охлаждения способствует выделяющийся из алюминия водород. Благодаря этому, кристаллизация материала происходит без его усадки. Вспененный материал обладает плохой жидкотекучестью, тем не менее его можно поместить в литейную форму и закристал-

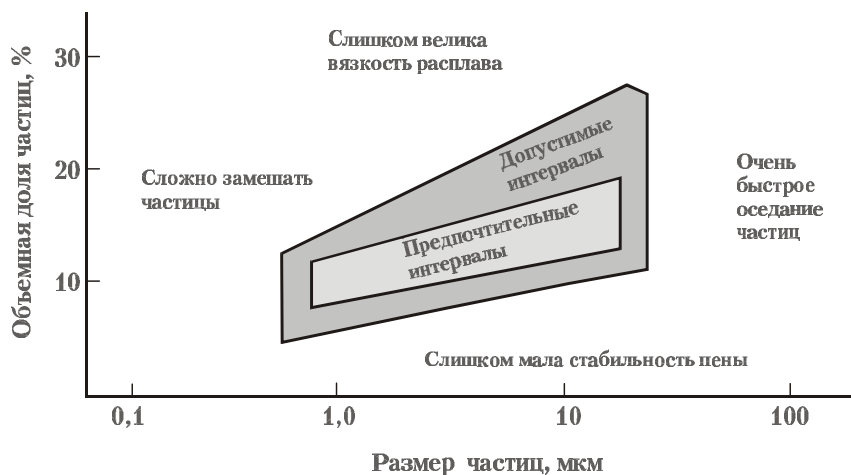


Рис. 4.48. Наиболее оптимальные условия получения алюмопенокомпози́тов [33]

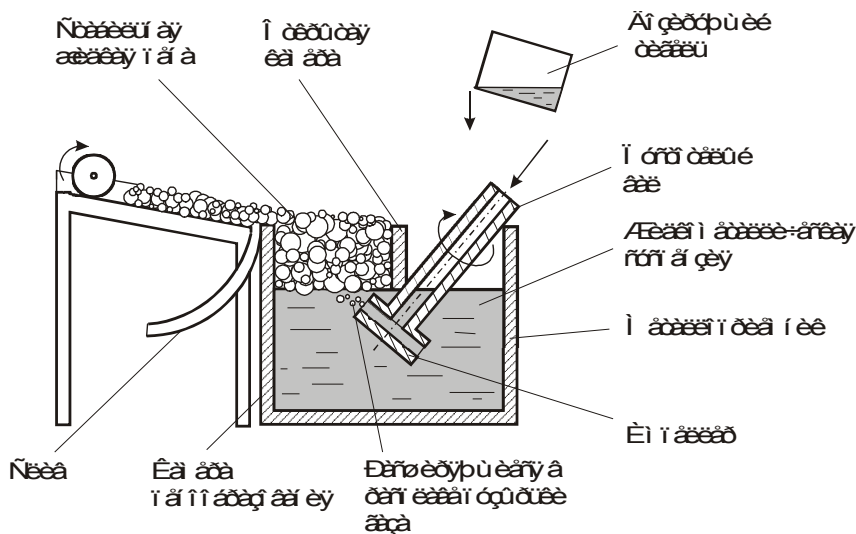


Рис. 4.49. Получение алюмопенокомпозитов по патенту фирмы «Алкан»

лизовать в ячеистом состоянии. Конфигурация вспененного слитка будет иметь контуры рабочего объема формы, в которую загрузили пену. Технологические схемы получения алюмопенокомпозитов приведены на рис. 4.49 и 4.50. В соответствии с технологией фирмы

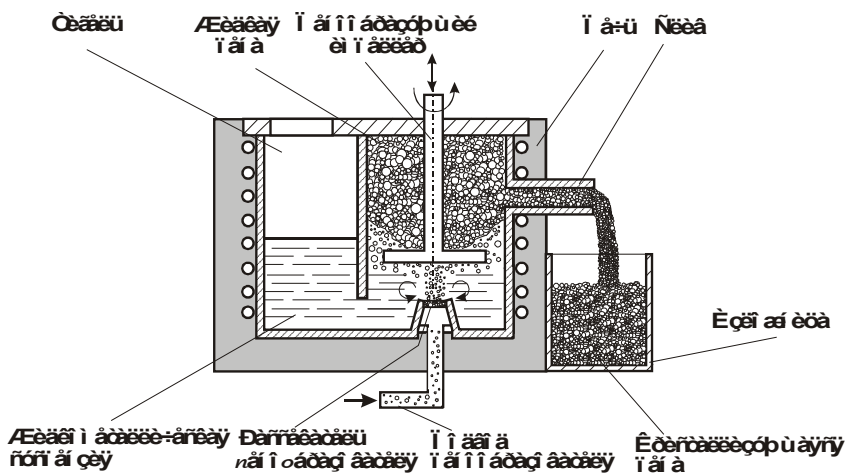


Рис. 4.50. Экспериментальная установка для получения слитков из алюмопенокомпозитов

«Алкан» в подогреваемый металлоприемник с жидкометаллической суспензией вводят пустотелый вал с вращающимся импеллером. Через вал и импеллер в емкость с суспензией под избыточным давлением подается пенообразующий газ. При всплытии пузырьков на их поверхности адсорбируются частицы загустителя. В результате на поверхности открытой камеры образуется слой стабильной жидкой пены. Вязкая стабильная пена удаляется через слив или транспортируется на стол формовки фасонных изделий [33]. Для сохранения уровня жидкометаллической суспензии ее периодически или постоянно добавляют в металлоприемник из дозирующего тигля.

Для усиления эффекта образования пены в суспензию можно вместо газа (воздуха) вводить порошковый газообразователь. Газообразователем могут служить порошки гидрида титана или циркония. На рис. 4.50 приведена схема производства пены по методике Всероссийского института легких сплавов (ВИЛС). Для загущения и стабилизации суспензии в алюминий вводят частицы карбида кремния  $\text{SiC}$  и оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Функцию пенообразователя выполняет гидрид титана  $\text{TiH}_2$ , вводимый в расплав в виде порошка в количестве 1...3 %.

Анализ свойств алюмопенокомпозитов, технологические особенности их производства позволяют рекомендовать эти композиционные материалы для широкого применения. В настоящее время ВИЛС предлагает полуфабрикаты из алюмопенокомпозитов для применения в строительстве, на транспорте, в машиностроении. Важным фактором является то, что цены на алюмопенокомпозиты соизмеримы с ценами на полуфабрикаты из алюминиевых сплавов.

### **4.3. ГАЗОФАЗНЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ**

Газофазные методы изготовления деталей используют для получения металлических композиционных материалов путем газотермического напыления матричного материала на упрочняющие волокна или осаждения матричного материала из газовой фазы. При необходимости может применяться дополнительная операция уплотнения материала прессованием или спеканием.

Газофазные методы используют для изготовления композиционных материалов, в которых не допускается взаимодействие упрочнителя с жидким матричным материалом. Эти методы могут быть применены для получения композиций следующих систем: алюминиевая матрица – борные волокна; никелевые сплавы – углеродные волокна; нитевидные кристаллы тугоплавких соединений – металлы и др.

### 4.3.1. ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАПЫЛЕНИЯ МАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА

Для нанесения матричного материала на волокна упрочняющей фазы могут использоваться различные методы газотермического напыления. Наиболее распространен на практике метод плазменного напыления материалов.

Плазменное напыление материала производится с использованием плазмотронов. Функция плазмотрона заключается в создании низкотемпературной плазмы, нагреве с ее помощью напыляемого материала и транспортировке материала к подложке. Плазмой называют такое состояние газообразной смеси, в которой число заряженных частиц (электронов и ионов) составляет не ниже  $10^9$  в одном кубическом сантиметре [42]. Приблизительно плазме соответствует температура около 10 000 К и выше. В качестве плазмообразующих газов используют аргон, азот, гелий, аммиак, смеси газов.

Формирование плазменного покрытия происходит при соударении расплавленных частиц с покрываемой поверхностью. Благодаря высокой температуре частиц между ними на подложке возникают участки сваривания, и частицы прочно соединяются между собой и с подложкой. Толщина, плотность и прочность соединения покрытия с основой определяются технологическим режимом процесса напыления и природой материалов покрытия и основы.

Схема плазменного напыления представлена на рис. 4.51. Основным компонентом оборудования для плазменного напыления покрытий является плазменный распылитель, который состоит из вольфрамового электрода, выполняющего роль катода, и водоохлаждаемого медного сопла – анода. С помощью источника питания в распылителе возбуждается электрическая дуга, которая стабилизируется стенками сопла и плазмообразующим газом, поступающим от системы газоснабжения. Распыляемый материал подается в высокотемпературную плазменную струю, истекающую из сопла распылителя. С помощью пульта управления регулируются расход рабочего газа и мощность дуги.

Для напыления используют материал в виде порошка, стержня или проволоки. На рис. 4.51, а изображена схема головки для нанесения покрытия из порошков. В этом случае в плазму, образуемую между вольфрамовым электродом и анодом, вводится напыляемый порошок.

В качестве материала для напыления в схеме, изображенной на рис. 4.51, б, используется проволока. В данном случае разряд возникает между вольфрамовым катодом и напыляемой проволокой,



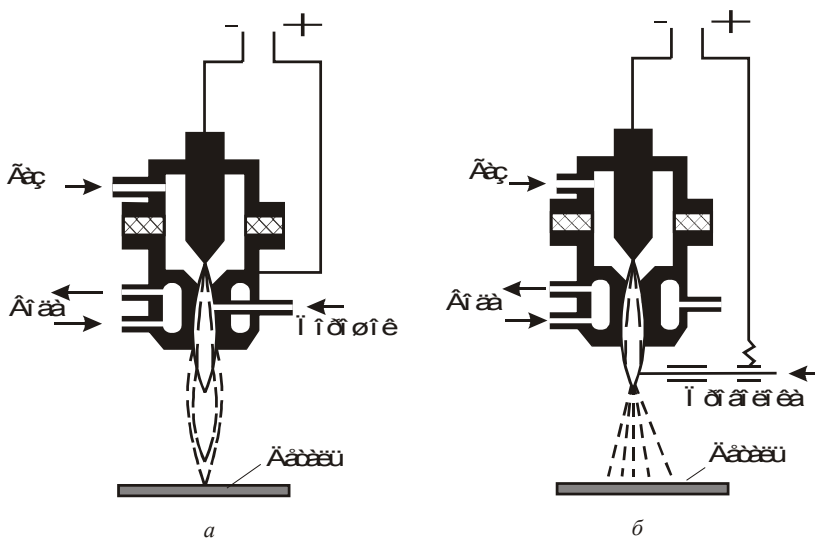


Рис. 4.51. Схемы устройства головок плазменных горелок для нанесения покрытий из порошков (а) и проволоки (б)

которая является расходуемым анодом. При этом сопло остается электрически нейтральным.

Для плазменного напыления материалов используются отечественные, серийно выпускаемые аппараты УПУ-3М (напыление из проволоки и порошка) и УМП-5 (напыление из порошка).

На рис. 4.52 представлена схема построения технологического процесса плазменного напыления, который включает четыре основных этапа:

- обоснование и выбор режимов напыления;
- подготовка детали к напылению;
- процесс напыления;
- обработка изделия после напыления.

Метод плазменного напыления используется для получения металлических композиционных материалов, упрочненных волокнами. Изготовление волокнистых КМ включает следующие операции:

- укладка волокон (например, на металлическую фольгу);
- плазменное напыление тонкого слоя материала, служащего матрицей (рис. 4.53) [5];
- разрезка полученного полуфабриката и укладка в форму для прессования;
- диффузионная сварка под давлением, приводящая к образованию плотного материала.

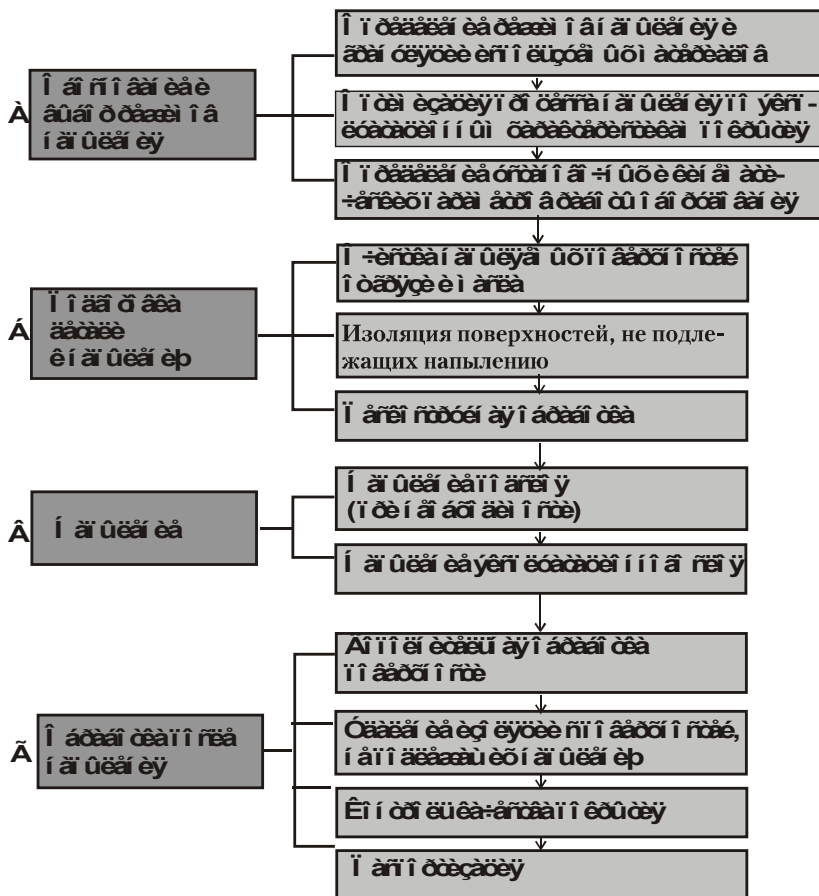


Рис. 4.52. Технологический процесс получения металлических композиционных материалов методом плазменного напыления

В процессе плазменного напыления очень важно обеспечить хорошую связь между напыленным слоем и волокнами, а также между напыленным слоем и фольгой, что значительно облегчает операции раскроя и укладки, предотвращает разрушение волокон. Прочность связи покрытия с волокнами и фольгой, а также качественные характеристики покрытия определяются множеством технологических параметров: состоянием поверхности волокон и фольги; температурой подложки; расстоянием от дуги до подложки; напряжением и плотностью тока дуги; размером частиц напыляемого материала и др.

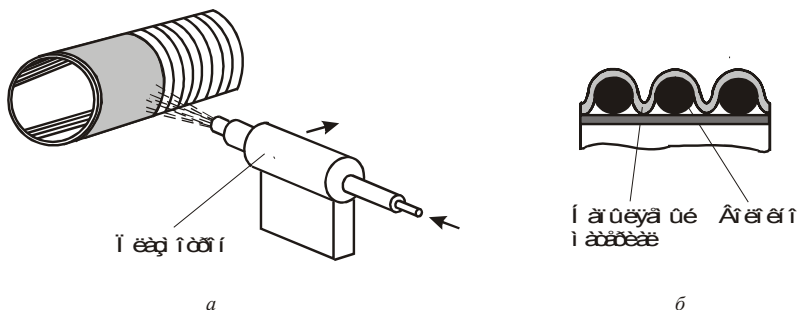


Рис. 4.53. Схемы плазменного напыления матричного материала на заготовки цилиндрической формы (а) и получения монослойных заготовок (б)

При напылении материала на поверхность алюминиевой или титановой фольги последнюю подвергают обезжириванию и осветляющей химической обработке для растворения слоя оксидов. В некоторых случаях для разрушения оксидной пленки на поверхности фольги используют пескоструйную обработку. Удаление оксидной пленки с поверхности фольги значительно повышает прочность связи ее с напыляемым слоем, а также облегчает последующий процесс диффузионной сварки.

Более простым способом газотермического нанесения матричного материала является газопламенное напыление. Газопламенное напыление осуществляется путем переноса газовой струей на подложку (волокну) частиц материала, разогретых в газопламенной горелке. Горючими газами, используемыми при реализации данного способа, являются ацетилен, пропан-бутан, природный газ и др. Окислителем служит кислород. Наиболее часто в качестве горючего применяют ацетилен. При его сгорании в смеси с кислородом температура пламени достигает  $3100...3200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [42]. В качестве исходного напыляемого материала могут быть использованы проволоки, прутки и порошки.

На рис. 4.54 показана схема газопламенного напыления при использовании в качестве исходного материала порошка. Порошок поступает из питателя в центральный канал горелки, подхватывается транспортирующим газом и попадает в пламя, возникающее при сгорании ацетилена. Порошок нагревается, оплавляється и попадает на подложку (волокну), формируя основу матрицы композита.

Напыление матричного материала на волокна упрочняющей фазы проводят также с помощью установок детонационного типа (рис. 4.55). Отличительная особенность этого метода напыления – высокая скорость полета частиц (превышающая скорость звука).

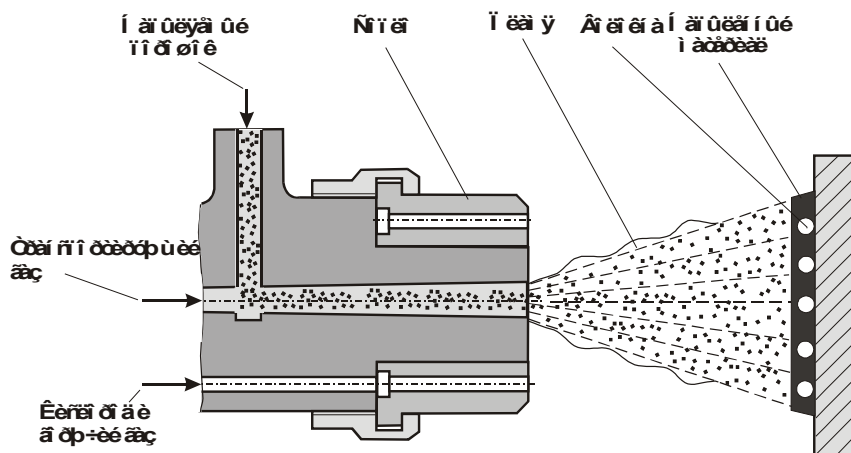


Рис. 4.54. Схема газопламенного напыления матричного материала (порошка) на волокна

Основным элементом детонационной установки является ствол (труба), в который подается порошок матричного материала а также газовая смесь ацетилена и кислорода. При вспышке искры, создаваемой свечой, в трубе происходит взрыв газовой смеси. Частицы порошка увлекаются взрывной волной и с большой скоростью устремляются к подложке (упрочняющим волокнам). После продувки трубы азотом начинается следующий цикл, включающий

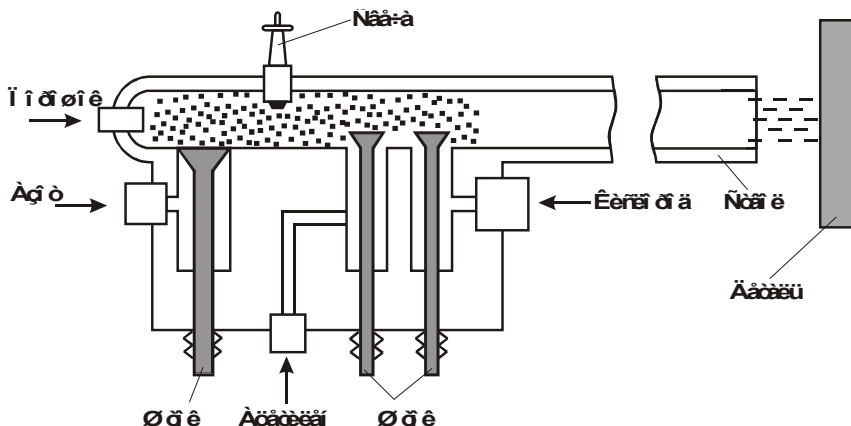


Рис. 4.55. Принципиальная схема установки для детонационного нанесения покрытий

ввод порошка, напуск ацетилен-кислородной смеси, ее поджиг искрой и нанесение очередной порции матричного материала на арматуру. Установки детонационного типа работают в автоматическом режиме.

#### **4.3.2. ОСАЖДЕНИЕ МАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ**

Метод осаждения из газовой фазы известен достаточно давно, но лишь недавно его стали использовать для формообразования изделий из металлических композиционных материалов. Метод заключается в следующем: пары легколетучего соединения металла подводят к нагретой поверхности, на которую необходимо нанести покрытие. В результате химической реакции на поверхности создается покрытие заданного состава. Оставшиеся газообразные продукты реакции удаляются из реакционной системы.

Процесс осаждения металла может проходить при атмосферном и пониженном давлении. Для установок, работающих при пониженном давлении, характерно качественное соединение металлов с подложками. Установки, работающие при атмосферном давлении, характеризуются высокой производительностью процесса. Основными элементами установок для осаждения металлов из газовой фазы являются: реакционная камера; устройство для нагрева подложки и регистрации ее температуры; система очистки газоносителей, испарители металлосодержащего соединения и измерители скорости газового потока. Для изготовления реакционных камер могут быть использованы стекло, медь, нержавеющая сталь, другие материалы, не взаимодействующие с газовой средой.

Метод осаждения из паровой фазы используют для самых различных целей. Основное назначение метода – получение защитных покрытий, а также изделий сложной формы из тугоплавких материалов и композиционных материалов из несплавляемых компонентов [5].

#### **4.4. ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ**

Одним из методов формирования матричного материала при получении металлических композитов является его осаждение из электролита на заготовку, представляющую собой армирующий каркас из элементов упрочняющей фазы. Один из вариантов электролитического процесса получения МКМ схематически приведен на рис. 4.56 [5]. В качестве заготовки используется оправка, на

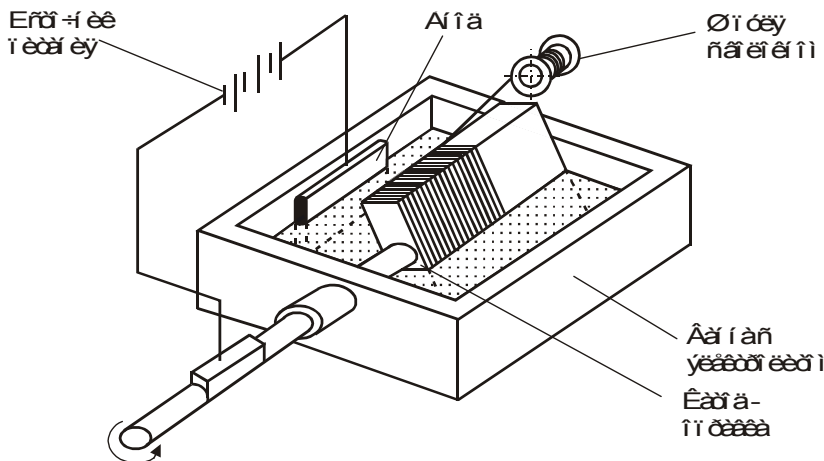


Рис. 4.56. Схема изготовления металлических композиционных материалов способом электролитического осаждения

которую наматывается упрочняющее волокно. Оправка, выполняющая роль катода, помещена в электролит, в котором находятся ионы осаждаемого металла. В процессе электролитического осаждения металла происходит заполнение межволоконных промежутков. В итоге все волокна оказываются покрытыми матричным материалом. При вращении оправки на нее со шпули наматываются следующие витки волокон. Таким образом, постепенно формируется металлический композиционный материал. Использование в качестве упрочняющих элементов волокон диаметром менее 100 мкм формирует металлическую матрицу высокой плотности.

## 4.5. ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 4.5.1. ПОЛУЧЕНИЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы в качестве упрочняющей фазы содержат дисперсные, распределенные по объему матрицы, частицы. Следует отметить, что дисперсные частицы содержатся в двух типах материалов, похожих по названию. Речь идет о дисперсионно-упрочненных и дисперсно-упрочненных сплавах [46].

Дисперсионное упрочнение представляет собой повышение прочности сплава при распаде пересыщенного твердого раствора.

Сплавы, в которых имеет место упрочнение подобного рода, называют дисперсионно-упрочненными, или стареющими, сплавами.

Дисперсное упрочнение представляет собой повышение прочностных свойств при искусственном введении в сплав дисперсных упрочняющих частиц. Материалы, в которые на определенной стадии их получения были введены дисперсные упрочняющие частицы, называют дисперсно-упрочненными сплавами или композиционными материалами. В данном разделе речь идет о композиционных материалах. Особенностью дисперсно-упрочненных композиционных материалов является то, что частицы дисперсных фаз неогерентны с матрицей.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы получают методами порошковой металлургии. Объемная доля частиц в них составляет 0,1...15 % [3]. Размер частиц упрочняющей фазы не превышает 0,1 мкм. В качестве упрочняющей фазы используют частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов, интерметаллических соединений.

Порошки, используемые для производства дисперсно-упрочненных композиционных материалов, могут быть получены разными способами [3]:

- механическим смешиванием;
- механическим легированием;
- реакционным смешиванием;
- химическим смешиванием;
- разложением смесей солей;
- поверхностным окислением;
- внутренним окислением;
- водородным восстановлением в растворах;
- химическим осаждением из растворов.

Механическое смешивание порошков матричной и упрочняющей фазы осуществляется в смесителях типа «пьяная бочка», в конусных смесителях, шаровых, вибрационных, планетарных, вихревых и других мельницах. Время смешивания – от нескольких минут до десятков часов. На величину этого параметра влияет тип используемого оборудования, гранулометрический состав и свойства смешиваемых порошков. Смешивание может осуществляться в защитной атмосфере или на воздухе с последующей термической обработкой в восстановительной атмосфере. При реализации этой технологии рекомендуется использовать порошки матричных материалов с размерами частиц 5...10 мкм и порошки частиц упрочняющих фаз размером 0,01...0,1 мкм. Этим методом могут быть получены смеси для изготовления дисперсно-упрочненных компо-

зитов любого состава. Недостаток заключается в трудности обеспечения оптимальных размеров частиц матричного порошка и упрочняющей фазы, а также равномерного перемешивания применяемых порошков.

Реакционное смешивание является разновидностью механического смешивания [3]. В качестве примера может быть приведена технология смешивания алюминия с графитом. В результате реакции между графитом и алюминием в процессе смешивания образуются карбиды типа  $Al_4C_3$ . После термической обработки при 823 К концентрация карбидов в смеси увеличивается. Размер упрочняющих частиц составляет 0,03...0,05 мкм. В качестве технологического оборудования используют шаровые мельницы, печи.

Метод химического смешивания применяется для сплавов, упрочненных оксидами. При его реализации используются порошки матричного материала и растворы солей металла упрочняющей фазы. В процессе их механического перемешивания при повышении температуры соль переходит в твердое состояние. Повышение температуры обеспечивается за счет саморазогрева или подогрева смеси. Полученную таким образом смесь частиц матричного материала и сухой соли подвергают термической обработке. При этом соль превращается в оксид металла, выполняющий функцию упрочняющей фазы. Метод характеризуется однородностью смешивания. Композиционные материалы, полученные из этих солей, обладают высоким уровнем механических свойств.

Метод разложения смеси солей реализуется следующим образом. Растворы используемых солей смешивают, после чего осуществляют удаление растворителя и термическое разложение солей. Для удаления растворителя используют методы сушки, замораживания с последующей возгонкой, впрыскивания раствора через форсунку в нагретую камеру. После удаления растворителя осуществляют термическое разложение солей. Эта операция может быть совмещена с процессом восстановления оксида матричного металла. Недостаток метода заключается в его неуниверсальности. Кроме того, при удалении растворителя может проявиться неравномерность распределения компонентов.

Метод поверхностного окисления используется для упрочнения металла его оксидами. Заключается он в распылении жидкого металла в контролируемой окислительной атмосфере. При распылении на поверхности частиц образуется оксидная пленка. Содержание окислов составляет ~ 0,2...1 %. При необходимости увеличения содержания оксидной фазы производятся дополнительное окисление при повышенных температурах или размол частиц в



шаровых мельницах. Содержание окислов может регулироваться изменением состава газовой атмосферы и удельной поверхности порошков. Для практической реализации метода поверхностного окисления необходимы плавильные печи, распыляющие форсунки и мельница.

Метод внутреннего окисления заключается в контролируемом окислении внутренних объемов частиц порошка низколегированного твердого раствора. Растворителем в используемом твердом растворе является металл, обладающий низким сродством к кислороду. Растворенный металл, в отличие от растворителя, имеет высокое сродство к кислороду. Регулируя температуру и время обработки, управляют процессом окисления частиц порошка. Кислород диффундирует по решетке растворителя и окисляет растворенный в нем металл. Образующиеся внутри частиц окислы выполняют функцию упрочняющей фазы. Метод внутреннего окисления реализуется при использовании порошков на основе железа, меди, никеля, серебра. Функции упрочняющих фаз выполняют оксиды алюминия, бериллия, кремния, титана, хрома. Размер включений оксидов составляет  $\sim 0,01 \dots 0,02$  мкм. Основной недостаток метода связан с тем, что он не является универсальным. Технология внутреннего окисления может быть реализована лишь в ограниченном круге систем.

Метод водородного восстановления в растворах используется для получения порошков никеля и кобальта, упрочненных частицами оксидов, нитридов, карбидов, боридов. Суть метода заключается в реализации гетерогенной реакции восстановления водородом жидкого раствора комплексного соединения матричного материала, смешанного с гидрозолем тугоплавкого соединения [3]. Матричный металл в процессе восстановления покрывает включения тугоплавких соединений.

В качестве одного из методов получения порошка, используемого при производстве дисперсно-упрочненных композиционных материалов, можно назвать технологию химического осаждения из раствора. Ее суть заключается в осаждении металлов или их соединений на частицы упрочняющей фазы. Осаждение осуществляется из растворов при использовании специальных химических реагентов.

Порошки, полученные одним из перечисленных в данном разделе способов, используются для формования прессовок. Формование может осуществляться по технологии уплотнения в закрытых пресс-формах, методами изостатического прессования в эластичных оболочках, методами прокатки в валках.

С целью снижения (устранения) пористости, прессованные заготовки подвергаются спеканию. Эта операция осуществляется путем выдержки при температурах  $\sim (0,7...0,95) T_{пл}$  матричного материала. Спекание выполняется в вакууме или в защитной атмосфере. Температуру и время спекания нужно выбирать так, чтобы не происходило резкого укрупнения упрочняющих частиц.

Процессы прессования и спекания дисперсно-упрочненных композиционных материалов могут быть совмещены при реализации технологии горячего прессования. Температура горячего прессования составляет  $(0,5...0,8) T_{пл}$  матричного материала.

#### 4.5.2. ПРИМЕРЫ ДИСПЕРСНО-УПРочНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Хорошо известными дисперсно-упрочненными композиционными материалами являются материалы на основе алюминия. Речь идет, в первую очередь, о спеченных алюминиевых порошках типа САП-1, САП-2, САП-3. Функцию упрочняющей фазы в этих материалах выполняют окислы алюминия. Композиты этого типа получают путем спекания алюминиевых порошков, покрытых оксидной пленкой. В материале типа САП-1 содержание окисла алюминия составляет 6...9 %, в САП-2 – 9,1...13 %, в САП-3 – 13,1...17 % [3].

Достоинствами дисперсно-упрочненных композиционных материалов типа САП являются их высокие механические свойства при повышенной температуре. При нагреве до 773 К эти материалы сохраняют стабильную структуру в течение 10 000...100 000 часов. Композиты типа САП могут быть использованы для изготовления деталей, испытывающих кратковременные перегревы до 973...1273 К [3].

Методом реакционного смешивания алюминиевого порошка с мелкоизмельченной сажей получают дисперсно-упрочненные композиционные материалы на алюминиевой основе, упрочненные карбидами типа  $Al_4C_3$ . Содержание упрочняющей фазы в виде карбидов в композитах такого типа достигает 20...22 % (объемн.). Кроме карбидов в материале может находиться до 2 % оксида алюминия  $Al_2O_3$ .

Функцию упрочняющей фазы в бериллии эффективно выполняет оксидная пленка  $BeO$ . Промышленные марки бериллия, полученные методами порошковой металлургии, содержат 0,7...3 % оксида  $BeO$  [3]. Композиты этого типа получают брикетированием

порошков, спеканием полуфабрикатов и горячей экструзией. С увеличением содержания оксида прочностные свойства композиционных материалов возрастают. Измельчение порошка способствует увеличению прочностных свойств материалов. Увеличению пластичности композитов типа Ве – ВеО способствует деформация материала, обеспечивающая дробление оксидных пленок. Одновременно с этим повышаются и прочностные свойства композиционных материалов (до 450...550 МПа).

Другим типом упрочнителей в композитах на основе бериллия являются частицы карбида Ве<sub>2</sub>С. По сравнению с чистым бериллием длительная прочность композитов типа Ве – Ве<sub>2</sub>С при 923 К в 3 раза выше [3]. Получают материалы такого типа путем смешивания бериллиевого порошка с сажей, термической обработки смеси и последующей горячей экструзии.

Хорошо известны композиционные материалы на основе никеля. Речь идет, в первую очередь, о таких материалах, как ТД-никель, DS-никель, ТД-нихром, ВДУ-1 [3]. Функцию упрочняющей фазы в этих материалах выполняют частицы оксида тория ThO<sub>2</sub>. Содержание этой фазы достигает 2 %. Оксид тория – токсичное соединение. С целью устранения этого недостатка в никель может быть введен оксид гафния HfO<sub>2</sub>. В композиционном материале типа ВДУ-2 содержание оксида гафния составляет 2 % (остальное – никель). Следует отметить, что жаропрочность композиционных материалов с добавками окиси тория выше, чем с частицами HfO<sub>2</sub> [3].

Дисперсно-упрочненные композиты на основе никеля предназначены для изготовления деталей, работающих при повышенных температурах. Эти материалы успешно применяются в авиастроении и космонавтике. Из композитов на основе никеля производят элементы камер сгорания, лопатки газовых турбин, стабилизаторы, работающие при температуре выше 1373 К.

Разработаны и другие типы дисперсно-упрочненных композиционных материалов. Особенности их применения связаны, главным образом, с повышенным уровнем механических свойств в широких диапазонах температур, сопротивлением коррозии, износу, особыми физическими свойствами. Поэтому дисперсно-упрочненные композиционные материалы успешно применяются в самолетостроении, химическом и атомном машиностроении, электротехнике, других отраслях промышленного производства.

#### **4.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ВОЛОКОН С МАТРИЦЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Достоверный анализ поведения композитов в различных условиях внешнего нагружения нельзя провести без учета явлений, имеющих место на границе раздела между матрицей и упрочняющими элементами. Эти явления должны учитываться при разработке новых материалов, при выборе технологических процессов производства композиционных материалов. Одним из основных условий, которые необходимо соблюдать при производстве высококачественных композиционных материалов, является недопущение растворения волокон в матрице и их термического разупрочнения.

Согласно теоретическим представлениям, идеальный композиционный материал часто воспринимают как совершенный механический континуум. Такие представления обоснованы лишь в том случае, если между составляющими композита реализуется идеальная механическая связь (без каких-либо дефектов). Второе условие, позволяющее говорить об идеальном композиционном материале, заключается в том, что у поверхностей раздела составляющих композита должен иметь место совершенный химический дисконтинуум. Это означает, что на границе раздела не должна происходить реактивная диффузия элементов, входящих в состав матрицы и волокна [21]. Причины, заключающиеся в необходимости обеспечения химического дисконтинуума, связаны с ухудшением свойств переходной зоны, в которой происходит химическое взаимодействие матрицы и волокна.

Переходная область, в пределах которой имеют место физико-химическое и механическое взаимодействия между матрицей и упрочнителем, играет огромную роль в формировании комплекса важнейших механических свойств получаемых композиционных материалов. Учитывая это, переходную зону можно рассматривать как особую составляющую композита, обладающую специфическими механическими свойствами, отличными от свойств матрицы и упрочнителя [21]. Отрицательное влияние взаимодействия волокна и матрицы может проявляться в развитии рекристаллизационных процессов в волокне и его разупрочнении, охрупчивании волокон, образовании хрупкого слоя между волокном и матрицей. С целью обеспечения высокого уровня механических свойств композиционного материала необходимо ограничить развитие отмеченных выше негативных процессов как во время получения композитов, так и в процессе эксплуатации изделий, изготовленных из них.

Влияние поверхности раздела на механические свойства особо проявляется при производстве и эксплуатации металлических композиционных материалов. Технологические режимы получения композитов с металлической матрицей, как правило, обеспечивают высокую диффузионную подвижность химических элементов на поверхности раздела разнородных составляющих. На этих поверхностях возможны процессы растворения, образования химических соединений. Таким образом, говоря о поверхности раздела в композиционных материалах, следует учитывать, что в действительности речь идет о зоне определенной толщины, в которой осуществляется взаимодействие матрицы и упрочнителя.

А. Меткалф дал следующее определение поверхности раздела, имеющейся в композиционном материале. Поверхность раздела – это область значительного изменения химического состава композита, обеспечивающая связь матрицы и упрочнителя, необходимую для передачи нагрузок между составляющими композиционного материала.

Важное требование, предъявляемое к поверхностям раздела в композиционных материалах, – их стабильность. Эта проблема особенно актуальна при разработке высокотемпературных композитов (материалов, работающих в условиях повышенной диффузионной активности химических элементов).

При получении композиционных материалов из составляющих, имеющих практическое значение, между ними возможны реакции, приводящие к формированию разнообразных типов поверхностей раздела. А. Меткалф предложил обобщенную классификацию поверхностей раздела, образующихся в металлических композиционных материалах. В соответствии с ней композиты могут быть разделены на три класса:

- 1) материалы, в которых волокно и матрица взаимно не растворимы и не реакционноспособны (не возникает новых химических соединений);
- 2) материалы, в которых волокно и матрица не реакционноспособны, но растворимы;
- 3) материалы, в которых волокно и матрица реакционноспособны.

В табл. 4.1 приведены примеры композиционных материалов, которые могут быть отнесены к первому, второму и третьему классам. Надежно отнести композиционный материал к тому или иному классу удастся не всегда. Например, растворимость фаз некоторых эвтектик может быть такой низкой, что их можно отнести и композитам первого класса. Имеются примеры и другого рода. Ряд

материалов может быть отнесен к композитам первого класса условно. В частности, можно выделить систему алюминий–бор. В соответствии с данными термодинамического анализа матрица и упрочнитель в этой системе должны взаимодействовать (если алюминий находится в расплавленном состоянии).

Снижение степени взаимодействия составляющих композита может быть обеспечено технологически. В зависимости от химического состава материала волокон и матрицы, температуры их плавления, взаимной растворимости, наличия защитных покрытий на поверхности волокон и других факторов выбирают тот или иной технологический процесс получения композиционного материала, характеризующийся, в первую очередь, температурой нагрева исходных компонентов и длительностью выдержки материала при выбранной температуре.

Таблица 4.1

**Примеры композиционных материалов с различными типами поверхностей раздела [21]**

Первый класс КМ	Второй класс КМ	Третий класс КМ
Медь–вольфрам; Медь– $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; Серебро– $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; Алюминий–бор (с покрытием BN); Магний–бор; Алюминий–бор <sup>2</sup> ; Алюминий–нержавеющая сталь <sup>2</sup> ; Алюминий–карбид кремния <sup>2</sup> .	Медь (хром) – вольфрам; Эвтектики; Ниобий – вольфрам; Никель – углерод; Никель – вольфрам <sup>1</sup> .	Медь (титан)–вольфрам; Алюминий–углерод (выше 970 К); Титан– $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; Титан–бор; Титан–карбид кремния; Алюминий–двоокись кремния.

<sup>1</sup> При низких температурах система становится реакционноспособной с образованием соединения  $\text{Ni}_4\text{W}$ .

<sup>2</sup> Система псевдопервого класса.

Оптимальная технология исключает взаимодействие волокна и матрицы. Так, например, для того чтобы прочно соединить между собой проволоку из нержавеющей стали с алюминиевой матрицей (сплав 2024), температура нагрева материала не должна превышать 740 К, а длительность выдержки – 30 мин. В этом случае реакции между волокном и матрицей не происходят. Если матрица и упрочнитель являются реакционноспособными, однако реальная технология изготовления композиционного материала исключает их взаимодействие, для характеристики материала используют термин

«композит псевдопервого класса» [21]. Эффект устранения взаимодействия между компонентами композиционного материала псевдопервого класса объясняют наличием окисных пленок между волокном и матрицей. Во многих случаях для предотвращения эффекта взаимодействия волокна и матрицы перед их объединением на поверхность волокна наносят специальное защитное покрытие.

Решение проблемы разупрочнения реакционных зон в композитах носит принципиальный характер. Обеспечение стабильности поверхности раздела является важнейшим физико-химическим требованием, позволяющим сохранить высокую эксплуатационную надежность композиционного материала. Основная трудность связана с явлением химического взаимодействия матрицы и волокна. Оказалось, что матрицы, наиболее перспективные с практической точки зрения, являются более реакционноспособными по сравнению с матричными материалами, на которых демонстрировались теории композитов. Осложняющим фактором является и то, что многие металлические композиционные материалы предназначены для эксплуатации при высоких температурах, т. е. в условиях повышенной активности химических элементов. Обеспечить стабильность поверхностей раздела между волокнами и матрицей при повышенных температурах гораздо сложнее, чем при комнатной. Существует три перспективных направления решения указанной проблемы [21]:

1. Разработка новых типов волокон, которые являются термодинамически стабильными по отношению к матрице (в условиях изготовления композитов и эксплуатации).
2. Применение защитных покрытий, снижающих степень взаимодействия между волокном и матрицей.
3. Уменьшение активности диффундирующих компонентов изменением характера легирования составляющих композита.

Толщина реакционной зоны, присутствующей вокруг волокна, имеет важное значение, поскольку при нагружении композита именно в этой зоне зарождаются первые трещины. Если толщина зоны мала (например, для системы Ti-B  $< 0,5$  мкм), то и длина возникающей в ней трещины также мала. Этой длины недостаточно для инициирования разрушения волокна. Поэтому характер разрушения волокна определяется дефектами его строения и не зависит от микротрещин, возникших в реакционной зоне. Если реакционная зона имеет среднюю толщину (0,5...1 мкм), тогда длина трещин, возникших в ней, может быть достаточной для создания высокого уровня механических напряжений, превышающих концентрацию напряжений, обусловленную действием дефектов самого

волокна. Волокно в этом случае разрушится при деформации, зависящей от толщины реакционной зоны. При большой толщине реакционной зоны (более 1...2 мкм) образование трещины в ней ведет к немедленному разрушению волокна [21]. А. Меткалф считает оптимизацию характеристик поверхности раздела (толщину, строение и др.) применительно к различным условиям нагружения (в условиях растяжения, сжатия, изгиба, усталостного нагружения и др.) одной из наиболее важных проблем, решаемых при разработке композиционных материалов.

Важнейшим фактором, определяющим строение и свойства поверхности раздела, является технология, использованная для получения композиционного материала. Речь идет, в первую очередь, о температуре нагрева волокна и матрицы в процессе их совмещения, о длительности действия повышенных температур, о степени деформации материала (при использовании технологических процессов, основанных на обработке материалов давлением). Необходимо учитывать и множество других технологических факторов, способных оказать влияние на строение и свойства поверхности раздела в композиционных материалах. От степени активности процессов, протекающих на границе взаимодействия волокна и матрицы, зависят не только выбор оптимальных технологических процессов изготовления композиционных материалов, но также и возможные температурные режимы эксплуатации изделий, полученных из этих композитов.

Главная функция поверхности раздела заключается в передаче нагрузки от матрицы к упрочнителю при различных способах нагружения композита в течение всего времени его существования. Особенности реализации этой функции в значительной степени зависят от типа связей в композиционных материалах. А. Меткалф выделяет следующие виды связей (рис. 4.57):

- 1) механическая связь;
- 2) связь путем смачивания и растворения;
- 3) окисная связь;
- 4) реакционная связь;
- 5) обменно-реакционная связь;
- 6) смешанная связь.

Механическая связь не предполагает наличия на границе раздела ни какого химического механизма (даже сил Ван-дер-Ваальса). Она сводится лишь к механическому сцеплению волокна и матрицы. В технологии изготовления композиционных материалов механическую связь обычно (обособленно) не относят к полезным механизмам взаимодействия, поскольку отсутствие химической



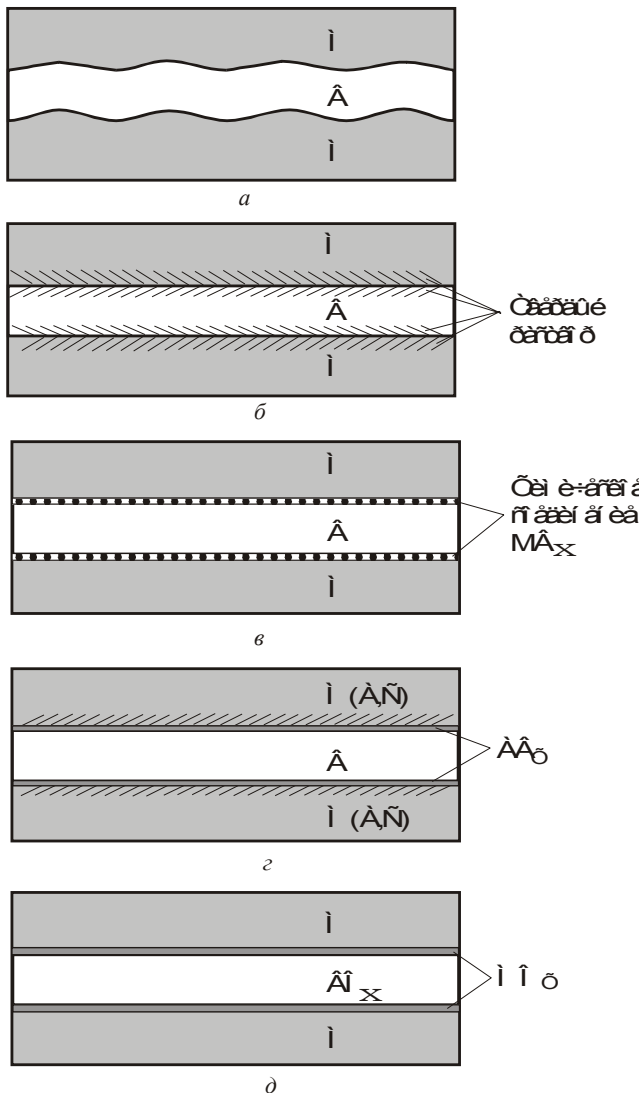


Рис. 4.57. Схемы основных типов связи в композитах. Матрица М содержит элементы А и С; волокно состоит из простого вещества, например из графита, обозначенного В, или сложного вещества, например оксида алюминия, обозначенного  $BO_x$ :

а – механическая связь; б – связь путем смачивания и растворения (например, Nb–W); в – реакционная связь (например, Ti–C); г – обменно-реакционная связь (например, Ti(Al)–B); д – окисная связь в системе псевдопервого класса (например, Al–B)

связи существенно снижает прочность композита при нагружении в поперечном направлении [21].

Связь между волокном и матрицей путем смачивания и растворения проявляется в тех композиционных материалах, в которых волокно (не являющееся окислом) смачивается или растворяется матричным материалом. Химических соединений между матрицей и волокном при этом не образуется.

Окисная связь возникает при смачивании и при образовании на поверхности раздела промежуточных соединений. Этот термин введен для объединения в одну группу композитов, в которых упрочнителем являются волокна окислов. К окисному типу связей относят также связь между окисными пленками матрицы и волокна.

Реакционная связь проявляется в композитах, в которых волокно не является окислом. Этот тип связи реализуется при образовании на поверхности раздела между волокном и матрицей новых химических соединений. Примером такого химического соединения может служить диборид титана, образующийся на границе между бором и титаном.

Обменно-реакционная связь представляет собой один из типов реакционной связи, когда при объединении матричного материала с волокном могут происходить несколько типов химических реакций.

Смешанная связь предполагает одновременное проявление нескольких типов связей. Считается, что этот случай имеет наиболее важное практическое значение.

В максимальной степени требования, связанные с обеспечением механического континуума и химического дисконтинуума, реализуются лишь в тех композиционных материалах, составляющие которых являются термодинамически совместимыми материалами [21]. Компоненты композиционного материала считаются термодинамически совместимыми в том случае, если при неограниченном времени их контакта отсутствует химическое и диффузионное взаимодействие [1]. Яркими представителями материалов такого типа являются эвтектики, полученные методом направленной кристаллизации. Между составляющими этих композиционных материалов наблюдается совершенная механическая связь (характерна механическая непрерывность в направлении, перпендикулярном поверхности раздела). Реактивная диффузия химических элементов, входящих в обе фазы эвтектики, как правило, не проявляется в широком диапазоне температур. Несмотря на отмеченные достоинства композиционных материалов, полученных методом направленной кристаллизации эвтектик, имеются большие проблемы, связанные с их практическим применением. Одна из них заключа-

ется в том, что выбор эвтектик, способных обеспечить требуемый уровень механических свойств, весьма ограничен. Кроме того, объемная доля упрочнителя в материалах такого типа может изменяться в очень узком диапазоне (эвтектика существует при определенной концентрации химических элементов, входящих в ее состав).

Реальных систем с термодинамической совместимостью компонентов мало. К ним относят композиции типа Cu–W, Cu–Mo, Cu–Nb, Cu–Ta, Ag–W, Mg–Ti, Mg–В и др. В большинстве реальных композиций матричный материал в той или иной степени взаимодействует с волокном, вызывая определенные изменения химического состава и механических свойств волокна.

Выполнение требования обеспечения химического дисконтинуума на границе раздела матрицы и волокна возможно не только при получении направленно кристаллизованных эвтектик, но также и при выборе сочетания матрицы и волокна, в котором упрочнитель практически не растворяется в матрице. Примером системы такого типа является пара медь–вольфрамовая проволока. Недостаток такого подхода заключается в том, что возможности реального выбора систем в соответствии с описанным принципом, как и в случае использования эвтектик, весьма ограничены. Ограниченную растворимость элементов обеспечивает достаточно малое количество систем. В этой связи основное технологическое решение, позволяющее получать композиционные материалы из термодинамически несовместимых компонентов, заключается в нанесении барьерных слоев, предотвращающих активную диффузию химических элементов на границе раздела матрицы и волокна.

А. Меткалф отмечает, что у большинства современных композиционных материалов химического дисконтинуума на поверхности раздела матрицы и волокна не наблюдается. При переходе через границу химический состав материала меняется непрерывным образом. Этому способствуют не только особенности технологии получения композитов, но и диффузионные процессы, имеющие место при эксплуатации материалов (особенно при повышенных температурах).

В зависимости от агрегатного состояния матрицы технологические процессы получения металлических композиционных материалов делятся на твердо-, жидко- и газофазные. Наиболее активное взаимодействие между матричным материалом и волокном проявляется при реализации жидкофазных способов получения композитов. Процессы такого типа во многих случаях сопровождаются активным развитием диффузии, растворением волокна, его разупрочнением в результате развития рекристаллизации. Наиболее

простые решения могли бы быть связаны со снижением температуры нагрева жидкой фазы и времени ее взаимодействия с волокном. Однако возможность снижения температуры нагрева ограничена температурой плавления матричного материала, необходимостью его перегрева для обеспечения хорошей жидкотекучести. Время взаимодействия расплава с упрочняющим волокном в значительной степени зависит от технологии их совмещения. В некоторых случаях, например, при использовании технологии вакуумной пропитки армирующих каркасов, малое время взаимодействия компонентов не позволяет существенно снизить механические свойства упрочняющих элементов композиционного материала.

Снижение степени взаимодействия волокна и матрицы в процессе эксплуатации композиционных материалов достигается подбором химического состава исходных компонентов, нанесением на волокна защитных покрытий. Для получения покрытий выбирают такие материалы, которые при температуре эксплуатации не растворяются в волокне и матрице. Степень стабильности барьерных покрытий должна обеспечить эффективную работу композиционного материала в течение расчетного времени эксплуатации изделий. Для защиты от растворения волокон вольфрама и молибдена в металлических композиционных материалах типа Ni–W и Ni–Mo рекомендуется использовать покрытия из нитрида титана, оксидов алюминия, тория, карбида гафния [1]. В металлических композитах на основе титана в качестве барьерных покрытий на упрочняющих волокнах могут быть использованы карбиды кремния, циркония, титана. Температура эксплуатации таких материалов достигает 800 °С.

Анализ строения и механических свойств композиционных материалов будет неполным, если не учитывать остаточные напряжения, возникающие на поверхностях раздела. Считается, что остаточные напряжения на границах раздела – неотъемлемая характеристика композитов. Отсутствие их является скорее исключением, чем правилом [21].

Имеется, по крайней мере, две причины, способствующие возникновению на границах раздела остаточных напряжений. Одна из них связана с тем, что температуры изготовления и эксплуатации композиционных материалов не совпадают. Термические остаточные напряжения возникают при охлаждении композита, сформированного при высокой температуре. Конкретная причина их появления заключается в различии коэффициентов термического расширения составляющих композита. Установлено, что остаточные напряжения термического происхождения неизменно снижают прочность композиционных материалов в условиях их растяжения.

Вторая причина возникновения на границах раздела остаточных напряжений связана с различием значений пределов текучести составляющих композита. Остаточные напряжения механического происхождения возникают в том случае, если в процессе эксплуатации композиционный материал деформируется до таких значений, когда начинается пластическое течение одной из его составляющих (вторая остается в упругом состоянии).

Кроме того, причина возникновения остаточных напряжений может быть связана с реализацией фазовых превращений, сопровождаемых объемными изменениями материала. В этом случае остаточные напряжения проявляются потому, что объемным изменениям одной структурной составляющей композита препятствует другая составляющая, в которой не наблюдается принципиальных изменений объема.

#### **4.7. ПРИМЕРЫ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В качестве матричных материалов в металлических композиционных материалах могут быть использованы различные металлы и сплавы [3]. В данном разделе приводятся примеры композитов с алюминиевой, магниевой, титановой и никелевой матрицами.

Одними из наиболее перспективных композиционных материалов являются материалы на основе алюминия. Функцию матрицы в них могут выполнять сплавы типа АМг2, АМг3, Д16 и др. В качестве армирующих элементов возможно применение стальных волокон, волокон бора, борсика, карбида кремния, вольфрама, молибдена, бериллия, титана, оксида кремния, углерода и др. [3]. Получение металлических композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов возможно жидкофазными, твердофазными методами и по технологии осаждения. Из твердофазных методов применение нашли горячее прессование, прокатка, экструзия, сварка взрывом.

При использовании метода горячего прессования используется матричный материал в виде фольги, ленты, листа, порошка. Технология горячего прессования применяется при получении композитов типа Al-B, Al – борсик, Al-Be, Al – сталь, Al-SiC, Al-SiO<sub>2</sub>. Данным способом получают многослойные ленты, листы, профили. Горячее прессование может быть реализовано на воздухе, в вакууме или контролируемой атмосфере.

Композиционный материал типа Al-B может быть получен по технологии горячего прессования. Давление прессования составляет ~ 500 МПа, температура - 753 К, время выдержки – 1 ч.

Метод прокатки используется для получения композиционных материалов, армированных волокнами, например борными или стальными [3]. Изделия имеют форму ленты, листов, балок. В качестве матричного материала используют фольгу, ленты, лист, порошок. Температура прокатки составляет  $\sim 0,7 \dots 0,9$  от температуры плавления матричного сплава.

Метод экструзии при производстве композитов на основе алюминиевых сплавов может быть реализован как в горячем, так и в холодном состояниях. Этим методом получают изделия в виде прутков или труб, армированных волокнами. В основном при использовании метода экструзии применяют металлические волокна. Матричный материал имеет форму прутков, труб или порошка.

Сварка взрывом позволяет получать крупные изделия. Этим методом производят композиты типа алюминий–стальные волокна. Получаемые изделия имеют форму листов, труб.

Заготовки могут быть получены методом плазменного напыления алюминиевого сплава на волокна упрочняющей фазы, например на волокна бора. Полученная таким образом заготовка в дальнейшем подлежит уплотнению методами обработки давлением [3].

Жидкофазными методами, в частности методами пропитки, получают металлические композиционные материалы на основе алюминия, например материалы типа Al–B, Al–C, Al–SiC. Пропитку осуществляют при  $\sim 973$  К в вакууме или контролируемой атмосфере [3].

Из широкой гаммы композиционных материалов на основе алюминия одной из наиболее перспективных считается композиция алюминий–сталь. Достоинства этих материалов заключаются в высоком уровне прочностных свойств и относительно низкой стоимости. При их изготовлении в результате физико-химического взаимодействия компонентов возможно образование твердых растворов, интерметаллических соединений, эвтектики. Интерметаллические соединения типа  $Fe_2Al_5$  и  $FeAl_3$  являются хрупкими фазами. Их образование на границе между волокном и матрицей приводит к ухудшению механических свойств композиционных материалов. При получении композитов методами горячего прессования, пропитки, прокатки, заливки толщина реакционной зоны, занятой интерметаллическими соединениями, составляет  $\sim 0,5 \dots 10$  мкм. В процессе сварки взрывом соединений такого типа не обнаружено.

Композиционные материалы типа алюминий–стальная проволока получают методами диффузионной сварки, горячего прессования, пропитки, заливки, сварки взрывом, динамическим горячим прессованием, прокаткой. Полученные данными методами компо-

зиты с целью повышения механических свойств могут быть подвергнуты термической обработке – закалке и старению. Эта операция используется в тех случаях, когда в качестве матричных материалов применяют термически упрочняемые алюминиевые сплавы.

Высоким уровнем механических свойств характеризуются также композиционные материалы на основе магния. Они предназначены для использования в самолетостроении, космонавтике, ядерной энергетике [3].

В качестве армирующих элементов в композитах на основе магния могут быть использованы волокна бора, карбида кремния, оксида алюминия, титана, стальная проволока. Получают эти композиты методами диффузионной сварки, непрерывного литья, пропитки.

Одной из наиболее перспективных композиций на основе магния считается материал типа Mg–B. Этот материал по удельной прочности превосходит большинство металлических композитов, эксплуатируемых при 293...773 К [3]. Объединение магния с борными волокнами может быть осуществлено по технологии пропитки армирующего каркаса. Эффективная реализация данной технологии возможна потому, что магний является металлом, стабильным по отношению к бору в жидком состоянии. Для получения композитов Mg–B используют методы пропитки под давлением, в вакууме, а также под действием центробежных сил. Температура пропитки составляет 973...1023 К. Контакт жидкого магния с волокнами бора осуществляется в течение ~ 5 мин. Композиты Mg–B могут быть получены по технологии непрерывного литья, диффузионной сварки, плазменного напыления магния, по технологии порошковой металлургии (из порошков магния и бора).

Композиты типа магний–карбид кремния получают по технологии пропитки, непрерывного литья, горячего прессования. Объемная доля волокон достигает 90 % [3]. Материал обладает комплексом высоких механических свойств. Композит, содержащий 30 % волокон магния (объемн.), имеет предел текучести  $\sigma_{0,2} = 420$  МПа [3]. Высоким уровнем механических свойств обладают композиционные материалы типа Mg–сталь, Mg–Ti.

Для изготовления некоторых типов изделий, главным образом в самолетостроении, могут быть использованы металлические композиционные материалы на основе титана. Примерами таких деталей могут служить лопатки вентилятора и створки регулируемого сопла газотурбинного двигателя [3]. При изготовлении композитов такого типа в качестве матричного материала используют, главным образом, сплавы титана с алюминием и ванадием (90 % Ti,

6 % Al, 4 % V). Основными типами армирующих элементов являются волокна бора, борсика, карбида кремния, бериллия. Способы изготовления изделий из композитов на основе титана и его сплавов основаны преимущественно на обработке материалов давлением.

В общем случае свойства композитов на основе титана выше, чем композиционных материалов на основе алюминия [3]. МКМ на основе титана имеют более высокую температуру эксплуатации, они обладают высокой стойкостью к разрушению в условиях динамического нагружения.

При повышенных температурах титан склонен к взаимодействию с бором, борсиком, карбидом кремния, оксидом алюминия. Решение проблемы совместимости матрицы и волокна композиционных материалах на основе титана основано, главным образом, на использовании высокоскоростных методов получения заготовок и изделий [3]. Эти методы обеспечивают возможность получения минимальной толщины реакционной зоны на границе между волокном и матрицей. Другие решения проблемы совместимости волокон и матрицы при получении композитов данного типа связаны с нанесением на волокна защитных покрытий и подбором титаносодержащих матриц с низкой реакционной способностью (по отношению к требуемым волокнам). Так, например, с волокнами бора совместим титановый сплав, содержащий 13 % V, 10 % Mo, 5 % Zr, 2,5 % Al [3]. При использовании волокон бора в качестве защитных покрытий могут быть использованы покрытия из карбида бора и карбида кремния.

Армирование титановых сплавов бором применяется, главным образом, для повышения их жесткости [3]. Максимальная температура эксплуатации композитов типа Ti-B составляет 813 К. Технология объединения борных волокон с титановыми матрицами предусматривает нагрев материалов до 1073...1273 К. При таких высоких температурах бор активно взаимодействует с матричным материалом и поэтому существенно разупрочняется. Во избежание этого на борные волокна наносят защитные покрытия либо используют высокоскоростные методы изготовления композитов. Критическая толщина реакционной зоны между волокном и матрицей в композитах на основе титана составляет 0,05...0,5 мкм.

При получении композитов типа Ti-B (в виде лент) используют технологии плазменного напыления и высокоскоростной сварки [3]. На следующем этапе из композиционной ленты по технологии сварки, прокатки,ковки или прессования получают различные детали.



При получении металлических композитов на основе титана в качестве упрочняющих элементов часто используют волокна борсика (борное волокно с покрытием из карбида кремния). Технология получения композитов данного типа заключается в горячем прессовании слоев титанового сплава и волокон борсика [3]. Температура нагрева материала составляет 1033...1173 К, давление прессования – 84...170 МПа, время выдержки под давлением – 15...30 мин.

Функцию упрочнителя в композиционных материалах на основе титана и его сплавов могут выполнять бериллиевые волокна или порошок бериллия. Композиты типа Ti–Be получают методом горячего прессования в вакууме. Температура прессования составляет 863...1023 К, давление – 42...560 МПа, время изотермической выдержки – 0,5...10 ч [3]. Композиты с непрерывными и дискретными волокнами могут быть получены по технологии экструзии. Максимальная температура эксплуатации изделий из композиционных материалов типа Ti–Be составляет 588 К.

В качестве упрочняющих элементов в металлических композиционных материалах на основе титана и его сплавов могут быть использованы также волокна молибдена, оксида алюминия, графита и других материалов.

Перспективными металлическими композиционными материалами считаются композиты на основе никеля. Одна из основных задач, решаемых при разработке таких композитов, заключается в повышении жаропрочности существующих никелевых сплавов. При использовании традиционных подходов к проблеме изменения состава и структуры никелевых сплавов температура их эксплуатации достигает 1223...1323 К [3]. Повышение жаропрочности этих материалов возможно за счет армирования волокнами тугоплавких металлов, керамическими волокнами. Композиты на основе никеля предназначены для изготовления сопловых лопаток газотурбинных двигателей, камер сгорания, тепловых экранов, жаровых труб, других тяжело нагруженных деталей, работающих при повышенных температурах.

В качестве волокон, упрочняющих никелевую матрицу, может быть использована вольфрамовая проволока. Система Ni–W является структурно нестабильной. При 1273...1573 вольфрам активно растворяется в никеле. Поэтому при производстве композитов данного типа используют никелевые матрицы, предельно насыщенные вольфрамом [3]. Образованию реакционной зоны на границе сопряжения волокна и матрицы способствует также введение в никель-вольфрамовую матрицу хрома (до предельного насыщения

твердого раствора). В случае предельного насыщения никелевой матрицы хромом и вольфрамом растворения вольфрамовой проволоки в матричном материале не происходит. Для защиты вольфрамового волокна от взаимодействия с матрицей из никелевых сплавов используют также барьерные покрытия. Таким покрытием является, например, покрытие из нитрида титана.

Для получения композиционных материалов с матрицей из никелевых сплавов используют различные технологические процессы, основанные на обработке давлением. В частности, используют технологии горячего динамического прессования, диффузионной сварки, сварки взрывом, прокатки. Для получения композитов могут быть использованы заготовки типа «сэндвич» (чередующиеся листы матричного материала и слои армирующих вольфрамовых волокон) [3]. Технологии получения композитов типа Ni–W предусматривают использование вакуума или защитных сред. Прокатка композитов осуществляется на вакуумных прокатных станах или с использованием вакуумированных пакетов-заготовок. При нагревании вольфрама на воздухе он интенсивно окисляется, поэтому качественное соединение проволоки с матрицей обеспечено не может.

Для изготовления композитов типа сплав никеля–вольфрам могут быть использованы литейные жаропрочные никельсодержащие сплавы. Производство таких материалов основано на использовании жидкофазных технологий. Заготовки и изделия могут быть получены литьем и вакуумным всасыванием. Возможно применение методов порошковой металлургии (шликерного литья с горячим прессованием и др.) [3].

Система Ni–Mo, как и Ni–W, не является структурно стабильной. На границе раздела матрицы и волокон образуется твердый раствор молибдена в никеле, формируется химическое соединение NiMo. В качестве барьерных покрытий, защищающих волокна молибдена от воздействия никелевой матрицы, используют нитрид титана. Для получения композитов Ni–Mo используют те же методы, что и при изготовлении композитов Ni–W.

В качестве элементов, упрочняющих никелевую матрицу, могут быть использованы также волокна  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ , SiC, углеродные волокна, волокна из других материалов. Свойства получаемых композиционных материалов приведены в справочной литературе, например в [3].



## **5. ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ**

Важнейшая особенность производства современных композиционных материалов заключается в том, что, как правило, композит и технология его изготовления разрабатываются для использования в конкретной конструкции. В этой связи разработка конструкции детали, композиционного материала для ее изготовления и технологического процесса получения требуемой конструкторской документацией формы представляют собой три стороны единой проблемы. Учитывая отмеченное, вопросы разработки новых композиционных материалов и их технологической переработки следует рассматривать совместно и учитывать при этом назначение детали, ее форму, габариты, условия эксплуатации. В данном разделе одновременно рассматриваются материаловедческие, технологические и конструкторские аспекты проблем, связанных с изготовлением деталей из композиционных материалов.

В общем случае технология производства изделий из полимерных композиционных материалов включает в себя следующие операции [5]:

- подготовка армирующего наполнителя;
- приготовление полимерного связующего;
- совмещение матрицы с арматурой;
- формообразование детали;
- отверждение связующего;
- механическая доводка детали (при необходимости);
- контроль качества детали.

В данном разделе основное внимание будет уделяться процессам подготовки армирующего наполнителя, совмещения матрицы с арматурой и формообразования деталей из полимерных композиционных материалов.

В настоящее время разработано большое количество методов изготовления деталей из полимерных композиционных материалов. Отметим основные методы формообразования [5]: 1) контактное формование; 2) формование с эластичной диафрагмой; 3) фор-

мование давлением; 4) прессование в формах; 5) намотка; 6) пултрузия; 7) предварительное формование заготовок и матов.

Т а б л и ц а 5.1

**Основные технологические процессы формообразования изделий из ПКМ [5]**

Технологический процесс	Рекомендуемые компоненты	
	тип армирующего наполнителя	тип связующего
<b>Контактное формование:</b> – ручная выкладка  – напыление – автоматизированная выкладка	Короткие волокна, ленты, ткани  Маты Ленты	Полиэфирные, Эпоксидные, Фенольные, Фурановые, Термопластичные
<b>Формование с эластичной диафрагмой:</b> – вакуумное – вакуумно-автоклавное – вакуумно-пресс-камерное	Ткани, маты, ленты	Эпоксидные, Полиэфирные, Полиамидные, Фенольные, Полисульфон
<b>Формообразование давлением:</b> – пропитка под давлением	Ткани, маты, ленты, короткие волокна	Полиэфирные, Эпоксидные, Фенольные, Фурановые, Полиамидные
<b>Прессование в формах:</b> – прямое – литьевое – термокомпрессионное	Ткани, маты, ленты  Короткие волокна  Ткани, маты, ленты	Полиэфирные, Эпоксидные, Фенольные, Силиконовые, Термопластичные
<b>Намотка:</b> – «мокрая»  – «сухая»	Нити, ленты, жгуты, ткани, пленки  Препреги, нити, ленты, жгуты, ткани	Эпоксидные, Полиэфирные, Фенольные, Полиимидные, Термопластичные
<b>Пултрузия</b>	Нити, жгуты, тканые ленты, тканеплетеные заготовки	Термореактивные, Термопластичные
<b>Предварительное формование заготовок и матов</b>	Короткие рубленые волокна, нитевидные кристаллы	Водные растворы этилового спирта, четыреххлористый углерод, полимерные связующие

Особенности реализации этих технологических процессов, их разновидности отражены в табл. 5.1. Применимость перечисленных методов определяется множеством факторов, в том числе формой и габаритами изделий, их количеством, производительностью технологического процесса, физическими параметрами процесса, требованиями, предъявляемыми к изделию (прочность, точность и др.). Особенности реализации различных методов формообразования изделий из полимерных композиционных материалов рассмотрены в следующих разделах.

## **5.1. КОНТАКТНОЕ ФОРМОВАНИЕ ПОЛИМЕРОВ**

При производстве полимерных композиционных материалов очень широко используется контактное формование. Этим способом изготавливают корпуса лодок, яхт, детали автомобилей, мебель, панели и другие конструкции [5]. Процесс формования заключается в послойной укладке упрочняющих элементов на подготовленную форму, их пропитке полимерным связующим и последующем уплотнении с целью удаления пузырьков воздуха. Пропитка волокнистого наполнителя может осуществляться не только после его укладки в форму, но и на предшествующей стадии. Существует три разновидности метода контактного формования: ручная выкладка, автоматизированная выкладка и напыление.

### **5.1.1. РУЧНАЯ ВЫКЛАДКА**

Основной вид технологической оснастки, используемой при реализации метода, – форма. Различают позитивные и негативные формы. Позитивная форма позволяет получать гладкую и точную внутреннюю поверхность изделия. При использовании негативной формы качественной является наружная поверхность изделия. Устройство полимерного композита, получаемого с использованием негативной формы поясняет рис. 5.1 [5]. Пример получения ПКМ методом ручной выкладки на позитивной форме показан на рис. 5.2 [5].

Основными элементами схемы, приведенной на рис. 5.2, являются форма, разделительная пленка, наружный смоляной слой (гелькоат), три слоя стекловолоконного наполнителя, ручной валик и смола в смеси с катализатором. Поверхность формы должна отвечать требованиям геометрии, жесткости, адгезии. Для изготовления формы могут быть использованы такие материалы, как дерево, фанера, металл, бетон, гипс, стеклопластик и др.

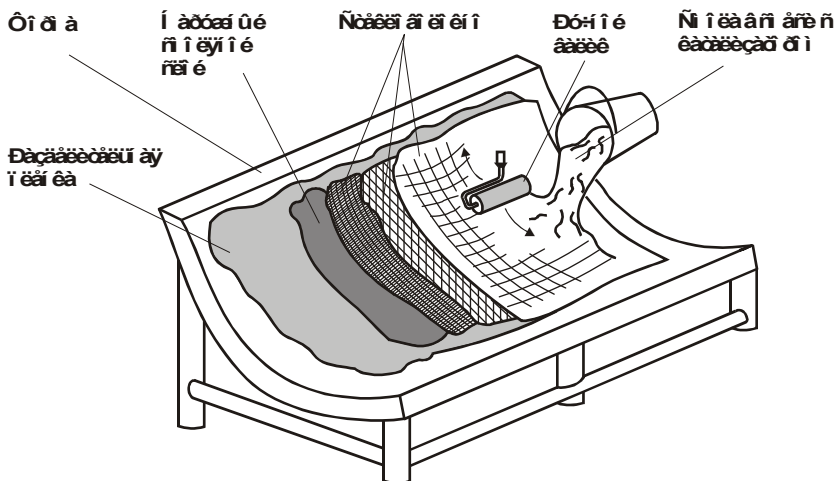


Рис. 5.1. Элементы конструкции формы и изделия при формировании ручной выкладкой

Для того чтобы связующее не прилипало к поверхности формы, используют специальные разделительные пленки. Однако если связующее попадет на поверхность формы, изделие прилипнет к форме. Прилипание приведет к образованию дефектов на поверхности

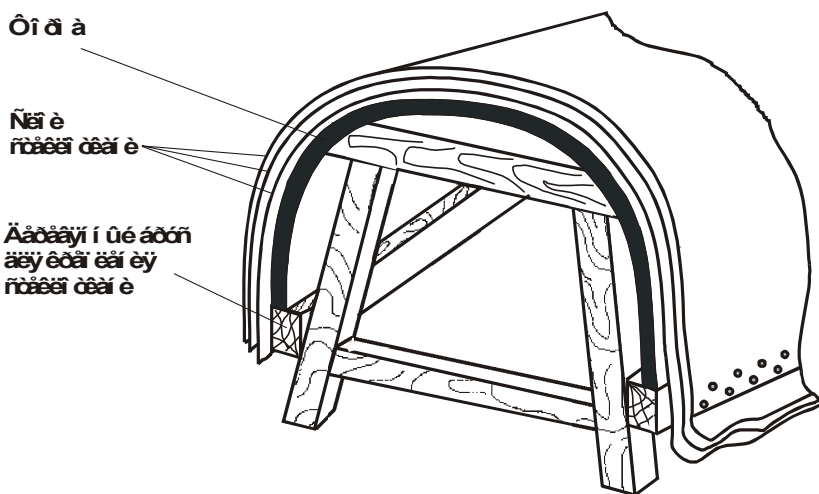


Рис. 5.2. Схема укладки волокнистого материала на позитивной форме

изделия и порче самой формы. Особенно это касается форм, выполненных из пористых материалов – дерева, гипса и др. Поэтому поверхность формы обрабатывается парафином, воском или другим материалом, препятствующим схватыванию формы с формируемым изделием. Форму можно использовать многократно. Для того чтобы качество поверхности изделий не ухудшалось, после каждого цикла формования форму рекомендуется полировать чистой салфеткой [5]. После получения нескольких изделий на поверхность формы необходимо нанести новый слой парафина.

На разделительную пленку кистью, малярным валиком или из пульверизатора наносят наружный смоляной слой – гелькоат. Желеобразный гелькоат образует наружный слой изделия, поэтому он должен обеспечивать требуемые декоративные свойства и выполнять соответствующие защитные функции без последующей отделки поверхности.

Следующий этап – укладка и пропитка слоев армирующего материала. На анализируемой схеме эту функцию выполняют три слоя стеклоткани. Листы армирующего материала вырезают из рулонов, а затем, при необходимости, с помощью ножей, ножниц или специальных устройств обрезают по шаблону. В качестве уплотняющего наполнителя при реализации обсуждаемого метода

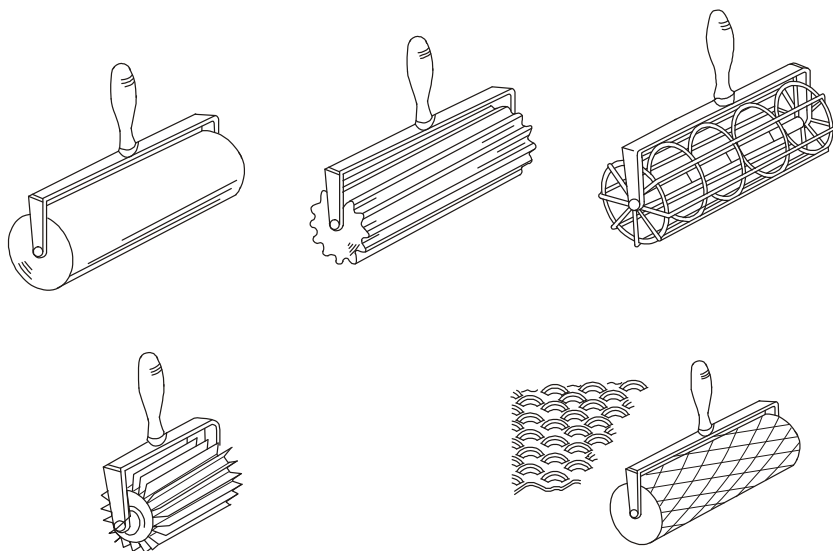


Рис. 5.3. Валики, применяемые для уплотнения полимерного композиционного материала при формовании изделия по методу ручной выкладки

могут служить маты и тканый ровинг. Количество слоев матов и ровингов, последовательность их расположения определяются требуемой толщиной изделия и свойствами, которыми оно должно обладать. Объемная доля волокна в полученном таким образом композите составляет 35...50 % [5].

Для пропитки в необходимом соотношении смешивают смолу и катализатор. Пропитку армирующих слоев выполняют либо в форме либо вне ее. Между слоями не должно быть пузырьков воздуха, расслоений. Для того чтобы избежать появления дефектов подобного рода, материал уплотняют с помощью щеток, резиновых и зубчатых валиков. Форма валиков, используемых для уплотнения материала, показана на рис. 5.3. В США из-за простоты инструмента этот способ уплотнения называют методом ведра и щетки (basket and brush) [5].

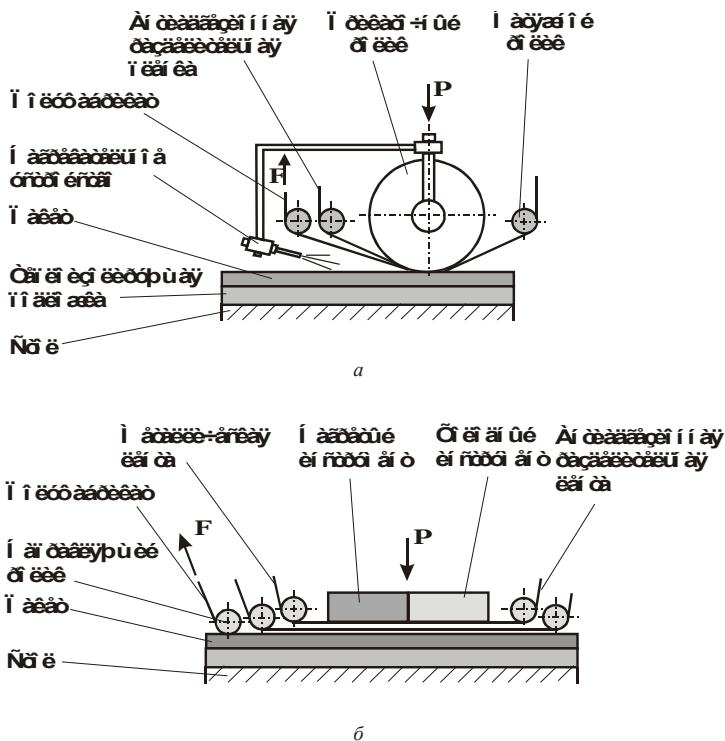


Рис. 5.4. Схема выкладочных устройств для реализации роликовой (а) и прессовой (б) выкладок изделий из полимерных композитов с термопластичной матрицей:

$P$  – сила прижатия инструмента,  $F$  – сила натяжения полуфабриката



В том случае если в качестве связующего используют терморезактивные смолы, после завершения операции выкладки наполнителя изделие необходимо выдержать в форме до завершения процедуры отверждения матрицы. Использование термопластичных полимерных материалов имеет некоторые особенности, в частности каждый последующий слой может последовательно приформовываться к предыдущему с получением монолитной конструкции. Операции приформовывания выполняются до достижения изделием необходимой толщины. При комнатной температуре полимеры не будут липкими, поэтому для приваривания каждого слоя к предыдущему требуется использовать инструмент, нагретый до температуры, превышающей температуру плавления связующего [5]. Схемы устройств, используемых для роликовой и прессовой выкладок полуфабрикатов на основе термопластичных полимеров, приведены на рис. 5.4.

### 5.1.2. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ВЫКЛАДКА

Технология автоматизированной выкладки основана на использовании выкладочных станков, способных осуществлять движения по сложным траекториям. Эта технология реализуется при получении

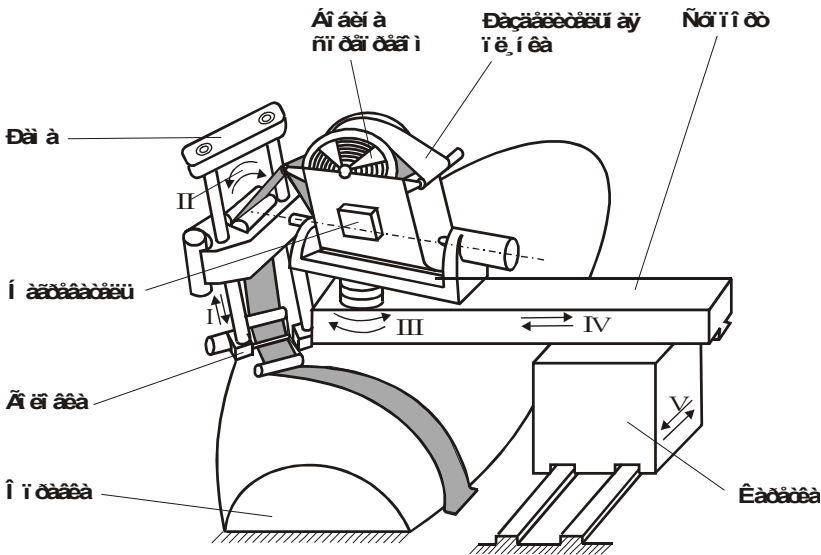


Рис. 5.5. Схема автоматизированной выкладки препрегом оболочки двойной кривизны [5]:

I–V – степени подвижности станка

открытых оболочек сложной формы. Управление станками осуществляется по программам, разработанным для каждой конкретной детали. Материалом при изготовлении изделий по технологии автоматизированной выкладки служит препрег. После выкладки слоя препрега с целью устранения воздушных пузырей производят его уплотнение путем прикатки роликми. Схема устройства для автоматизированной выкладки препрегом оболочки двойной кривизны показана на рис. 5.5 [5].

При выкладке препрега на поверхности оправки сложной формы возможно образование складок. Для уменьшения опасности складкообразования используют препрег малой ширины или тканый препрег полотняного переплетения [5]. При некоторой ширине препрега его удастся укладывать без образования дефектов на пологие поверхности двойной кривизны. Прогрев препрега повышает его способность к деформации в плоскости армирования.

### 5.1.3. НАПЫЛЕНИЕ

Технология получения полимерных композиционных материалов по методу напыления компонентов отражена на схеме, приведенной на рис. 5.6 [24]. В форму одновременно подаются измельченное волокно, полученное из ровинга с помощью рубильного устройства, и смола. На схеме изображены две распылительные головки. Через одну подается смола, смешанная с катализатором, через другую – смола в смеси с ускорителем. Полимерная компо-

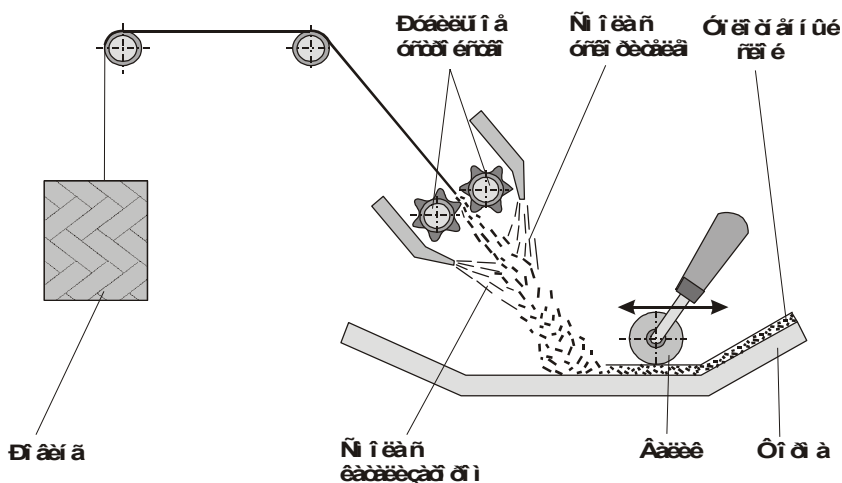


Рис. 5.6. Безвоздушная система напыления с двумя емкостями

зияция покрывает измельченное волокно и в виде потока распыляется по форме. Для удаления пузырьков воздуха и выравнивания поверхности образованный слой вручную прикатывается ролик. Фактически метод напыления можно считать вариантом технологии ручной выкладки изделий.

При производстве изделий большими партиями для выполнения операций напыления экономически выгодно использовать роботов. Применение роботов отвечает требованиям безопасности труда. На рис. 5.7 и 5.8 [5, 24] приведены два типа роботизированных установок для напыления полимерных композиционных материалов.

В состав оборудования, используемого для реализации технологии напыления композитов, входят [24]: насосы для смолы и катализатора; нагнетательные баки для катализатора; нагнетательные баки для растворителей, применяемых при промывке; рубильное устройство для измельчения армирующего материала; регуляторы подачи материалов, воздуха; измерительные приборы; шланги для подачи используемых материалов; распылительные устройства.

Важным элементом технологического оборудования, используемого для напыления материалов, является распылительное устройство. Возможно применение различных вариантов распылительных устройств [24]. Наиболее типичные разновидности распылителей (рис. 5.9):

- распылитель с наружным смешением материалов;
- распылитель с безвоздушным наружным смешением материалов;

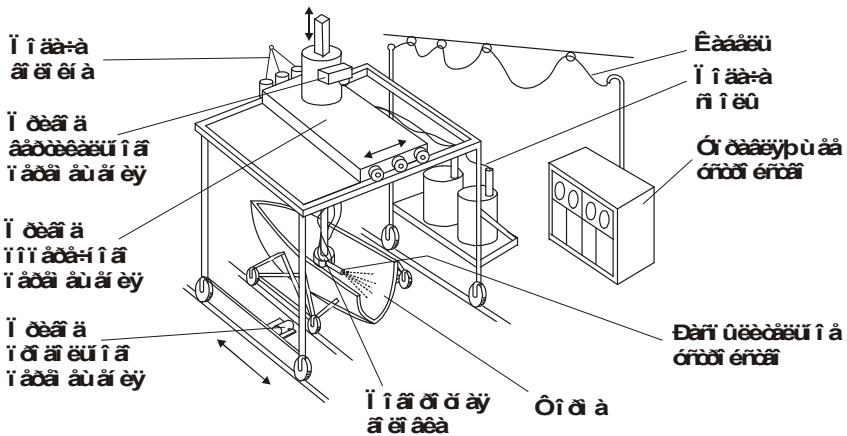


Рис. 5.7. Трехкоординатный роботизированный автомат для формования изделий из полимерных композиционных материалов методом напыления

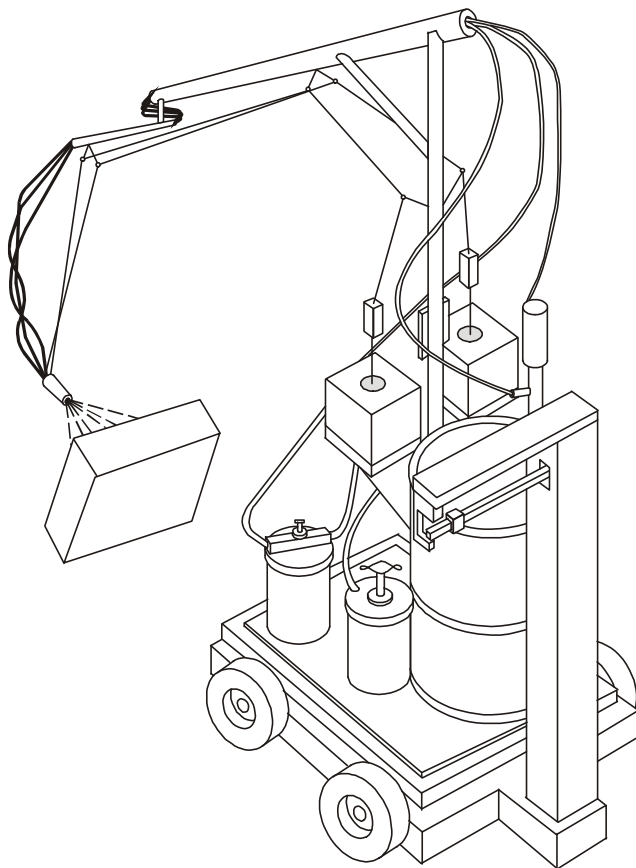


Рис. 5.8. Установка для получения полимерных композиционных материалов методом напыления ровинга и смолы [24]

- распылитель с воздушным внутренним смешением;
- распылитель с безвоздушным внутренним смешением;
- система с двумя баками.

В распылительном устройстве с наружным смешением материалов по углам квадрата расположены четыре форсунки (рис. 5.9, а). Через две форсунки подается смола, через остальные – катализатор, распыляемый воздухом. Через отверстие в центральной зоне вдувается рубленое волокно. Волокно обволакивается смолой и катализатором и осаждается на поверхности формы.

Распылители, работающие по принципу безвоздушного наружного смешения, схематически показаны на рис. 5.9, б, в. Поток

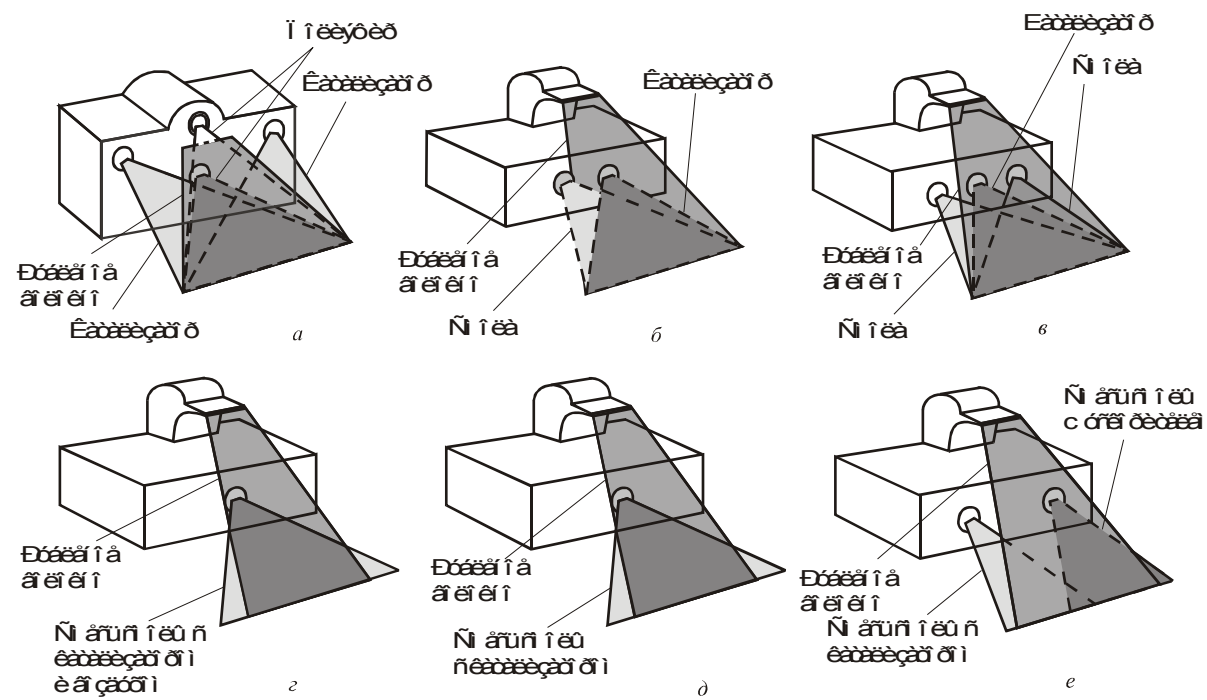


Рис. 5.9. Схемы распылителей, используемых при изготовлении деталей из полимерных композиционных материалов методом напыления [24]:

*a* – с наружным смешением и воздушным распылением материалов; *б, в* – с наружным безвоздушным смешением материалов; *г* – с внутренним смешением и воздушным распылением материалов; *д* – с наружным смешением и безвоздушным распылением материалов; *е* – с наружным смешением двух потоков и безвоздушным распылением материалов

катализатора подается через форсунки под давлением, достаточным для распыления без помощи воздуха.

Часто в качестве распылителей используют устройства с воздушным внутренним смешением. Перед впрыском смолы в форму происходит смешение смолы, катализатора и воздуха (рис. 5.9, з). Измельченное волокно вдувается в верхнюю часть смесительного вентилятора, покрывается связующим и наносится на поверхность формы.

При использовании распылителей с безвоздушным внутренним смешением катализатор и смола, находящиеся под давлением, смешиваются в смесительной камере и под высоким давлением ( $\geq 5,5$  МПа) подаются в сопло [24]. Этого давления достаточно для распыления материала без использования дополнительного воздушного потока.

Для получения ПКМ методом напыления применяют также безвоздушные системы с двумя баками. Эти системы имеют два сопла, через которые подаются смесь смолы с катализатором и смесь смолы с ускорителем. На расстоянии  $\sim 150$  мм от форсунок потоки материалов смешиваются. Одновременно с ними смешивается и поток измельченных волокон. Полученная таким образом композиция наносится на поверхность формы, где материал отвердевает. Рабочее давление распылителей, работающих в устройствах описанного типа, составляет  $2,7 \dots 7,5$  МПа [24].

На практике используются разные типы распылительных устройств. Варианты компоновки некоторых из них показаны на рис. 5.10 [24].

При напылении компонентов важно получить качественный полиэфирный наружный смоляной слой (гелькоат). Качество поверхности изделия в значительной степени определяется квалификацией оператора. Контроль поверхности производится лишь после завершения операции отверждения материала и извлечения изделия из формы. Для того чтобы устранить этот недостаток, была предложена технология получения «кожицы» не в виде наружного смоляного слоя, а путем формования листа, изготовленного из жесткого термопластичного материала (модифицированных акриловых смол) [24].

Схематически последовательность операций, выполняемых при реализации метода напыления композиционного материала с использованием наружного слоя из жестких формуемых термопластов, показана на рис. 5.11 [24]. На первой стадии осуществляют нагрев листов и их вакуумное формование. Далее отформованные листы помещают в форму для напыления и закрепляют в ней. По

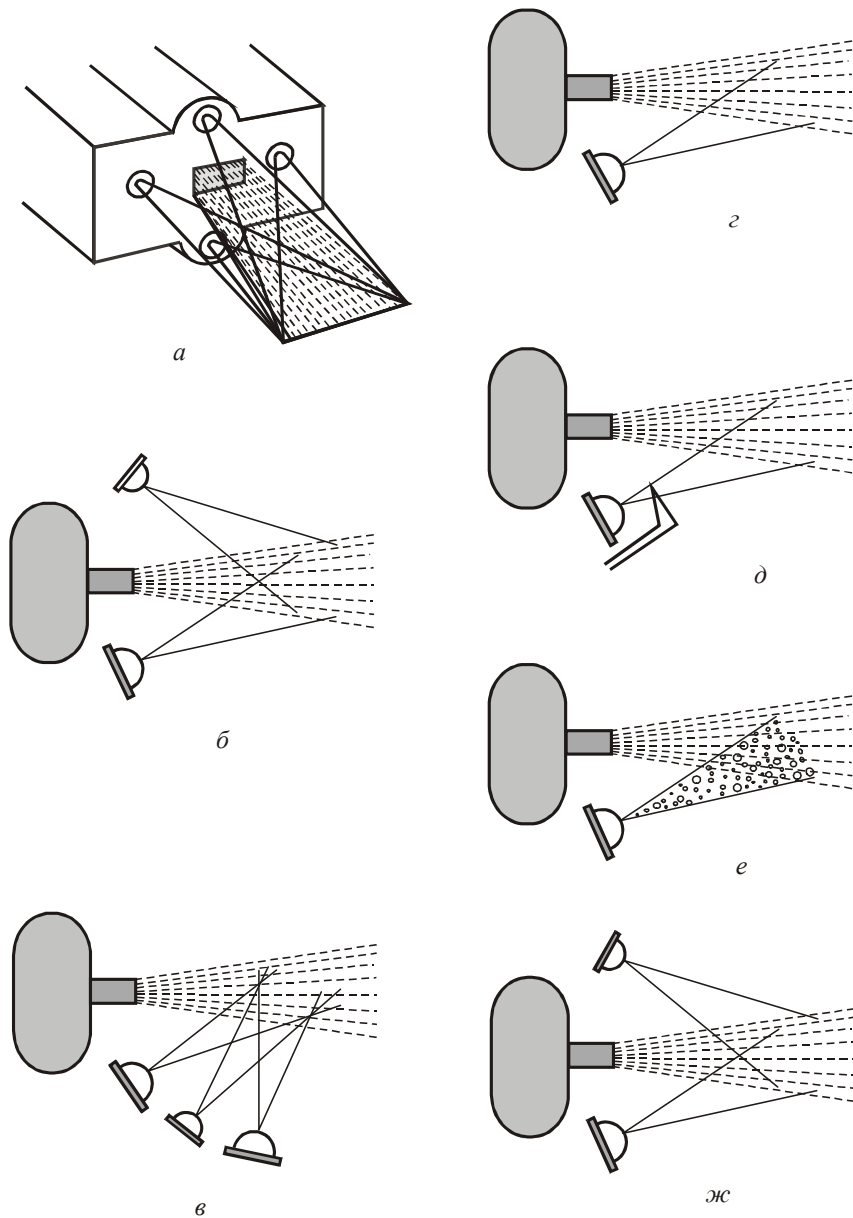


Рис. 5.10. Варианты компоновки распылителей, используемых при производстве деталей из ПКМ по методу напыления

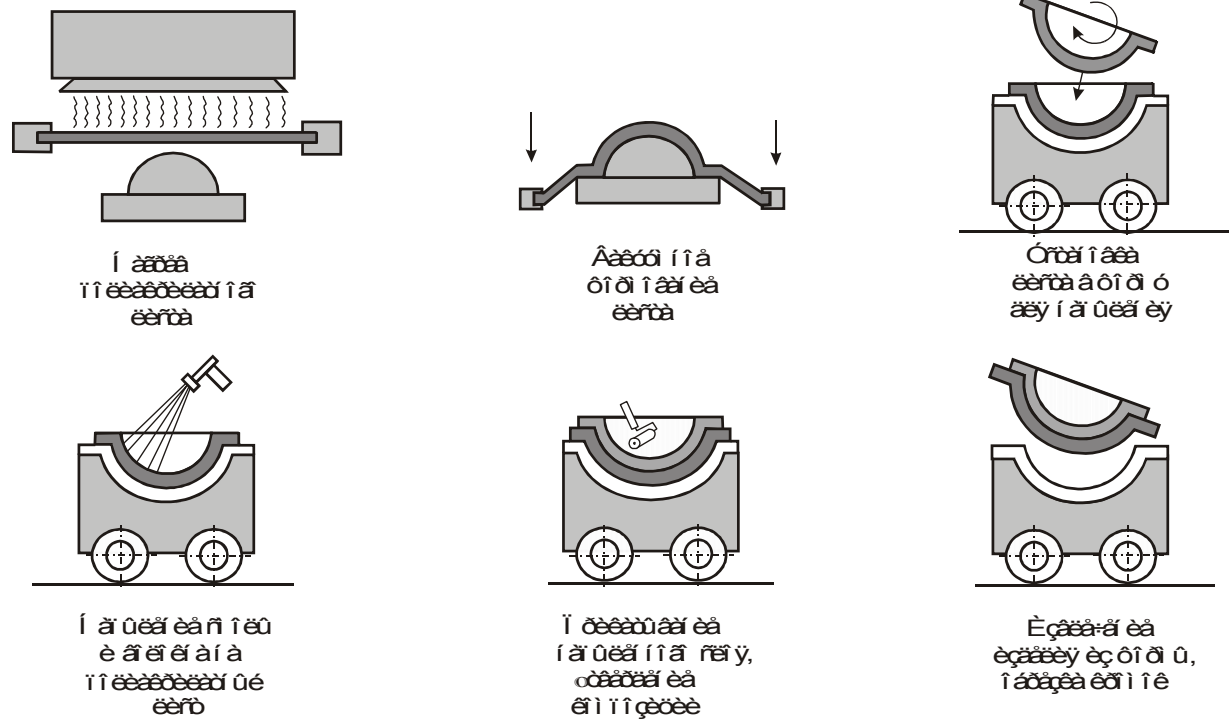


Рис. 5.11. Схема формирования кожуха по технологии напыления полимерного композиционного материала на покрытие из термопластичного листа



технологии напыления на листы наносят смесь связующего с измельченным волокном. Для уплотнения композиции и получения гладкой поверхности производят прикатывание напыленного слоя валиками. После отверждения полимерной матрицы изделие извлекают из формы и обрезают его кромки.

## **5.2. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФОРМОВАНИЯ С ЭЛАСТИЧНОЙ ДИАФРАГМОЙ**

Процесс получения изделий из ПКМ по технологии формования с эластичной диафрагмой заключается в вакуумировании заготовок в резиновом мешке и их формовании под действием равномерного давления воздуха или смеси газов (в автоклаве) [5]. Процессы формования с эластичной диафрагмой позволяют получать изделия с качественной структурой и высоким уровнем механических свойств. Плотная структура материалов с минимальным количеством дефектов обеспечивается равномерным распределением давления по всей поверхности формуемого изделия. Разновидностями анализируемого в данном разделе способа получения изделий из композитов являются вакуумное, вакуумно-автоклавное и пресс-камерное формование. Ниже рассматриваются некоторые особенности практической реализации этих методов.

### **5.2.1. МЕТОД ВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ**

Схемы устройств, позволяющих реализовать метод вакуумного формования изделий с эластичной диафрагмой, приведены на рис. 5.12. Левая схема предусматривает использование позитивной, правая – негативной форм. Основным элементом устройства – основание, к которому с помощью прижима крепятся форма, формуемая заготовка, цулага (или целлофан) и резиновый чехол. Цулага представляет собой тонкую обшивку (толщиной 0,5...1,5 мм), форма которой соответствует контурам формуемого изделия [5]. Цулага выполняется из алюминиевого сплава, текстолита или стеклотекстолита. При откачке из резинового чехла воздуха он равномерно со всех сторон обжимает формуемую заготовку.

Функции внешнего давления, передаваемого на заготовку через резиновый чехол, заключаются в уплотнении слоев армирующего материала, обеспечении качественной глубокой пропитки волокна связующим, выдавливании из пустот пузырьков воздуха и побочных летучих продуктов реакции, а также избытка смолы из слоев материала [5].

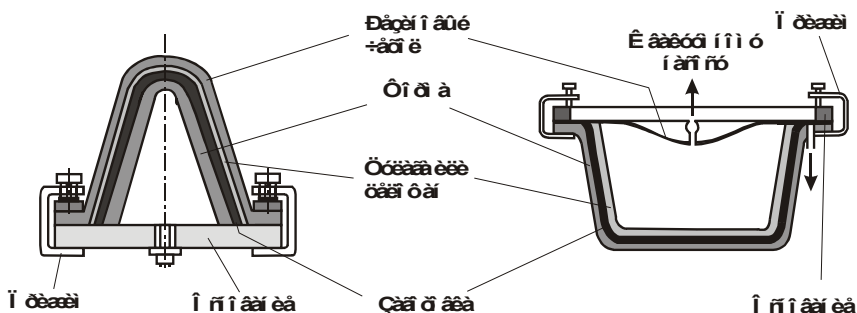


Рис. 5.12. Схема установки для формирования полимерных композитов вакуумным методом:

а – с использованием внутренней и б – наружной форм

Важным требованием, предъявляемым к связующему, является минимальное выделение при полимеризации побочных газообразных продуктов. Эти продукты создают под резиновым чехлом противодавление и вызывают расслоение композиционного материала.

Для изготовления форм могут быть применены различные материалы, в том числе металлические сплавы, гипс, слоистые пластики, дерево. Деревянные формы находят применение при изготовлении небольших партий изделий в случае использования связующих холодного отверждения [5]. Выбор материала проводят с учетом его температурного коэффициента линейного расширения. Чем больше изменяются размеры формы в процессе ее нагрева, тем ниже точность получаемых изделий.

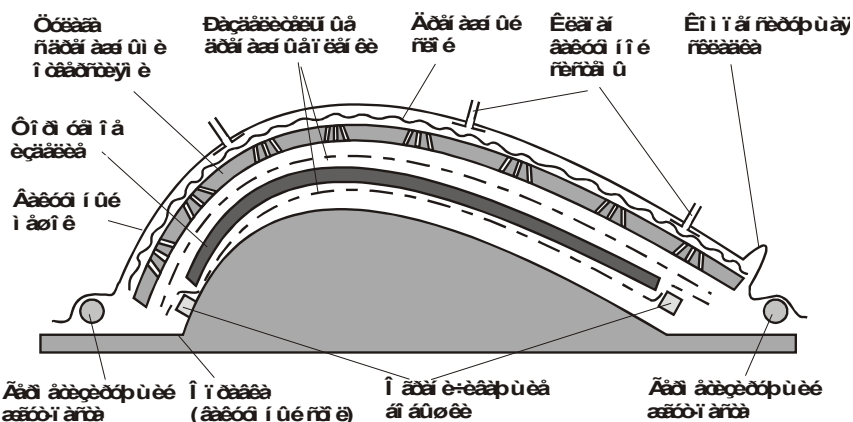


Рис. 5.13. Схема вакуумирования изделия при реализации технологии формирования с эластичной диафрагмой

Для того чтобы исключить схватывание формуемого материала с формой, ее поверхность покрывают слоем антиадгезива. В качестве антиадгезионных материалов могут быть использованы пастообразный парафин (до 121 °С), фторированные углеводороды

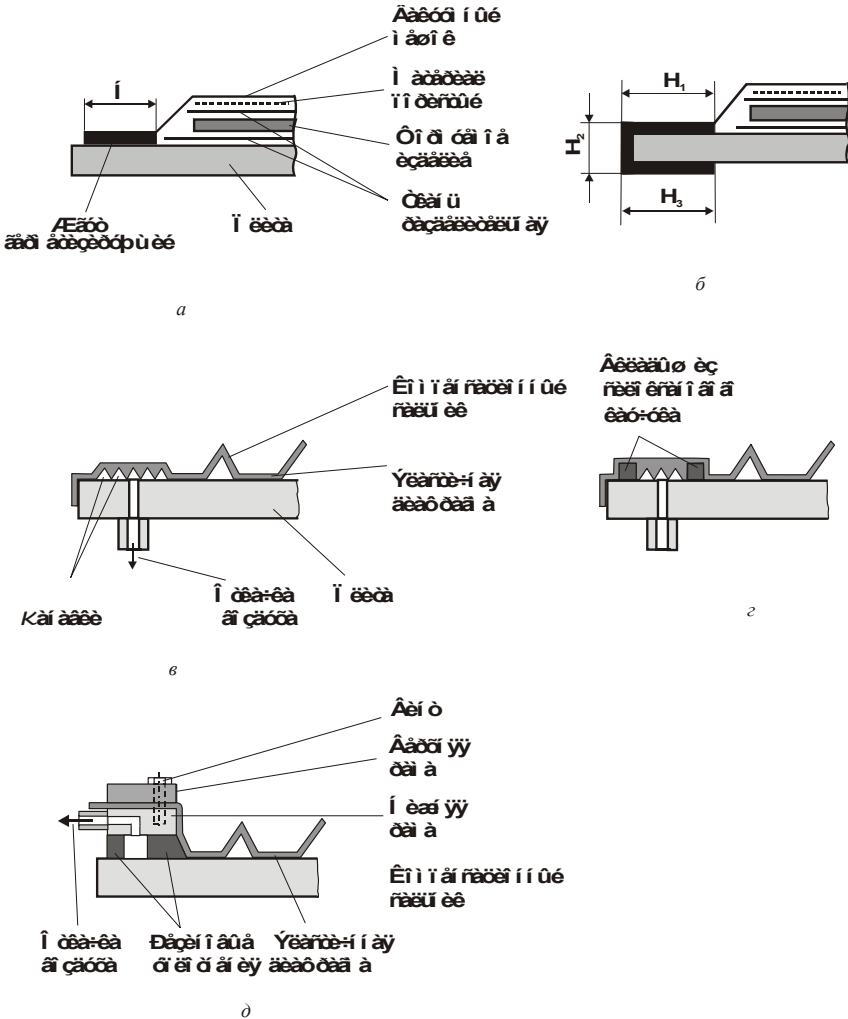


Рис. 5.14. Схемы обеспечения герметичности вакуумного мешка при формовании изделий с использованием эластичной диафрагмы:

а, б – приклеивание диафрагмы с помощью жгута; в, г – использование многоканавочных уплотнений и д – наружной уплотняющей рамы

(до 177 °С), силиконовая смазка (до 204 °С), смазка на основе силановой смолы (до 482 °С) [5]. Антиадгезионный слой возобновляют через 4-5 запрессовок. Функцию антиадгезива может выполнять целлофановая пленка.

Сверху на антиадгезионный слой в необходимом количестве укладывают предварительно пропитанные связующим слои ткани или маты. С целью удаления из формируемого материала пузырьков воздуха, повышения его плотности уложенные слои прикатывают роликом к форме. На поверхность заготовки укладывают разделительные дренажные пленки (ткани). Эти пленки в процессе отверждения материала абсорбируют излишки смолы. Иногда в качестве разделительного слоя используют цулагу. Верхний слой, прилегающий к вакуумному мешку, препятствует прилипанию мешка к пакету. Схема конструкции, подготовленной к вакуумному формованию, показана на рис. 5.13.

Материалами для изготовления вакуумного мешка (эластичной диафрагмы) могут служить резины особых марок, способные эксплутироваться при воздействии смол и высоких температур, прорезиненные ткани, силоксановый каучук, армированный стекловолокном. Возможно применение термостойких пленок, например полиимидных (до 316 °С), полиамидных (до 230 °С), нейлоновых (до 204 °С), пленок из поливинилового спирта (до 121 °С). Штуцеры, вплавленные или клеенные внутрь эластичной диафрагмы, соединяют ее с вакуумным насосом. Количество штуцеров определяется площадью диафрагмы.

Важное технологическое требование – герметичность эластичной диафрагмы. На практике реализуется несколько схем уплотнений, обеспечивающих герметичность вакуумируемого объема. Несколько вариантов уплотнений, основанных на использовании клеящего жгута, многоканавочных конструкций и наружной уплотняющей рамы, приведено на рис. 5.14 [5, 24].

### 5.2.2. ВАКУУМНО-АВТОКЛАВНОЕ ФОРМОВАНИЕ

Вакуумно-автоклавный метод формования принципиально похож на описанный в предыдущем разделе вакуумный метод. Однако для его осуществления кроме вакуумной системы необходим автоклав, обеспечивающий дополнительное давление на поверхность формируемого изделия.

Принципиальные схемы устройства автоклавов, используемых для формования полимерных композиционных материалов, приведены на рис. 5.15 и 5.16 [5]. Автоклав представляет собой емкость,

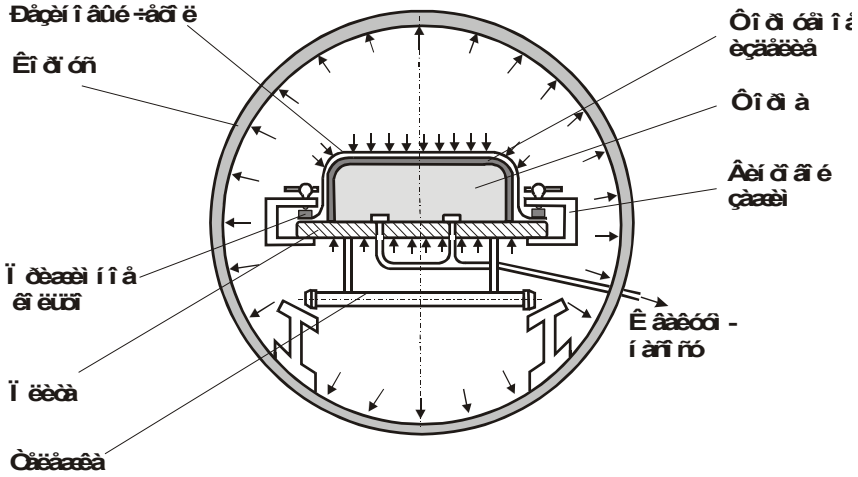


Рис. 5.15. Схема формирования изделий из ПКМ в автоклавах и гидроклавах

в которую помещается формируемое изделие. В состав автоклава входят системы обеспечения вакуума, подачи газа, разогрева объема до необходимой температуры, регулирования давления, аварийного сброса давления. Корпус автоклава защищен теплоизоляцией. В отечественных автоклавах возможна обработка изделий диаметром 4,5 м длиной 26 м. Величина рабочего давления состав-

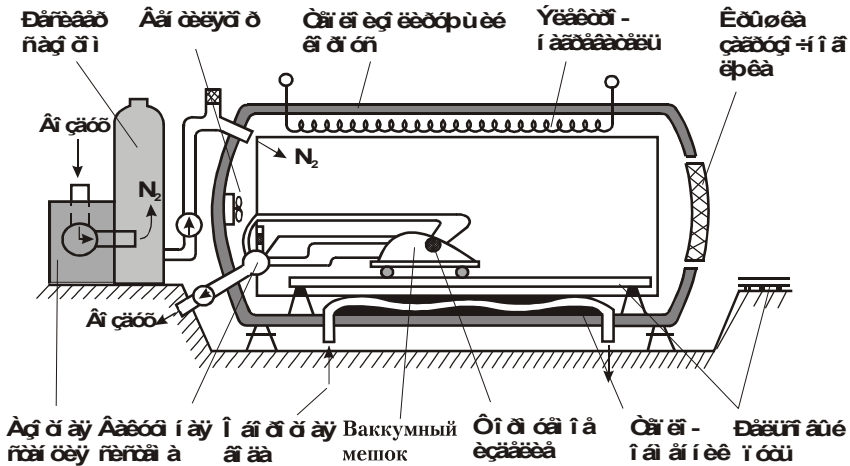


Рис. 5.16. Вакуумно-автоклавное формирование. Схема автоклава

ляет 1,6...3,0 МПа, максимальная рабочая температура 250...450 °С [5].

Формуемое изделие, помещенное внутрь автоклава, вакуумируется посредством технологии, основанной на использовании эластичной диафрагмы. Из рабочего пространства автоклава откачивают воздух, после чего оно под определенным давлением заполняется рабочим газом. Избыточное давление необходимо для равномерного формования изделия, находящегося под эластичной диафрагмой. На следующем этапе производится прогрев рабочего пространства. Температура среды контролируется хромель-копелевыми термопарами. По завершении формования и охлаждении изделия до 60...70 °С давление в рабочей камере автоклава снижается. Охлаждение автоклава осуществляется водяным теплообменником.

### 5.2.3. ПРЕСС-КАМЕРНОЕ (ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ) ФОРМОВАНИЕ

Схема, поясняющая особенности технологии пресс-камерного формования изделий из полимерных композитов, приведена на рис. 5.17. В качестве технологической оснастки используется пресс-форма, на которую укладывается прессуемая заготовка. Внешняя поверхность заготовки покрывается резиновым чехлом.

При подаче воздуха резиновый чехол (мешок) растягивается и прижимается с одной стороны к внешней поверхности заготовки, а

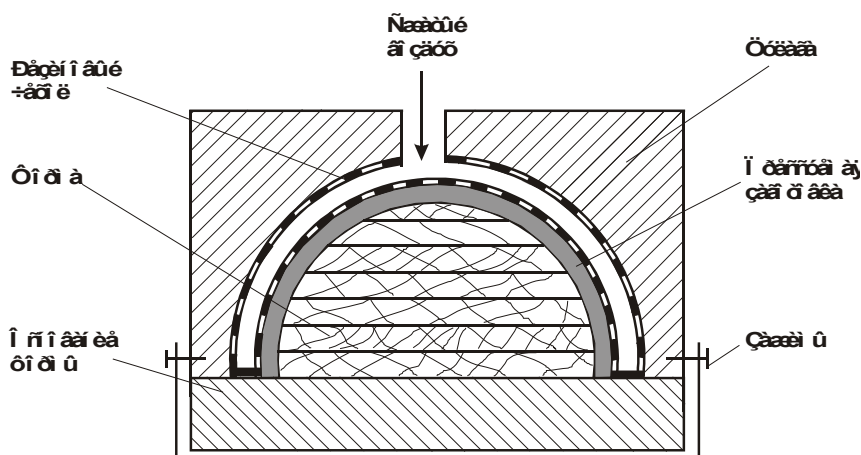


Рис. 5.17. Схема пресс-камерного формования изделий из полимерных композиционных материалов

с другой – к внутренней поверхности цулаги. Давление мешка равномерно распределяется по всей поверхности заготовки, обеспечивая хорошее качество получаемого композиционного материала. Давление прессования обычно не превышает 0,5 МПа [5].

### **5.3. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДАВЛЕНИЕМ**

В промышленности используются две разновидности технологических процессов, основанных на формообразовании деталей давлением: пропитка под давлением и пропитка в вакууме. В следующих разделах анализируются некоторые особенности реализации этих методов. Методы формообразования деталей давлением обеспечивают высокое качество получаемых изделий (высокую геометрическую точность, равномерную плотность по объему, отсутствие пустот и расслоений). В качестве типичного примера деталей, получаемых этими методами, можно назвать обтекатели летательных аппаратов [5].

#### **5.3.1. ПРОПИТКА ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Для получения изделий из полимерных композиционных материалов по технологии пропитки под давлением необходимы форма и емкость со связующим, а также компрессор, нагнетающий связующее в форму. Конструкция формы понятна из рис. 5.18. Пакет материала, выполняющего функцию упрочнителя композита, укладывается на матрицу и закрывается пуансоном. Предварительно поверхности матрицы и пуансона покрывают слоем антиадгезионного материала. Сушку материала, уложенного в форму, проводят путем продувания через нее горячего воздуха, нагреваемого калорифером. При получении малогабаритных изделий в некоторых случаях проводят операцию «промывки» материала упрочнителя смолой, входящей в состав связующего [5].

В пространство между пуансоном и матрицей под давлением с помощью компрессора из емкости закачивают связующее. Связующее постепенно поднимается вверх и вытесняет воздух из находящегося в промежутке материала. Производительность процесса и качество получаемого материала обеспечивает оптимальная скорость подъема связующего по форме. При ее превышении в связующем остаются пузырьки воздуха, отрицательно сказывающиеся на свойствах получаемого композиционного материала.

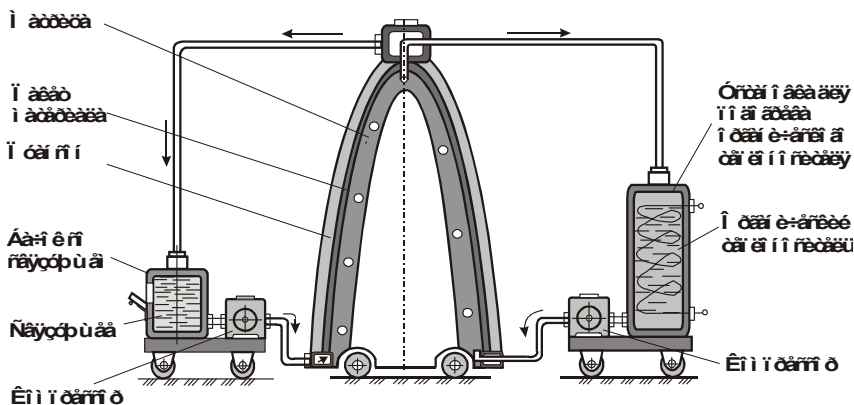


Рис. 5.18. Формование ПКМ. Схема пропитки пакета материала под давлением [5]

Излишки связующего, выходящие из рабочего пространства формы, сливаются в бак и используются при получении других деталей. После заполнения формы связующим процесс его нагнетания компрессором прекращают и связующее начинает отверждаться. Ускорению этого процесса способствует прогрев материала.

Температуры связующего и формы – важные технологические параметры процесса пропитки. При необходимости управление температурой формы осуществляется с помощью теплоносителя, прокачиваемого компрессором через матрицу. Отверждение материала может осуществляться при помещении формы в печь.

### 5.3.2. ПРОПИТКА В ВАКУУМЕ

Для пропитки в вакууме используются формы, аналогичные формам для пропитки давлением. В них также имеется матрица и пуансон (рис. 5.19). Перед сборкой формы на матрицу укладывают материал упрочнителя. Отличительной особенностью данного метода формообразования является то, что пропитка материала связующим осуществляется при откачивании из формы воздуха. Атмосферное давление давит на связующее, находящееся в бачке, и заставляет его подниматься по форме, заполняя всю свободную от упрочняющего материала полость. Для того чтобы не происходило сдавливания атмосферным давлением матрицы и пуансона, они должны быть достаточно жесткими. В противном случае связующее не сможет подниматься по форме и равномерно заполнять рабочее пространство.



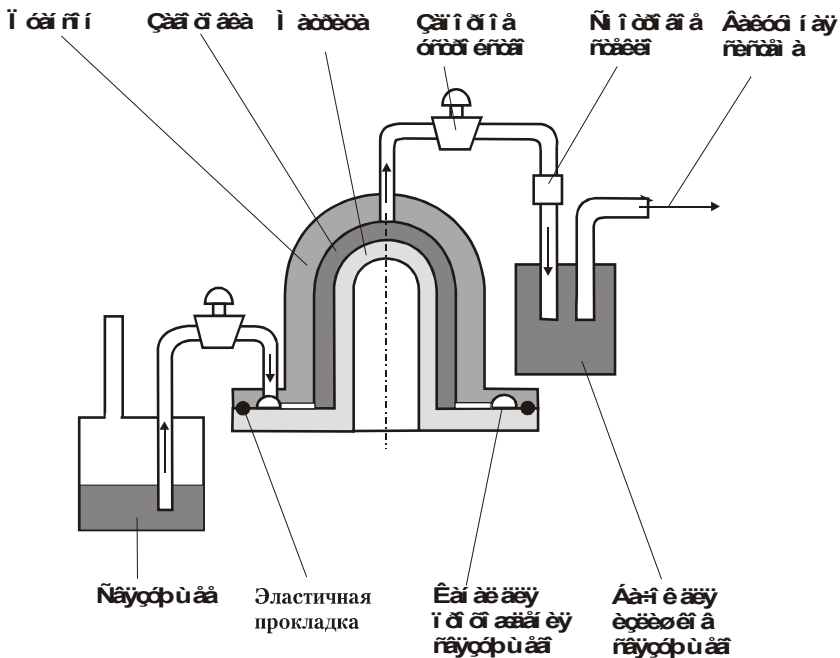


Рис. 5.19. Формование ПКМ. Пропитка в вакууме

#### 5.4. ПРЕССОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ФОРМАХ

Методы прессования в формах широко применяются для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов. Этими методами получают около 50 % изделий из армированных пластмасс [5]. Использование пресс-форм обеспечивает нужную конфигурацию изделий из композиционных материалов.

Наиболее выгодно применение методов прессования в формах в тех случаях, когда необходимо изготовить большие партии деталей. Однако в некоторых случаях технология прессования может быть использована даже при изготовлении деталей мелкосерийного производства, что объясняется высоким качеством получаемого в пресс-формах материала и обеспечением высокой точности размеров и формы деталей.

Для реализации любого из разработанных и используемых методов прессования необходимо изготовить пресс-форму, рабочий объем которой соответствует форме получаемого изделия. Основ-

ными элементами формы являются пуансон и матрица. При их смыкании в форме остается рабочий зазор, толщина которого соответствует толщине изделия.

Различают три основных метода прессования: прямое, литьевое и термокомпрессионное. Выбор метода прессования определяется конструкцией формы, свойствами применяемого материала, способом его загрузки в форму [5].

#### 5.4.1. ПРЯМОЕ ПРЕССОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Материалом для изготовления деталей методом прямого прессования служат волокнистая масса, пропитанная связующим; таблетированные полимерные композиты; пропитанные связующим маты или ткани; предварительно отформованные заготовки из полимерных композитов; премиксы [5]. В зависимости от режимов обработки и методов пропитки содержание армирующего материала в композиционных материалах, полученных прессованием, может составлять 20...50 %.

Схема реализации процесса прямого прессования представлена на рис. 5.20. Прессуемый материал загружают в матрицу, нагретую до определенной температуры. Сверху на него воздействует пуансон. Под действием приложенного давления разогретый в форме материал принимает конфигурацию рабочей полости. Извлечение

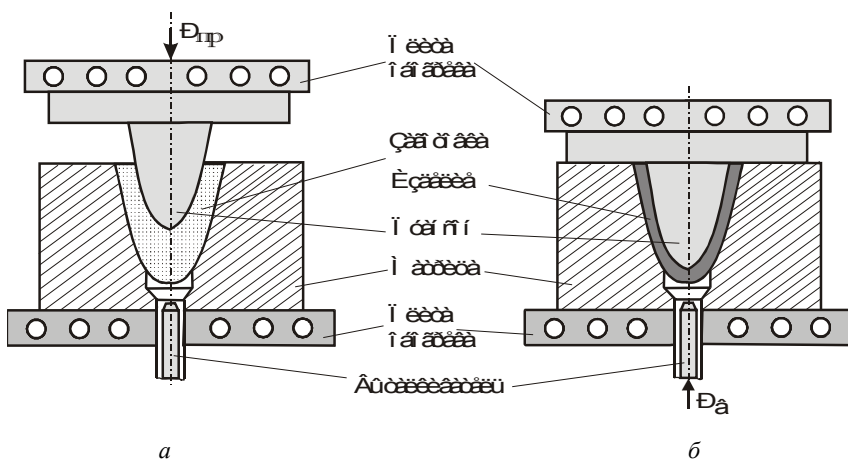


Рис. 5.20. Схема прямого прессования изделий из полимерных композиционных материалов:

*a* – начальная стадия процесса, *б* – окончание процесса прессования

изделия из формы осуществляют после отверждения композиционного материала. Отверждение термореактивного материала происходит в течение некоторого времени при определенной температуре. Термопластичный материал отвердевает при понижении температуры.

Для практической реализации метода прямого прессования обычно используют гидравлические прессы. Применяют прессы с одним рабочим цилиндром (нижнего или верхнего расположения) и с двумя рабочими цилиндрами. На прессах с нижним рабочим цилиндром обычно устанавливают съемные пресс-формы. Стационарные пресс-формы устанавливаются, главным образом, на прессах с верхним расположением рабочих цилиндров.

При работе пресса, оснащенного нижним рабочим цилиндром, пресс-форму устанавливают на нижнюю подвижную плиту. При ее подъеме пресс-форма прижимается к верхней неподвижной плите. В результате этого происходит прессование материала, находящегося в форме. После окончания цикла прессования подвижная плита под действием собственного веса опускается, вытесняя при этом рабочую жидкость из гидроцилиндра. В прессах с верхним расположением рабочего цилиндра подвижной является верхняя плита. После окончания прессования верхнюю плиту необходимо поднять в исходное положение. Это осуществляется путем использования вспомогательных цилиндров обратного хода [5].

Пресс-формы, применяемые для изготовления полимерных композиционных материалов, классифицируются по различным признакам [5]. По характеру эксплуатации различают съемные, полусъемные и стационарные пресс-формы. В зависимости от количества гнезд, т. е. от числа одновременно прессуемых изделий, пресс-формы могут быть одногнездовыми и многогнездовыми. Кроме того, различают открытые, полузакрытые и закрытые пресс-формы.

Детали, изготовленные в открытых пресс-формах, не обеспечивают точности по высоте. При изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов с термопластичной матрицей применение открытых пресс-форм имеет смысл в случае прессования несложных изделий с небольшой высотой вертикальных стенок. При прессовании в открытой пресс-форме необходимо обеспечить избыток загружаемого материала в объеме  $\sim 10...15\%$ .

Пресс-формы полузакрытого типа по сравнению с открытыми обеспечивают более высокую степень уплотнения материала. Это позволяет получать в полузакрытых формах более сложные по геометрии детали. Потери материала в полузакрытых формах меньше.

Объем рабочего пространства закрытых пресс-форм соответствует объему формуемого изделия. Отходов материала при их использовании нет, материал из оформляющего гнезда не вытекает. Достоинствами закрытых форм являются более высокая степень уплотнения материала, высокий уровень механических свойств. Недостаток пресс-форм закрытого типа связан со сложностью их изготовления и сравнительно невысокой эксплуатационной стойкостью [5].

С целью защиты пресс-форм от коррозии рабочие поверхности пуансонов и матриц рекомендуется хромировать. Хромовое покрытие облегчает также извлечение полученных изделий из формы. В качестве антиадгезионных материалов, наносимых на рабочие поверхности пресс-формы, при реализации методов прямого прессования используют целлофан, лавсан, фторопласт, водные растворы поливинилового спирта. Более удобными для нанесения являются воск, парафин, кремнийорганические смазки [5].

Кроме давления важными технологическими параметрами процесса прессования являются температура и время. Подогрев материала необходим для обеспечения его пластичности, облегчения заполнения рабочего пространства пресс-формы. При использовании в качестве матричного материала термореактивных связующих нагрев необходим для отверждения материала. Нагрев пресс-форм может осуществляться с помощью специальных встраиваемых нагревателей, а также подогреваемых плит, на которых крепятся элементы форм.

Метод прямого прессования применяют для переработки как термопластичных, так и термореактивных материалов. На практике этим методом обычно изготавливают изделия из термореактивных

Т а б л и ц а 5.2

**Примерные режимы прямого прессования изделий из полимерных композиционных материалов**

Наименование материала	Температура, К	Удельное давление, min-max, МПа	Время выдержки, мин	Усадка, %
Термопластичные КМ	393-523	2-15	5-15	1-3
Эластомеры	343-473	0,4-25	3-60	1-2
Термореактивные КМ	393-473	3,0-75	3-15	0,2-1,2
Премиксы	393-473	3,5-7,0	1-3	0,5-1,0

материалов. Переработку термопластичных материалов ограничивает относительно большая длительность процесса прессования. При производстве изделий из ПКМ с термопластичной матрицей необходимо в каждом цикле работы пресса, т. е. при изготовлении каждой детали, попеременно нагревать и охлаждать форму. Примерные режимы прямого прессования изделий из различных материалов отражены в табл. 5.2 [5].

#### 5.4.2. ЛИТЬЕВОЕ ПРЕССОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Особенности реализации этого метода получения композиционных материалов понятны из рис. 5.21 [5]. В загрузочную камеру помещают прессуемый материал. Материал нагревается, размягчается и под действием литьевого пуансона через литниковый канал поступает в полость пресс-формы, имеющую контуры изделия. Материал в оформляющую полость поступает уже в пластичном

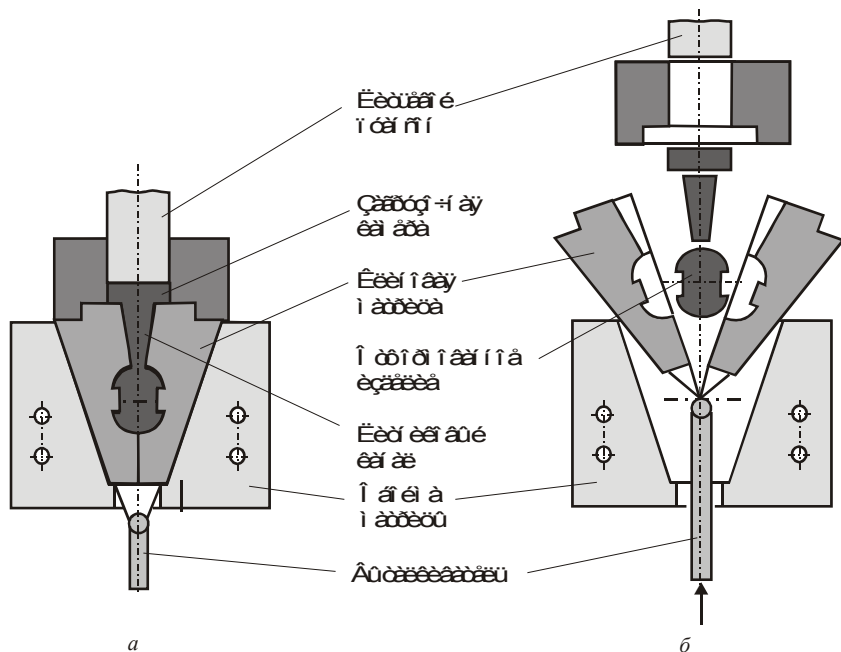


Рис. 5.21. Схема пресс-формы для литьевого прессования ПКМ на прессах с одним рабочим цилиндром:

а – форма в замкнутом состоянии, б – форма в разомкнутом состоянии

состоянии, не позволяющем оказывать значительное силовое воздействие на впрессовываемую арматуру. Это обстоятельство допускает возможность использования низкопрочной арматуры. В нагретом состоянии прессовка выдерживается некоторое время, необходимое для отверждения материала. После отверждения пресс-форма размыкается и полученное изделие вместе с литниковой системой извлекается из нее. В дальнейшем литниковый остаток обрезается.

Метод литьевого прессования характеризуется следующими особенностями [5]. Из-за малого перепада температур по толщине стенок деталей внутренние напряжения меньше, чем при реализации технологии прямого прессования. Длительность процесса

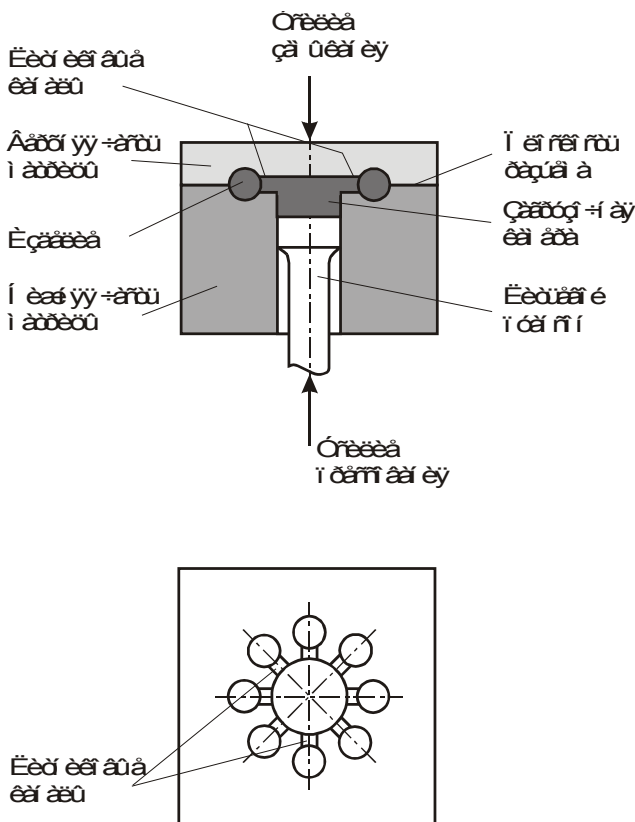


Рис. 5.22. Схема пресс-формы для литьевого прессования ПКМ на прессах с двумя рабочими цилиндрами

литьевого прессования также меньше по сравнению с обычным прессованием. Детали, полученные по технологии литьевого прессования, отличаются высокой точностью размеров. Оформляющая полость пресс-формы закрывается еще до заполнения ее материалом, поэтому грата на поверхностях деталей мало. Недостаток – повышенный расход материала, связанный с наличием литникового канала и пресс-остатка.

На рис. 5.21 показана схема пресс-формы, используемой на прессе с одним рабочим цилиндром. Пресс-формы другого типа применяются на прессах с двумя рабочими цилиндрами. Схема такой пресс-формы приведена на рис. 5.22 [5]. Прессуемый материал помещают в загрузочную камеру пресс-формы. Верхнюю часть матрицы прижимают к нижней и удерживают в таком состоянии до окончания процесса прессования. Давление, обеспечивающее заполнение оформляющих полостей пресс-формы, создается при подъеме литьевого пуансона. После отверждения материала пресс-форму раскрывают и дополнительным ходом литьевого пуансона изделия, соединенные с литниковой системой, выталкивают из формы.

#### 5.4.3. ТЕРМОКОМПРЕССИОННОЕ ПРЕССОВАНИЕ

Для реализации метода термокомпрессионного прессования используют специальные пресс-формы, основными частями которых являются жесткая металлическая матрица, имеющая конфигурацию изделия, и эластичный формуемый элемент (ЭФЭ). Между ЭФЭ и матрицей располагается уплотняемый пакет. Деформация пакета осуществляется за счет расширения материала эластичного формующего элемента при нагревании. К материалам, из которых изготавливают эластичные формующие элементы, предъявляют следующие требования [5]: высокая эластичность, необходимая для передачи давления по всем направлениям; стабильность свойств; высокое значение термического коэффициента линейного расширения. Указанным требованиям удовлетворяют резины на основе силоксановых каучуков. Для эксплуатации при температуре не выше 200 °С пригодна резина на основе силиконового каучука СКТВ-1.

Эффективное деформирование материала при реализации термокомпрессионного метода возможно в том случае, если температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) эластичного формующего элемента находится в диапазоне  $(250...500) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [5]. Нарастание давления  $P$  на деформируемый материал происхо-

дит в процессе нагревания оснастки. Величина  $P$  пропорциональна изменению температуры:

$$P = k_p \Delta T,$$

где  $k_p$  – коэффициент термокомпрессии материала эластичного формующего элемента, характеризующий прирост давления внутри замкнутого объема при нагреве ЭФЭ на  $1^\circ\text{C}$ ; для резин  $k_p = 0,5 \dots 0,7 \text{ МПа}/^\circ\text{C}$  [5];  $\Delta T$  – разность между текущей температурой и температурой, при которой исчезает зазор  $\delta$  между ЭФЭ и ограничительной частью пресс-формы.

На практике используют два типа пресс-форм для термокомпрессионного прессования (рис. 5.23) – формы с постоянным ( $a$ ) и переменным ( $b$ ) объемами формования. В формах первого типа металлический пуансон и металлическая матрица жестко связаны друг с другом. Давление прессования в них можно изменять, управляя величиной зазора  $\delta$  и температурой нагрева эластичного формующего элемента. В формах с переменным объемом формования металлический пуансон связан с матрицей посредством упругих тарированных элементов. При повышении в форме давления за счет перемещения пуансона по направляющим колонкам давление формования сохраняется на заданном уровне.

Метод термокомпрессионного прессования позволяет изготавливать равнотолщинные изделия из полимерных композиционных материалов. Материал, полученный этим методом, отличается хорошей

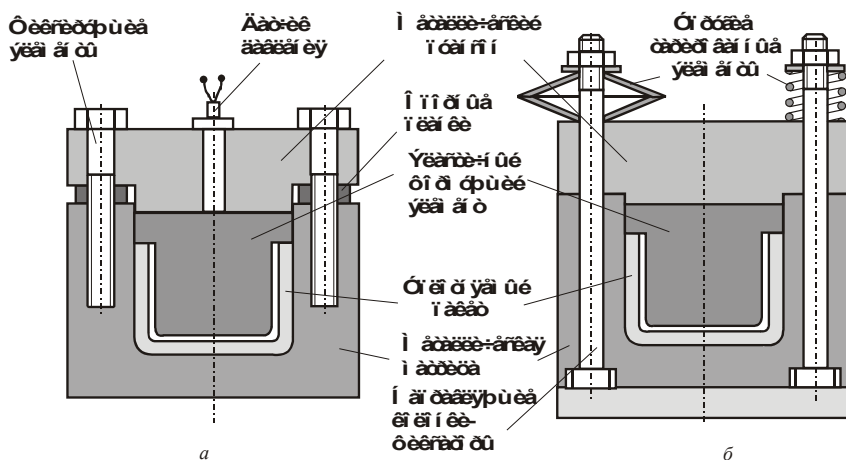


Рис. 5.23. Оснастки для термокомпрессионного формования полимерных КМ материалов с постоянным ( $a$ ) и переменным ( $b$ ) объемами



структурой и высоким уровнем механических свойств. Важным достоинством анализируемого метода является относительно невысокая трудоемкость изготовления технологической оснастки.

### **5.5. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФОРМОБРАЗОВАНИЯ НАМОТКОЙ**

Метод намотки широко используется для получения изделий из полимерных композиционных материалов. Для его практической реализации необходимы оправки, контуры которых соответствуют форме получаемых изделий. Методом намотки обычно получают изделия, имеющие форму тел вращения. В качестве примеров типичных деталей можно назвать баллоны давления, баки, корпуса ракетных двигателей, и подводных аппаратов, цистерны, трубы [5]. Армирующим материалом в технологии намотки служат нити, ленты, жгуты, ткани, тонкие пленки. Армирующий материал пропитывается полимерным связующим и по определенной схеме наматывается на предварительно подготовленную оправку. После завершения операции намотки происходит отверждение связующего. Оптимальное содержание армирующего материала в полимерных композиционных материалах, полученных методом намотки, составляет ~ 50...70 % [5]. Оправка либо становится элементом получаемой конструкции, либо удаляется.

Важным достоинством композиционных материалов, полученных методом намотки, является возможность эффективного управления механическими свойствами за счет усиления конструкции в наиболее нагруженных направлениях. Метод позволяет в наибольшей степени реализовать прочностные свойства волокон на растяжение. Для выполнения метода намотки разработано большое количество станков и устройств, управляемых электронно-вычислительными машинами. Эти устройства относительно просто перенастраиваются для изготовления различных изделий сложной формы.

В практических условиях применяют следующие разновидности метода намотки: «сухая», «мокрая» и промежуточная [5]. При выполнении «сухой» намотки пропитку армирующего материала осуществляют заранее. Для пропитки применяют специальное пропиточное оборудование, обеспечивающее необходимое содержание связующего в препрегах, степень пропитки, вязкость полимера. В процессе предварительной пропитки получают препреги на основе стеклянных, органических и углеродных волокон. В качест-

ве связующих материалов используют эпоксидные, фенолформальдегидные, полиимидные, эпоксидно-фенольные смолы.

Метод «сухой» намотки улучшает культуру производства (оборудование и рабочее место загрязняются в меньшей степени, чем при «мокрой» намотке), повышает производительность процесса. При «сухой» намотке более точно контролируется объемная доля арматуры и связующего, механические свойства материала более стабильны. За счет прилипания препрега к поверхности оправки можно проводить «сухую» намотку на объекты с крутыми уклонами. Во многих случаях намотка препрегов осуществляется на станках с программным управлением. Схема реализации такого процесса показана на рис. 5.24 [5]. Недостатки метода «сухой» намотки заключаются в ее более высокой стоимости по сравнению

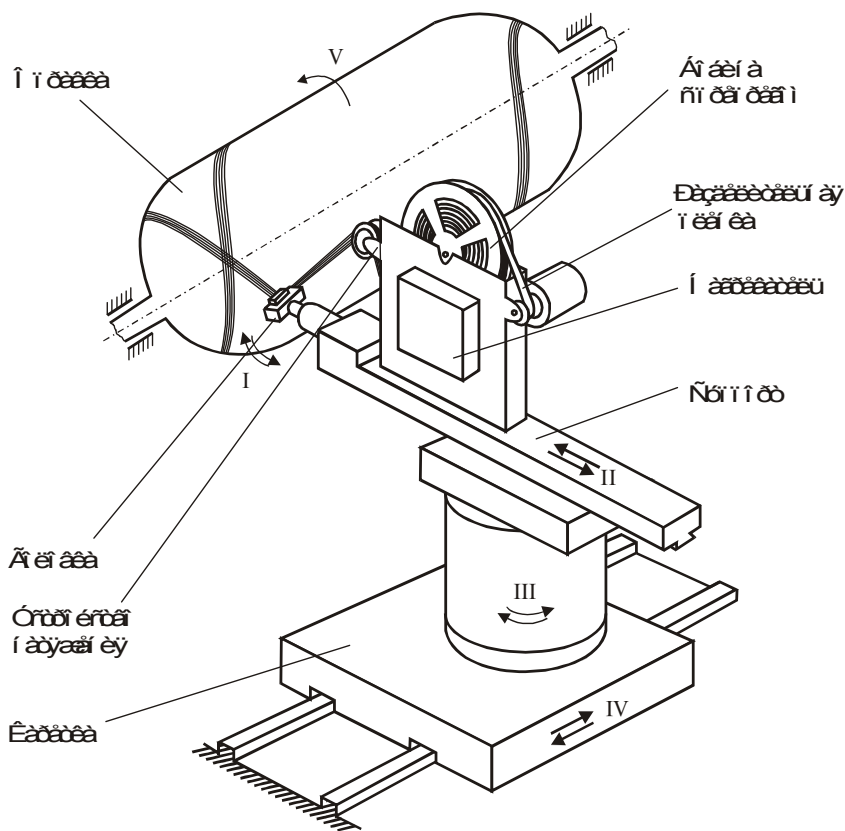


Рис. 5.24. Схема «сухой» намотки изделия препрегом

с «мокрой» намоткой (~ в 2...3 раза), необходимости применения специальной технологической оснастки.

Метод «мокрой» намотки предусматривает пропитку армирующего материала непосредственно перед укладкой арматуры на оправку. Так, например, при использовании в качестве армирующих элементов нитей они разматываются со шпулей, поступают на индивидуальные натяжители, формируются в прядь и поступают в ванночку со связующим. Затем пропитанная прядь нитей отжимается, натягивается с необходимым усилием и наматывается на оправку, имеющую контуры изделия. Намотка пряди на оправку осуществляется раскладывающим устройством. Схематически процесс «мокрой» намотки изображен на рис. 5.25. «Мокрая» намотка применяется, как правило, для изготовления крупногабаритных оболочек, имеющих сложную форму [5]. Преимуществом этого метода является более низкий уровень контактного давления. Недостатки заключаются в относительно низкой скорости намотки, что обусловлено ограниченной скоростью пропитки арматуры; неравномерном содержании связующего по толщине формируемого изделия; повышенном (по сравнению с методом «сухой» намотки) количестве отходов связующего; невозможности использования

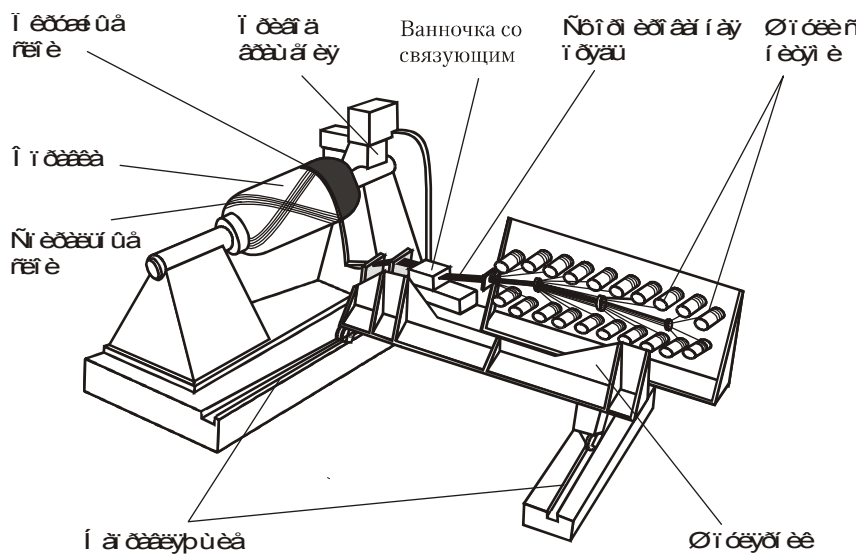


Рис. 5.25. Схема получения изделия из полимерного композиционного материала по методу «мокрой» намотки [5]

в качестве связующего термопластов и других материалов, обладающих высокой вязкостью; загрязнении рабочего места и технологической оснастки связующим.

Третий способ получения ПКМ заключается в предварительной намотке арматуры на оправку и последующей ее пропитке связующим. Пропитку армирующего материала на оправке проводят распылением связующего пульверизатором, кистью (вручную), с использованием вакуума и давления [5].

Применение того или иного типа намотки диктуется назначением и конструкцией изделия, его размерами, массой, типом материала и другими особенностями.

### 5.5.1. ПРОПИТКА АРМИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА СВЯЗУЮЩИМ

Пропитка арматуры связующим – ответственный этап технологии изготовления ПКМ путем намотки. Для обработки арматуры используют несколько способов [5]: протягивание нитей через ванну со связующим; пропитка «купающимся» роликом; пропитка отжимным роликом; принудительная пропитка в клиновой или вакуумной камере; пропитка под давлением.

Метод пропитки «купающимся» роликом, схематически отраженный на рис. 5.26, применяют для обработки жесткой арматуры, не допускающей малых радиусов перегиба. Таким методом пропитки

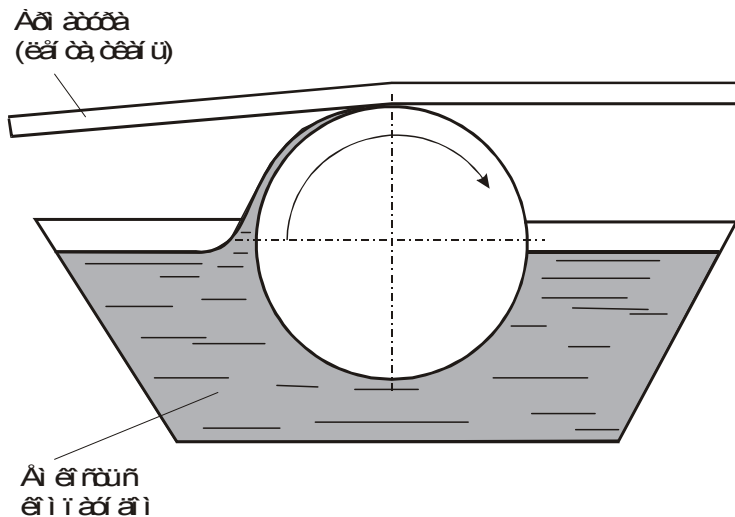


Рис. 5.26. Пропитка арматуры по методу «купающегося» ролика

тывают высокомодульные углеродные, борные и другие волокна [1]. Пропитка материала происходит за счет переноса связующего, захваченного вращающимся роликом.

Простым в реализации способом обработки армирующего материала является механическая принудительная пропитка в клиновидной камере или пропитка с помощью отжимного ролика (рис. 5.27). При использовании клиновидной камеры компаунд увлекается движущейся арматурой в клиновидную полость. За счет уменьшения размеров полости в сечении А-А возрастает давление (рис. 5.27, а). Увеличение давления способствует заполнению промежутков между элементами армирующего материала. В методе, схематически изо-

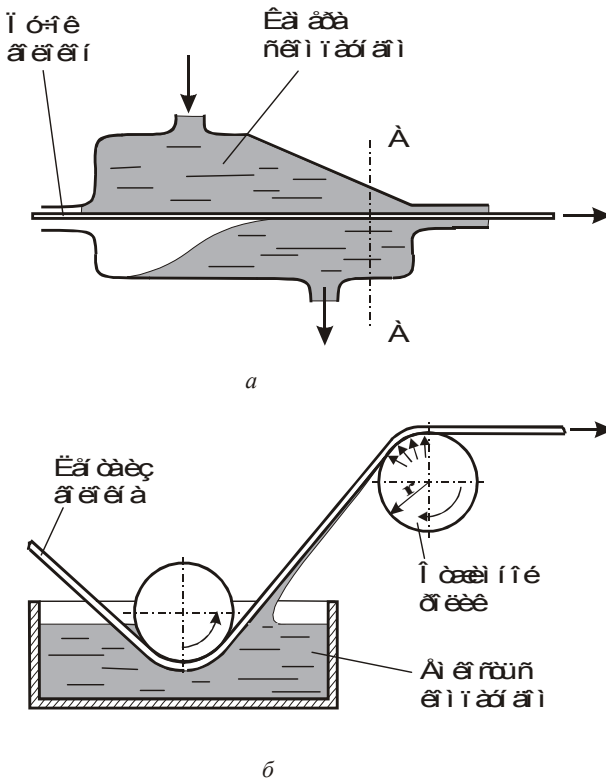


Рис. 5.27. Схемы механической принудительной пропитки арматуры при производстве изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки:

а – пропитка в клиновидной камере и б – с помощью отжимного ролика

браженном на рис. 5.27, б пропитка армирующего материала осуществляется за счет воздействия отжимного ролика на натянутую ленту. Величина давления на арматуру пропорциональна усилию натяжения ролика и обратно пропорциональна радиусу ролика. Чем больше давление, тем эффективнее реализуется процесс принудительной пропитки армирующего материала.

Более сложны процессы гидравлической принудительной пропитки и вакуумной пропитки арматуры. В первом случае из арматуры удаляется воздух и через нее под давлением, создаваемым насосом, прокачивается жидкое связующее. При реализации вакуумной пропитки арматуру помещают в вакуумную камеру, откачивают из нее воздух и запускают связующее. Жидкое связующее засасывается в промежутки между отдельными элементами армирующего материала.

Для того чтобы связующее легче попадало в промежутки между нитями, их необходимо отделить одну от другой. Схемы формирования ленты с отдельно расположенными нитями показаны на рис. 5.28.

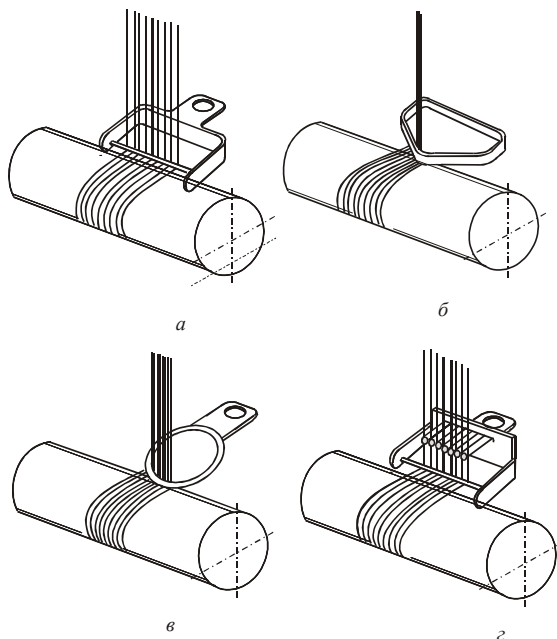


Рис. 5.28. Схемы формирования ленты из однонаправленных нитей:

а – прямым стержнем; б – изогнутым стержнем с прямыми плечиками;  
в – кольцом; г – гребенкой

Операции пропитки армирующего материала проводят с помощью пропиточных машин. На рис. 5.29 [1] представлена схема пропиточной машины, реализующей метод протягивания арматуры через жидкое связующее. Армирующий материал в виде жгутов, нитей или тканей сматывается со шпулярника, проходит через систему направляющих роликов, попадает в емкость со связующим. Затем пропитанный смолой армирующий материал поступает в сушильную шахту и прогревается в ней. В процессе прогрева из компаунда удаляются летучие вещества. Высушенный препрег

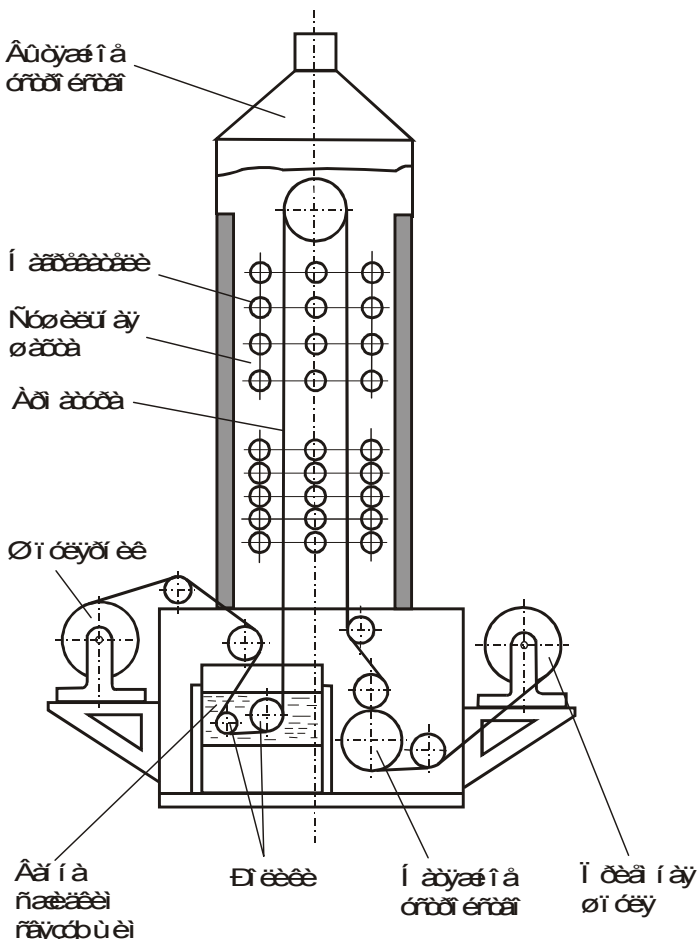


Рис. 5.29. Схема вертикальной пропиточной машины

пропускается через натяжное устройство и наматывается на приемную шпулю.

Одним из параметров, определяющих качество пропитки, скорость выполнения этой операции, соотношение между объемной долей волокна и матричного материала, является вязкость связующего. Снижение вязкости связующего способствует облегчению его проникновения между элементами арматуры, уменьшению слоя связующего на каждом волокне [5]. В результате увеличивается объемная доля арматуры в композиционном материале, а соответственно и его прочность.

Для снижения вязкости связующего и облегчения пропитки арматуры в него добавляют растворители или подогревают. Температура и время подогрева связующего должны тщательно контролироваться, так как несоблюдение режимов нагрева в результате ускорения процесса полимеризации может еще в большей степени увеличить вязкость материала. При подогреве связующего происходит образование сгустков, а также частичное отверждение материала [5]. Предварительный подогрев связующего в емкости снижает время его жизнеспособности. При использовании локального радиационного подогрева зоны пропитки арматуры (по методу купающегося ролика) время жизнеспособности связующего существенно не уменьшается.

### 5.5.2. КОНТАКТНОЕ ДАВЛЕНИЕ ФОРМОВАНИЯ ПРИ НАМОТКЕ АРМАТУРЫ

При формовании изделий методом намотки важным технологическим параметром является контактное давление, создаваемое натяжением арматуры, либо прижимными роликами. При намотке арматуры на цилиндрическую оправку радиусом  $R$  с натяжением  $T$  возникает радиальное контактное давление  $N$ . Это давление прижимает арматуру к поверхности и уплотняет материал. Величину  $N$  определяют по формуле [1]

$$N = (T/R) \sin^2 \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол намотки арматуры.

Из приведенной формулы следует, что с увеличением толщины наматываемого слоя, т. е. с увеличением  $R$  при постоянном натяжении  $T$  контактное давление  $N$  уменьшается. Чтобы в течение всего процесса намотки поддерживать постоянное контактное давление, усилие технологического натяжения  $T$  должно изменяться.



Результатом неравномерности давления по толщине наматываемого слоя является миграция связующего из более глубоких слоев к внешним. Это приводит к формированию материала с различной долей наполнителя. При механическом нагружении композита с неоднородной структурой слои материала включаются в работу неодновременно, что отрицательно сказывается на его механических свойствах. Выдавливание связующего из глубинных слоев характерно для метода «мокрой» намотки арматуры. При получении полимерных композиционных материалов по методу «сухой» намотки во время предварительной подсушки ленты в нагревательной камере происходит удаление растворителя из компаунда и частичная полимеризация термореактивного связующего. Поэтому в процессе намотки препрега на оправку связующее из нижних слоев в верхние почти не выдавливается [5].

Основной задачей операции натяжения волокон (нитей) является их выравнивание перед намоткой. Это позволяет одновременно включить большинство волокон композиционного материала в работу при его механическом нагружении. Для однонаправленных стеклопластиков оптимальным усилием натяжения нити является  $q_n = (0,05 \dots 0,15)q_{раз}$ , для органопластиков –  $q_n = (0,25 \dots 0,36)q_{раз}$ , для углепластиков –  $q_n = (0,02 \dots 0,07)q_{раз}$ , где  $q_{раз}$  – разрушающая нагрузка [5].

Натяжение нитей обеспечивается в нитепроводном тракте (на пути от шпулярика до изделия). Усилие натяжения создается всеми элементами нитепроводного тракта. В то же время используются специальные устройства – натяжители. Технологическое натяжение арматуры в процессе намотки создают натяжными устройствами различного типа. На рис. 5.30,а показано устройство типа восьмерки [1]. Лента или нить скользит по поверхности тормозных роликов. На преодоление трения затрачивается некоторая сила. Если изменить положение одного из тормозных роликов по отношению к другому, то в этом случае зона контакта армирующего материала с роликами изменится ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ). Соответственно изменится и сила натяжения ленты. Схемы других устройств, используемых для натяжения арматуры, показаны на рис. 5.30,б-г. Регулируют натяжение в этих устройствах тормозные механизмы (рис. 5.30, б) или нажимные грузики (рис. 5.30, в, г). Механические натяжители обеспечивают натяжение элементов арматуры с точностью  $\pm 0,2$  кг [5]. Тормозные устройства регулируют величину натяжения на шпулях. Уменьшение радиуса паковки приводит к возрастанию усилия натяжения. Регулируют величину натяжения специальными программными устройствами.

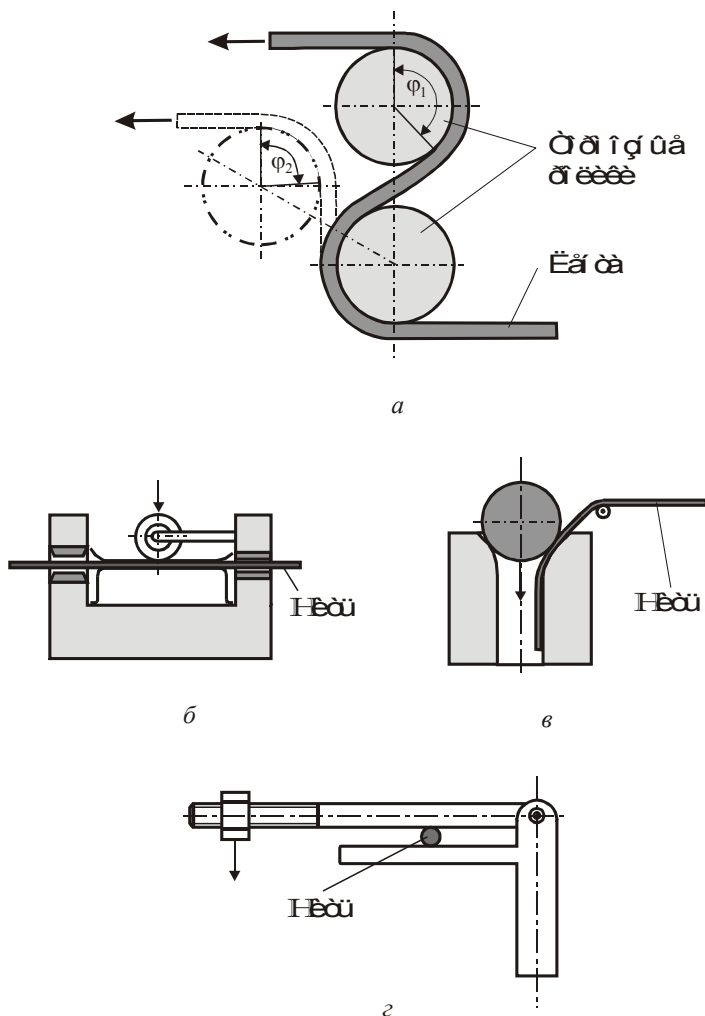


Рис. 5.30. Схемы устройств, используемых для натяжения лент или нитей [1, 5]

При намотке арматуры важно обеспечить локальный прижим материала. Эта задача возникает в тех случаях, когда усилия натяжения оказываются недостаточно для обеспечения монолитности получаемого композиционного материала. В основе метода локального прижима лежит формирование слоя с помощью прижимных роликов (рис. 5.31). Этот метод позволяет уплотнять толстостенные изделия. Для изделий малого диаметра применяют локальный

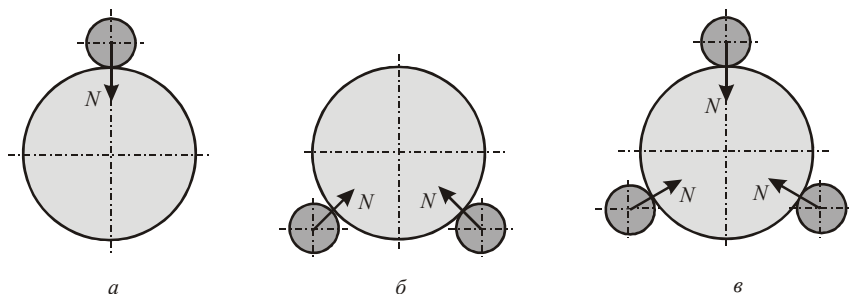


Рис. 5.31. Схема формования полимерных композиционных материалов по методу намотки с использованием локального прижима армирующего материала:

а – прижим одним роликом; б – прижим двумя роликами; в – прижим тремя роликами; N – усилие прижима

прижим одним роликом (рис. 5.31, а). С увеличением диаметра наматываемого изделия могут применяться двух- и трехроликовые прижимы (рис. 5.31, б, в).

### 5.5.3. ОТВЕРЖДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Характер отверждения полимерного материала определяется его природой. Отверждение термореактивных смол происходит при их нагреве. Важнейшей технологической особенностью этих материалов является то, что процесс их отверждения необратим. Режим отверждения полимерного композиционного материала определяется типами связующего и отвердителя, а также геометрией и массой получаемого изделия. Типичный график термической обработки полимерного композиционного материала на основе эпоксидного связующего представлен на рис. 5.32. Во время прогрева материала отверждение полимера ускоряется, в смоле происходит необратимая сшивка молекул, формируется сетчатая структура. Если необходимо получить изделие со стенками большой толщины, то в этом случае процесс полимеризации связующего развивается во времени неравномерно. Эта неоднородность связана с низкой теплопроводностью полимерных композиционных материалов. Более нагретые наружные слои материала полимеризуются в первую очередь, в то время как остающиеся менее прогретыми глубинные слои – позднее. В результате неоднородной полимеризации крупных изделий возможно образование дефектов в виде расслоений [5].

Недостатками печного прогрева термореактивных полимеров являются низкая производительность процесса, неэффективная загрузка печей, низкое качество материала при обработке крупно-

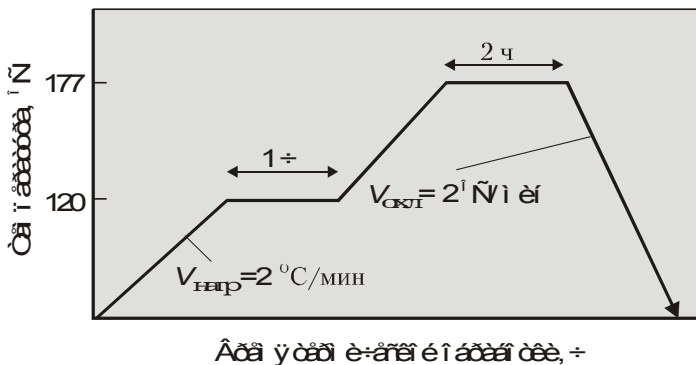


Рис. 5.32. Типичная кривая термической обработки полимерного композита на основе эпоксидного связующего [5]

габаритных изделий. Устранению этих недостатков способствует разогрев полимеров под действием сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Для ускорения процесса полимеризации и связующее могут быть добавлены катализаторы.

Для отверждения некоторых типов смол необходимо обеспечить не только прогрев материала, но также и давление на формуемую поверхность. Рекомендуемая величина избыточного давления составляет  $\sim 0,35 \dots 0,7$  МПа [5]. Передача давления на поверхность изделия осуществляется в автоклаве, при реализации технологии формирования с эластичной диафрагмой, при формировании с обжатием термоусаживающейся лентой, при формировании под действием теплового расширения. Избыточное давление, передаваемое на поверхность формируемого изделия, создает монолитную структуру композита, повышает физико-механические свойства материала.

Отверждение термопластичных полимеров происходит при их охлаждении (например, до комнатных температур). При последующем разогреве термопластичный материал снова размягчается.

#### 5.5.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НАМОТКИ АРМАТУРЫ НА ОПРАВКИ

По кинематическому признаку различают токарную, шлифовальную и обмоточную схемы намотки [1]. При токарной схеме главным движением служит вращение оправки, а движение подачи параллельно оси изделия осуществляет паковка с арматурой. Для реализации этого способа могут быть использованы модернизированные токарные станки (рис. 5.33, а) [1]. Шлифовальная схема предусматривает сообщение движения подачи вращающейся оп-

равке. При обмоточной схеме (рис. 5.33, б) паковки с армирующим материалом устанавливают на вертлюге, вращение которого служит главным движением. Движение подачи осуществляется продольным перемещением оправки. Чтобы стабилизировать усилие натяжения и улучшить качество намотки, в этой схеме применяют направляющие ролики, или пальцы. При намотке с направляющим пальцем изменение диаметра паковки на величине натяжения арматуры не отражается.

По типу укладки армирующих волокон различают несколько методов намотки материала на оправки [5]:

- 1) прямая (окружная);
- 2) спирально-винтовая (тангенциальная, кольцевая);
- 3) спирально-перекрестная (спирально-продольная, спирально-поперечная);

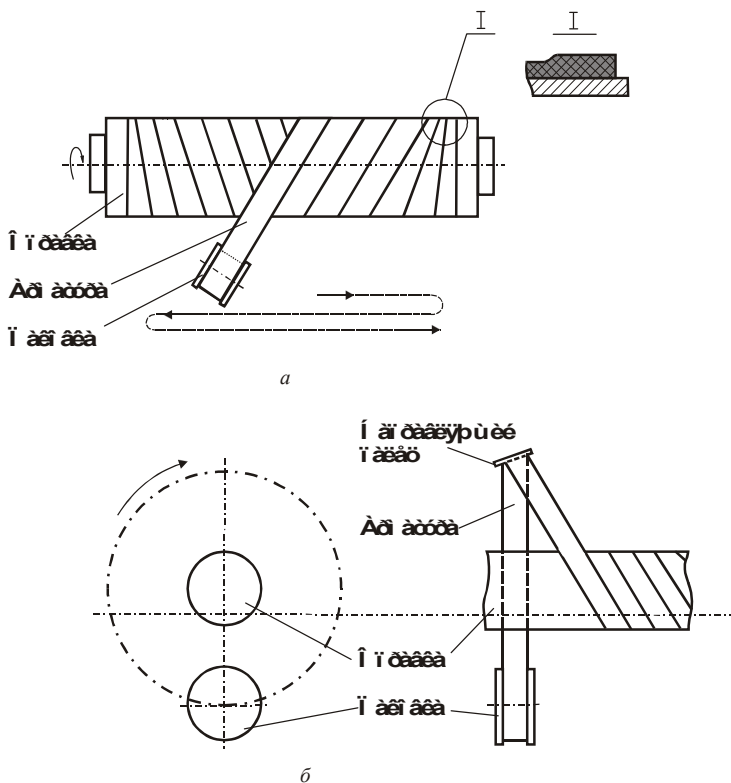


Рис. 5.33. Намотка труб из полимерных композиционных материалов по токарной (а) и обмоточной (б) схемам

- 4) совмещенная спирально-кольцевая;
- 5) продольно-поперечная;
- 6) косослойная продольно-поперечная;
- 7) планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная);
- 8) тетранамотка;
- 9) зональная намотка.

Выбор типа укладки арматуры и метода ее намотки определяется многими факторами, в том числе условиями работы изделия, его конструкцией, габаритами, количеством изделий в серии и др. Крупногабаритные цилиндрические конструкции рекомендуется изготавливать методом окружной намотки из предварительно пропитанных тканых материалов [5]. Для изготовления труб большого диаметра может быть использован способ продольно-поперечной намотки лент из однонаправленных волокнистых материалов. Некоторые из особенностей реализации различных способов намотки арматуры отражены в следующих разделах.

#### 5.5.4.1. Прямая (окружная) намотка

В качестве материала для прямой намотки обычно используют предварительно пропитанные связующим тканые ленты или ткани. Схема прямой намотки армирующего материала на цилиндрическую оправку показана на рис. 5.34. Ширина наматываемой ленты может соответствовать длине получаемой оболочки. Если ширина

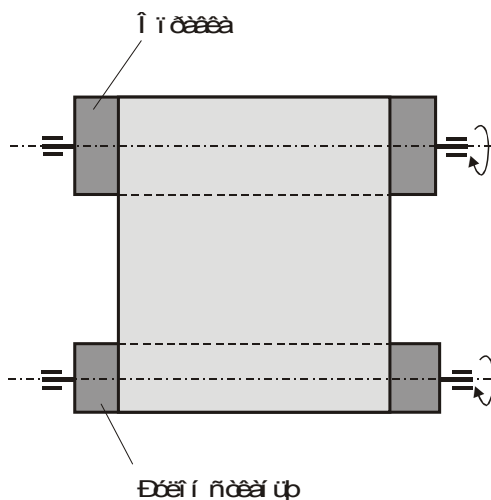


Рис. 5.34. Схема прямой намотки

ленты намного меньше длины получаемого изделия, могут быть применены намоточные станки с несколькими узлами раскладки. Окружная намотка может быть реализована на модернизированных токарных или шлифовальных станках.

#### 5.5.4.2. Спирально-винтовая (кольцевая, тангенциальная) намотка

При реализации метода спирально-винтовой намотки тканая лента или лента из однонаправленного волокнистого материала укладывается на поверхность оправки по винтовой линии. Укладка витков осуществляется либо встык друг к другу, либо с некоторым постоянным нахлестом. Соответственно за один проход наматывается один слой материала (рис. 5.35, а), равный толщине ленты, либо за один проход раскладывающего устройства формируется многослойная структура (рис. 5.35, б).

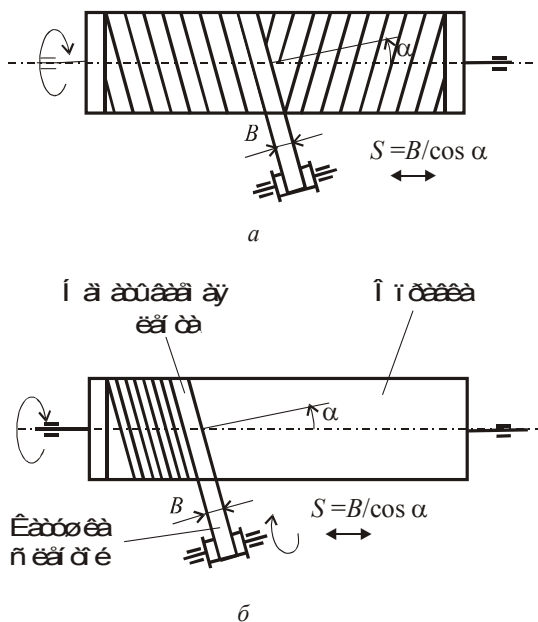


Рис. 5.35. Схемы спирально-винтовой намотки ленты на оправку:  
а – намотка в один слой за один проход; б – многослойная намотка за один проход

Метод спирально-винтовой намотки широко используют для получения изделий цилиндрической формы. Часто его применяют в тех случаях, когда требуется обеспечить повышенную прочность и жесткость локальных участков на деталях типа труб.

#### 5.5.4.3. Спирально-перекрестная намотка

Схема выполнения спирально-перекрестной намотки ленты приведена на рис. 5.36 [5]. Лента наматывается на оправку с подачей  $S$ , которая в целое число раз превышает ширину ленты  $B$ . Спирально-перекрестный виток формируется за прямой и обратный ход раскладывающего устройства вдоль оправки. При этом на оправке лентой закрывается часть поверхности. При выполнении следующего прохода лента присоединяется встык к виткам, полученным во время первого прохода, и т. д. Постепенно лентой закрывается вся поверхность оправки и формируется полный двойной слой. Количество наматываемых слоев определяется требованиями к толщине изделия. Метод широко используется при изготовлении изделий, имеющих форму цилиндров, конусов, баллонов давления. Степень использования прочностных свойств арматуры при выполнении данного метода намотки регулируется путем изменения угла намотки. Возможны способы намотки, обеспечивающие сочетание спиральных витков с продольными (спирально-продольная намотка) и спиральных витков с укладкой кольцевых слоев (спирально-поперечная намотка).

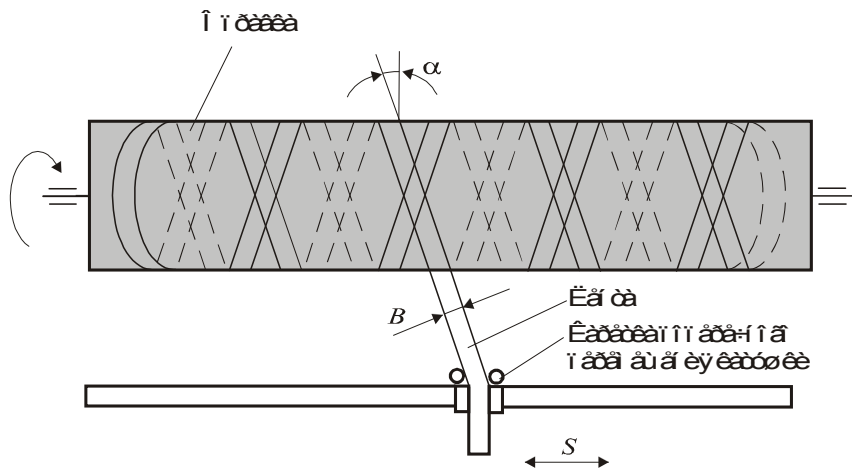


Рис. 5.36. Схема спирально-перекрестной намотки ленты



#### 5.5.4.4. Совмещенная спирально-кольцевая намотка

Для реализации метода совмещенной спирально-кольцевой намотки ленты на оправку наматываются одновременно с двух раскладывающих устройств (рис. 5.37). Одно из них обеспечивает спиральную намотку арматуры, другое – намотку кольцевых слоев. Движения раскладывающих устройств согласованы со скоростью вращения оправки. Оба движения начинаются и заканчиваются одновременно. Методом совмещенной спирально-кольцевой намотки могут быть получены изделия цилиндрической формы, а также конические изделия с углом конусности не более  $20^\circ$  [5]. Применение этого метода позволило автоматизировать процесс намотки, на 35...40 % увеличить производительность процесса. Недостаток метода – большое количество пересечений ленты, т. е. нарушение регулярности структуры получаемого материала. Соотношение между количеством спиральных и кольцевых слоев зависит от условий работы изделия, получаемого методом спирально-кольцевой намотки.

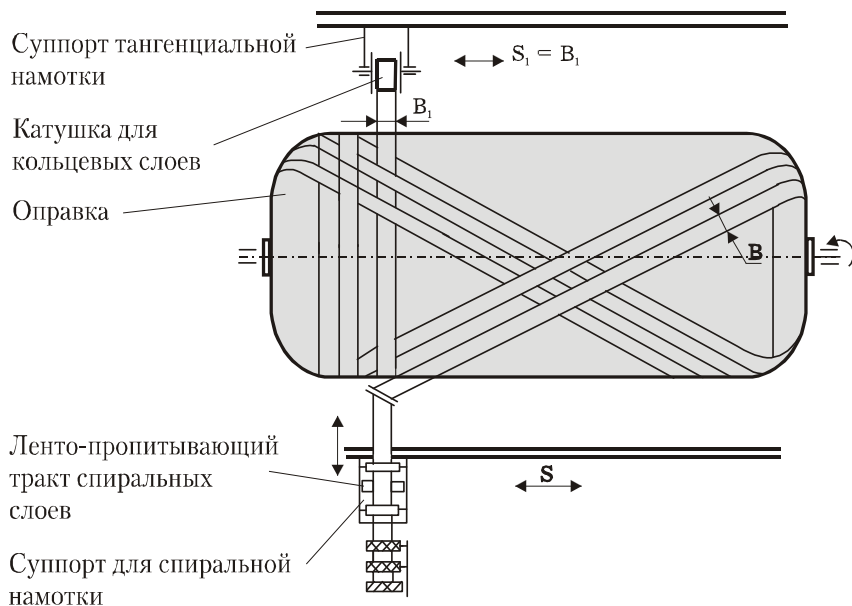


Рис. 5.37. Схема совмещенной спирально-кольцевой намотки ленты на оправку:  
 $S$  – подача

### 5.5.4.5. Продольно-поперечная намотка

Продольно-поперечная намотка предполагает укладку волокон в продольном направлении и намотку спирально-винтовых слоев. Схема реализации этого способа отражена на рис. 5.38 [5]. Продольные ленты поступают на оправку со шпуль, расположенных по периметру вертлюга – дорна. Вертлюг и оправка вращаются синхронно. С катушки кольцевой ленты по методу спирально-винтовой намотки укладываются кольцевые слои арматуры. Эти

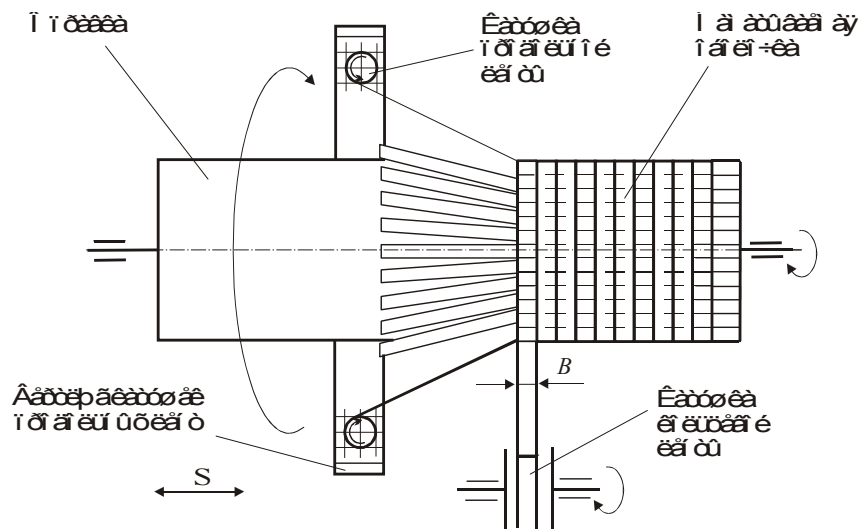


Рис. 5.38. Схема продольно-поперечной намотки:

$S$  – величина подачи,  $B$  – ширина ленты

слои фиксируют уложенные ранее продольные ленты. Данный метод обычно реализуется по схеме «сухой» намотки арматуры. Методом продольно-поперечной намотки изготавливают трубы, удилица, лыжные палки и др. [5].

### 5.5.4.6. Косослойная продольно-поперечная намотка

Метод косослойной продольно-поперечной намотки предусматривает следующее. На оправку по спирально-винтовой траектории с малым шагом укладывают псевдоленту, образованную из продольных пряжей и нитей осевого армирования (рис. 5.39). Таким образом, изделие, формируемое анализируемым методом, яв-

ляется многослойным. Набор необходимой толщины, как правило, производится за один ход раскладывающего устройства вдоль оси оправки.

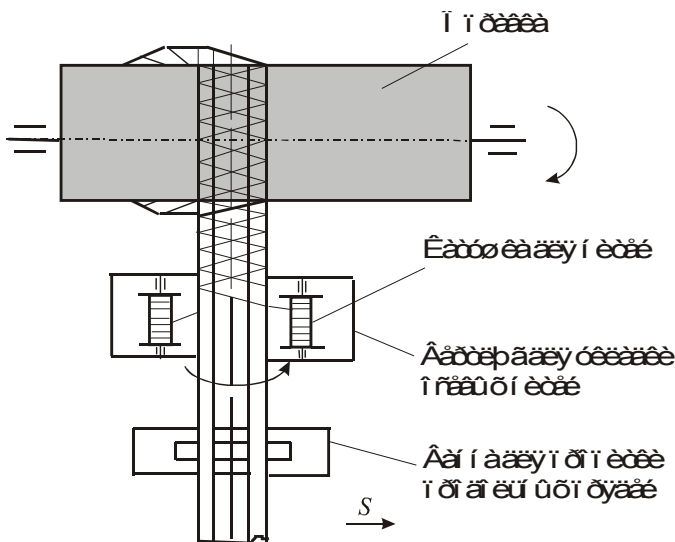


Рис. 5.39. Схема косослойной продольно-поперечной намотки волокна

Продольные пряди предварительно пропитываются связующим («мокрым» способом). Нити осевого армирования наматываются на псевдоленту с помощью вертлюга. Пропитка этих нитей осуществляется излишками связующего, оставшегося на продольных прядях.

Особенности реализации данного метода намотки, в частности формирование необходимой толщины за один ход раскладывающего устройства, делают его перспективным для изготовления длиномерных изделий, например труб.

#### 5.5.4.7. Планарная намотка (полюсная, орбитальная, плоскостная намотка) арматуры при производстве полимерных композитов

При осуществлении метода планарной намотки в качестве арматуры используют пряди нитей, ленту, жгуты. Виток арматуры укладывают на неподвижную оправку под малым углом относительно продольной оси (рис. 5.40). Угол наклона зависит от диа-

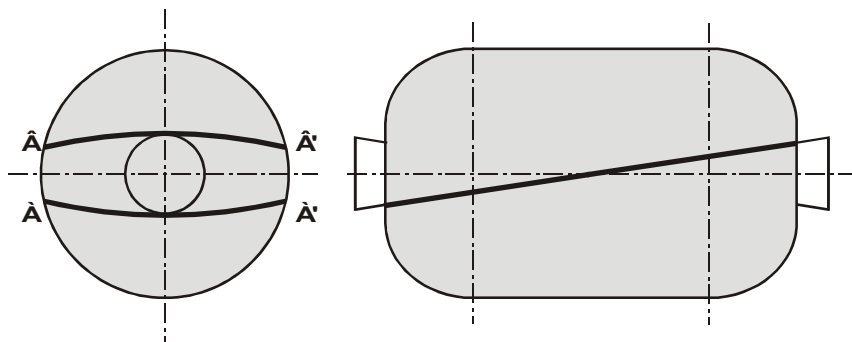


Рис. 5.40. Однослойная полюсная намотка

метров полюсных отверстий на оправке [5]. При орбитальной намотке оправка неподвижна, а раскладчик вращается относительно нее. Возможен вариант, когда неподвижным является раскладчик арматуры. После намотки одного витка оправка поворачивается на величину, соответствующую ширине ленты. Постепенно витки ленты укладываются встык один к другому и покрывают всю поверхность оправки. Формируют слой витки двух сложений, направленные в противоположные стороны. На рис. 5.41 приведена схема намотки, сочетающей планарную намотку с кольцевой.

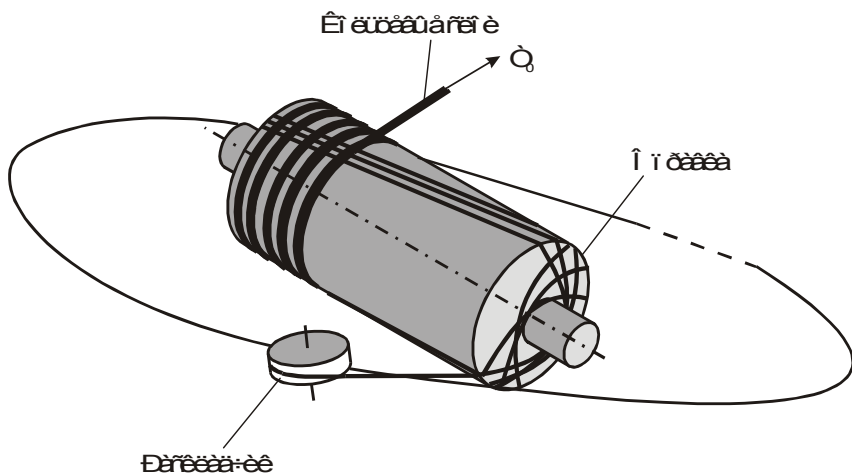


Рис. 5.41. Схема орбитальной намотки в сочетании с кольцевой подмоткой арматуры по цилиндрической части оправки

#### 5.5.4.8. Тетранамотка арматуры

Тетранамотка позволяет сформировать из полимерных композиционных материалов элементы конструкций, хорошо воспринимающие действие сжимающих напряжений и обеспечивающие изгибную жесткость. Такие задачи часто возникают при изготовлении отсеков летательных аппаратов [5]. Пример такой конструкции с сетчатой структурой, полученной методом тетранамотки, приведен на рис. 5.42. Процесс изготовления изделий методом тетранамотки иллюстрирует рис. 5.43. В качестве технологической оснастки используется металлическая оправка. На нее надевают резиновый чехол с прорезанными канавками. Геометрия и расположение канавок соответствуют схеме армирования, предусмотренной конструктором. На торцовых частях металлической оправки закрепляют технологические штыри. С помощью раскладчика в канавки резинового чехла укладывают арматуру, которую закрепляют на технологических штырях. После того как тетранамотка арматуры закончена, кольцевыми витками проводят подмотку оправки в зоне технологических штырей. После отверждения полученного изделия

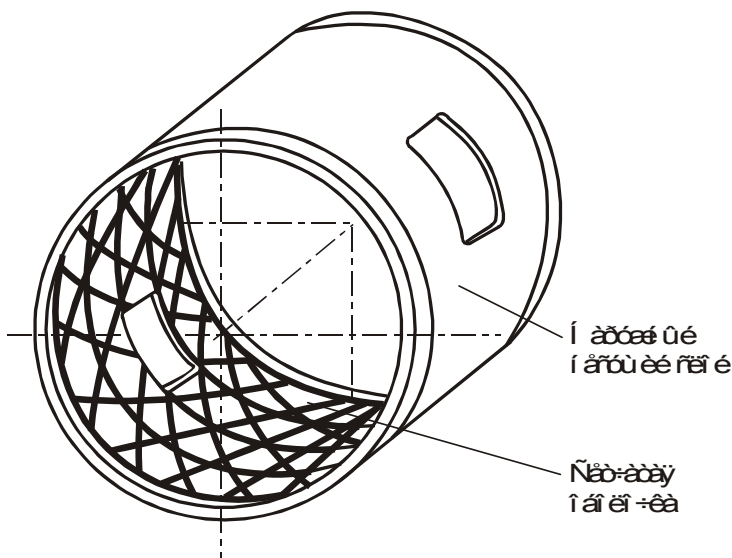


Рис. 5.42. Конструкция корпуса с сетчатой структурой, сформированной тетранамоткой арматуры

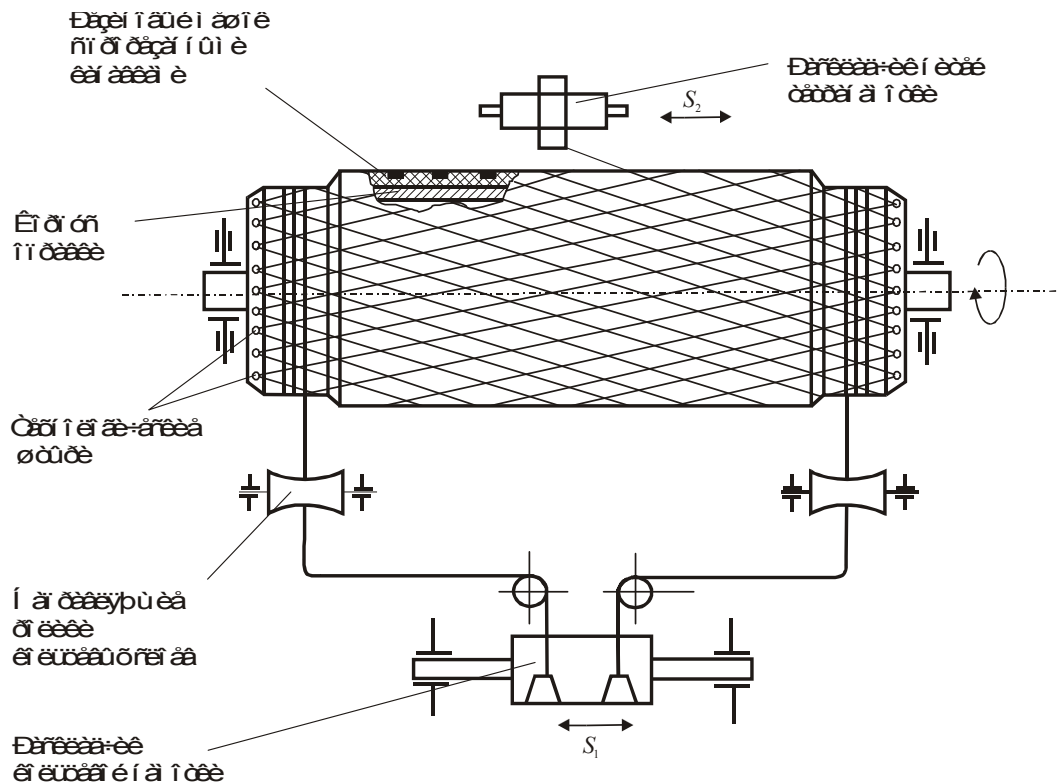


Рис. 5.43. Схема тетранамотки

на токарном станке с торцов оправки обрезают технологические припуски. Изделие снимают с оправки и изнутри вынимают резиновый чехол.

#### 5.5.4.9. Зональная намотка

Метод зональной намотки преимущественно применяется для изготовления сосудов сферической формы. Этот метод может быть отнесен к технологии полюсной намотки [5]. Отличительной особенностью является зональное движение оправки. В результате на изделия формируются четко выраженные зоны (рис. 5.44).

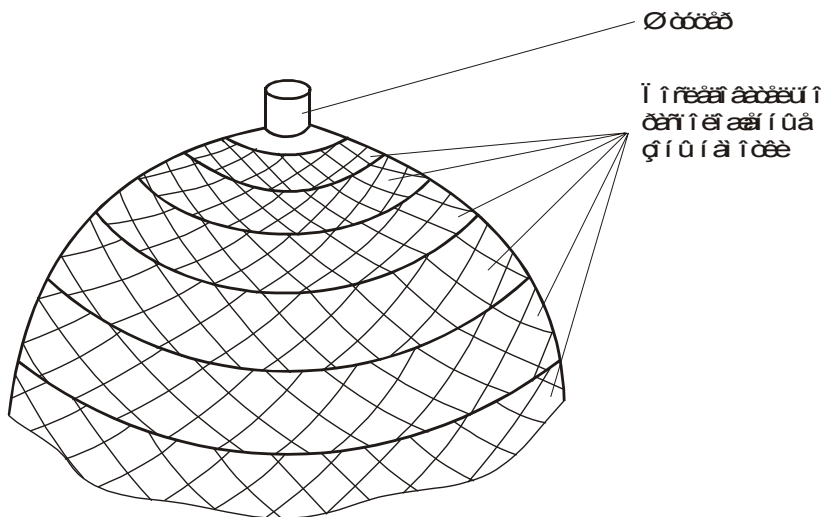


Рис. 5.44. Общий вид сферического сосуда, изготовленного по схеме зональной намотки [5]

#### 5.5.5. СТАНКИ ДЛЯ НАМОТКИ АРМИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

Для получения деталей из полимерных композиционных материалов методами намотки разработано большое количество технологического оборудования. Современные намоточные станки позволяют изготавливать изделия разнообразной формы, в том числе цилиндрической, сферической, овальной, конической, комбинированной (рис. 5.45) [1]. Разработаны устройства для получения намоткой изделий квадратного или прямоугольного сечения с покрытием нитью всех шести граней. В табл. 5.3 приведены технические

## Технические характеристики отечественных станков спиральной и продольно-поперечной намотки

Наименование параметра	РПП-380 Т400	ССППН Т250М	НК-9ПУ	НК-10ПУ	НК-11ПУ	СНП-2	СНП-4М КУ-319	КУ-320	КУ-421
Максимальный диаметр наматываемого изделия, мм	380	1000	500	1600	2500	700	2000	2500	2500
Максимальная длина наматываемого изделия, мм	3500	4000	2000	4000	10000	2200	6300	7000	9000
Углы намотки, град	10-90	30-90	10-90	5-90	5-90	12-90	10-90	10-90	10-90
Точность укладки, мм	1,5	–	–	–	–	2	2	2	2
Максимальная скорость перемещения каретки, м/мин	160	–	24	30	30	12	12	12	12
Количество управляемых координат, шт.	2	2	5	5	5	5	5	5	5
Максимальная масса оправки с изделием, кг	800	3000	–	–	–	1000	16000	8000	23000
Максимальная ширина сформированной ленты, мм	200	200	25	–	–	15	80	80	80 (120)
Максимальное натяжение ленты, Н	600	2000	500	–	–	300	2000	1200	250 (300)
Габаритные размеры, мм									
длина	5600	8100	6420	–	–	5000	16000	16000	22300
ширина	6930	4450	4050	–	–	2000	6000	9000	7500
высота	1950	2200	1690	–	–	1900	3500	3500	3500
Масса станка, кг	2200	10000	3500	–	–	13000	55000	66000	77000



характеристики отечественных станков для спиральной и продольно-поперечной намотки арматуры [5].

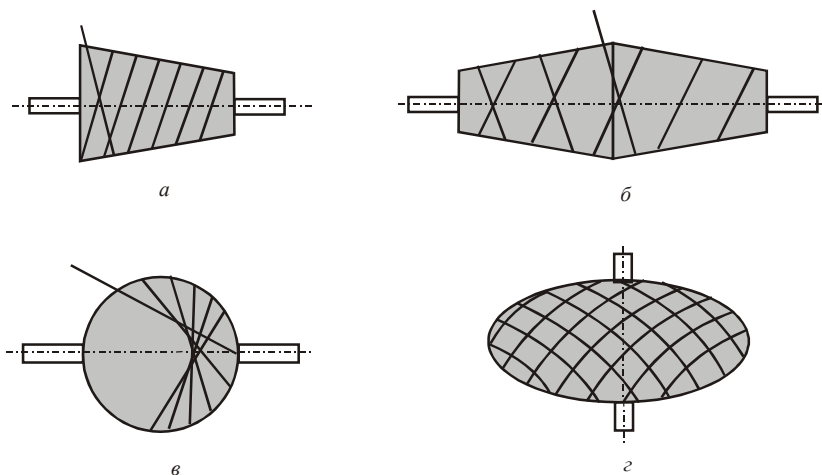


Рис. 5.45. Формы оправок, используемых при получении ПКМ методом намотки: а, б – с коническими поверхностями; в – сферическая; г – овальная

На рис. 5.46 [5] приведена схема пятикоординатного станка для спиральной намотки арматуры. На приведенной схеме главным движением является вращение оправки. Кроме того, каретка станка с закрепленным на ней нитераскладчиком может совершать возвратно-поступательное движение в направлениях  $x$  (параллельно

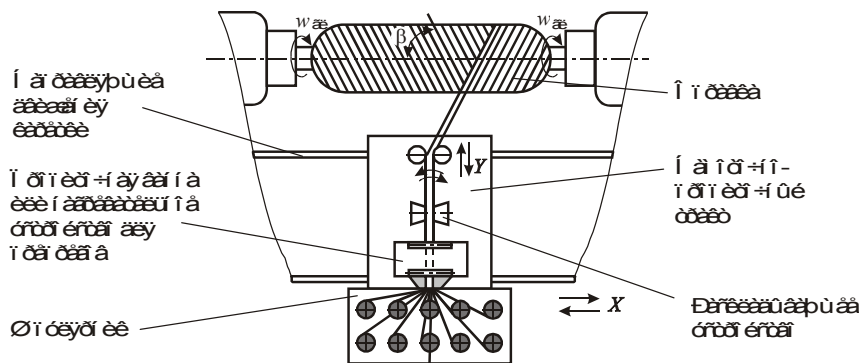


Рис. 5.46. Кинематическая схема 5-координатного станка для спиральной намотки арматуры

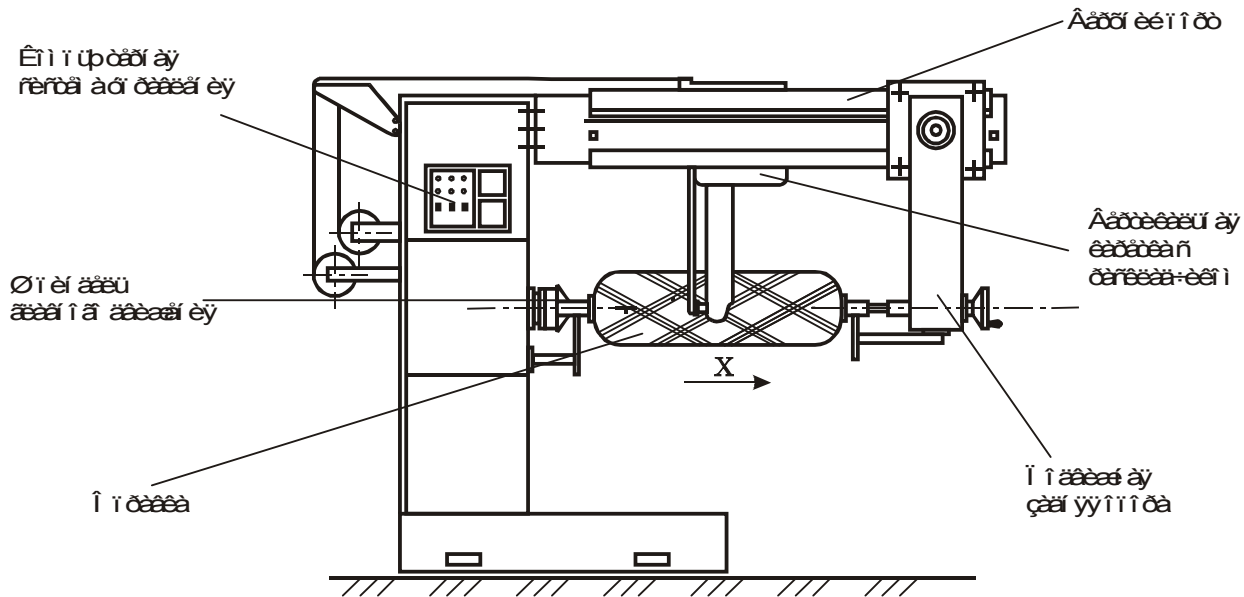


Рис. 5.47. Схема устройства намоточного станка portalного типа

оси оправки) и  $y$  (перпендикулярно оси оправки). Возможен разворот раскладывающего ролика по крену, тангажу и углу рыскания. В зависимости от выбора технологических параметров может быть получен тот или иной рисунок намотки арматуры.

Одним из современных конструкторских решений при разработке намоточных станков, реализующих спиральную схему намотки арматуры, является конструкция станка портального типа. На рис. 5.47 [5] приведена схема станка такого типа. Современные намоточные станки оснащаются системами компьютерного управления, позволяющими производить быструю перенастройку устройств, наматывать арматуру на оправки, имеющие сложную геометрию. Такие станки отличаются высокой производительностью.

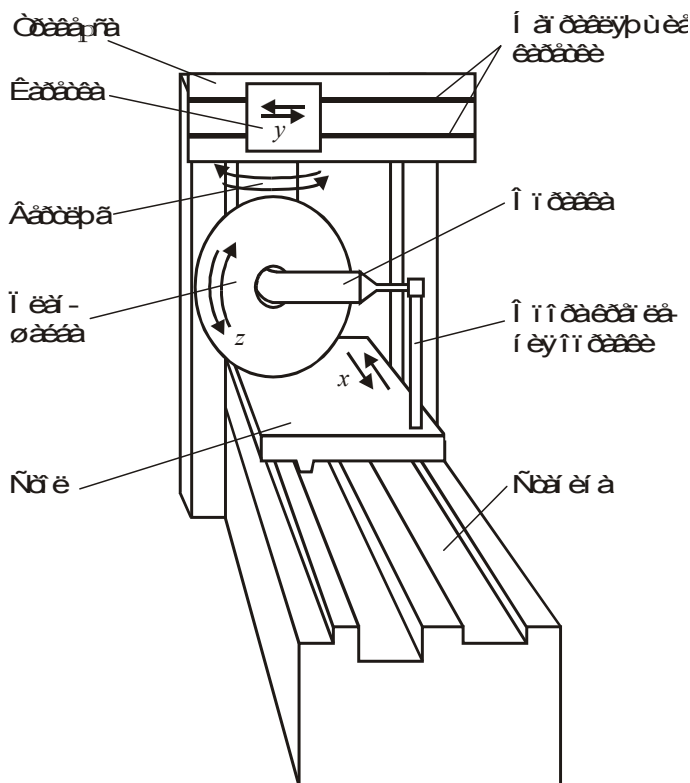


Рис. 5.48. Схема станка СНП-3, используемого для намотки изделий с кривой продольной осью

На рис. 5.48 [5] приведена схема отечественного станка СНП-3, позволяющего производить намотку арматуры на оправки, имеющие кривые продольные оси. Оправка во время работы станка остается неподвижной. Нитераскладчик вращается вокруг нее. Станок оснащен раздельными приводами. С их помощью осуществляются движения по четырем координатам. Стол с установленной на нем оправкой перемещается в направлении  $x$ . Каретка с закрепленным на ней наматывающим устройством перемещается в направлении  $y$ . Планшайба с бобиной вращается вокруг оправки. Кроме того, вертлюг с закрепленной на нем планшайбой может вращаться вокруг вертикальной оси.

Достаточно часто возникает задача намотки арматуры на оправки сферической формы. Для ее реализации разработаны специальные намоточные станки. В качестве примера на рис. 5.49 приведена схема выполнения зональной намотки сферической оболочки на отечественном станке СН-6 [5]. Сферическая оправка закреплена на двух синхронно вращающихся секторах. Вращение секторов является главным движением станка (движение  $\omega_{\text{пл}}$ ). Кроме главного движения в процессе намотки реализуется полярное вращение оправки (движение  $\omega_{\text{пол}}$ ). За один оборот оправки вокруг своей оси арматурой наматывается одна зона. После намотки каждой зоны происходит ручная перенастройка станка для намотки следующей зоны (движение  $\omega_{\text{зон}}$ ).

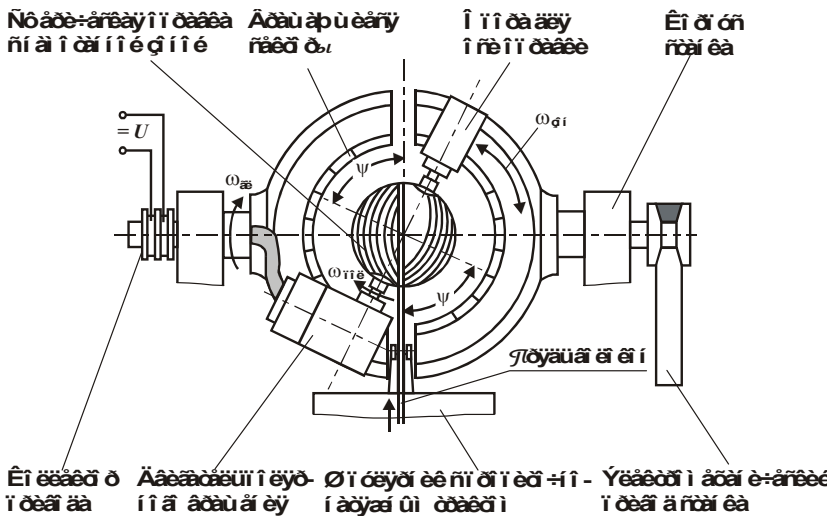


Рис. 5.49. Схемы зональной намотки сферической оболочки на станке СН-6

### 5.5.6. ОПРАВКИ ДЛЯ НАМОТКИ АРМАТУРЫ

Оправки представляют собой важнейшие элементы технологической оснастки, используемой при производстве изделий из полимерных композитов по методу намотки. К оправкам предъявляются следующие требования [5]:

1) оправка должна иметь гладкую и ровную поверхность, соответствовать геометрии и форме внутренней конфигурации получаемого изделия;

2) оправка должна быть прочной и жесткой (не прогибаться, не сжиматься во время намотки);

3) оправка не должна проскальзывать на валу;

4) оправка при необходимости должна легко удаляться после отверждения изделия;

5) оправка должна при необходимости позволять установить закладные элементы.

Оправки, используемые для намотки арматуры, делятся на цельные, разборные и разрушаемые [5]. В некоторых случаях используются комбинированные оправки, включающие элементы одноразового и многократного применения.

Неразборные многоразовые оправки обычно применяют при изготовлении изделий типа цилиндров, конусов, полусфер диаметром до 500 мм. Материалом для изготовления цельных оправок, как правило, служат алюминиевые сплавы и стали. Перед намоткой арматуры поверхность оправки покрывается слоем антиадгезионного материала. Для того чтобы облегчить извлечение цилиндрической оправки из отвердевшего изделия, ее выполняют с небольшим технологическим уклоном (1:100...1:200). Мелкие оправки могут быть извлечены вручную. Для удаления из изделий крупногабаритных оправок применяют специальные станки – кабестаны [5].

В тех случаях когда форма изделия не позволяет извлечь оправку, она может быть выполнена в виде разборной конструкции. Такое решение подходит для изготовления цилиндрических оболочек с днищами, сферических оболочек с большим диаметром полюсных отверстий. Разборные оправки обычно выполняются из металлических сплавов. На рис. 5.50 приведена схема разборной металлической оправки, предназначенной для изготовления цилиндрического сосуда с полусферическими днищами [5]. В днищах сосуда предусмотрены отверстия.

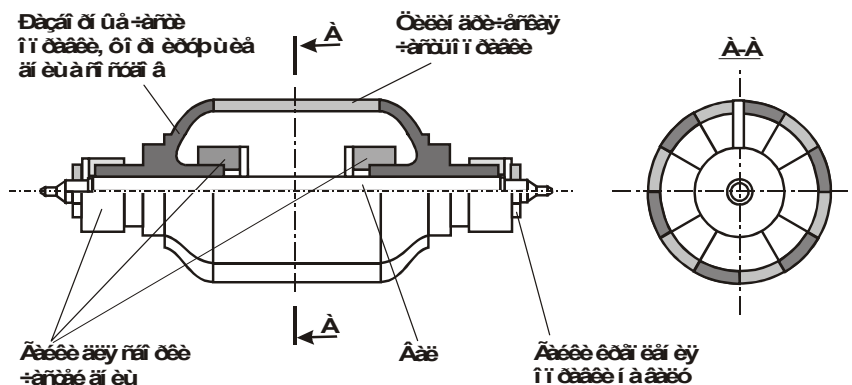


Рис. 5.50. Конструктивная схема металлической оправки

Оправка состоит из вала и собранных вокруг нее элементов – секторов. Оправка разделена на три части, соответствующие левому и правому днищу и цилиндрической части изделия. Каждая часть оправки состоит из тринадцати секторов, один из них является плоским. Секторы, которые формируют днища, устанавливаются в посадочных местах вала. После их установки из отдельных секторов собирают цилиндрическую часть оправки. Затем с помощью гаек всю оправку соединяют в жесткую конструкцию. После намотки изделия и его отверждения оправку необходимо извлечь. Для этого освобождают центральный вал и через отверстия в днищах извлекают его. Благодаря тому что в каждой части оправки один сектор плоский, оправка легко разбирается на отдельные элементы. Эти элементы поштучно извлекаются из изделия через отверстия.

Разборные оправки дороги, поэтому рационально применять их при серийном изготовлении изделий. Такие оправки рекомендуется использовать при изготовлении крупногабаритных изделий диаметром от 500 до 1500 мм [5].

В тех случаях когда контур изделий близок к замкнутому, используют разрушаемые оправки. Для изготовления разрушаемых оправок применяют такие материалы, как гипс, эвтектические соли, легкоплавкие металлы, парафиновые смеси, песчаные смеси. Оправки из этих материалов получают методами литья или прессования в специальных пресс-формах. Из отвердевших изделий оправки удаляют механическим разрушением, вымыванием, выплавлением, растворением в соответствующих жидкостях.

## 5.6. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ

Пултрузия – это технологический процесс производства изделий из полимерных композиционных материалов, основанный на непрерывном протягивании армирующего материала, пропитанного связующим, через нагретую фильеру [5]. Рабочее отверстие фильеры соответствует форме получаемого изделия. Схема процесса пултрузии показана на рис. 5.51 [5]. На этом же рисунке приведены формы сечений изделий, получаемых с использованием пултрузии.

В качестве армирующего материала при реализации технологии пултрузии используются нити, жгуты, тканые ленты. Арматура поступает со шпулярника в ванночку со связующим, пропитывается смолой и через направляющие ролики протягивается в матрицу предварительного формования, где материал постепенно приобретает контуры будущего изделия (по сечению). Из матрицы предварительного формования заготовка перемещается в обогреваемую пресс-форму. В ней окончательно формируется изделие нужного сечения и происходит полимеризация связующего. Окончательное отверждение материала производится в печи. На последнем этапе изделие режется на отрезки необходимой длины.

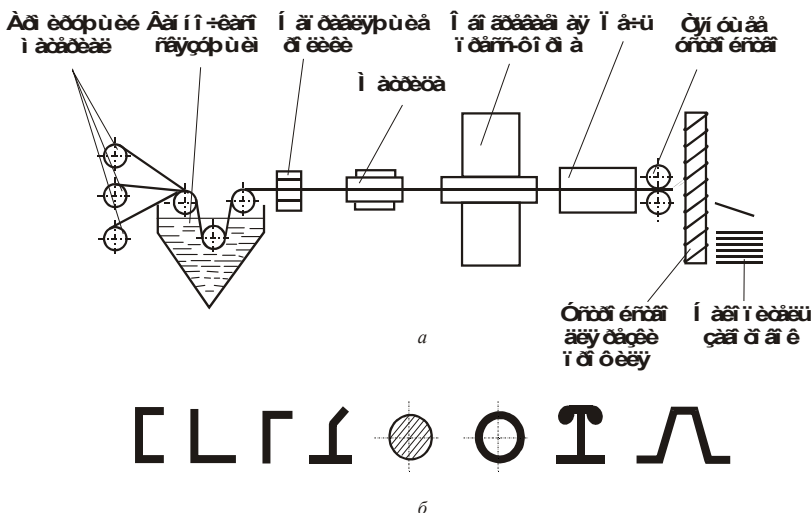


Рис. 5.51. Изготовление изделий из полимерных композиционных материалов по методу пултрузии  
а – схема установки; б – формы профилей

В отличие от экструзии при пултрузии изделие не продавливается через фильеры, а вытягивается путем прикладывания тянущего усилия. Усилие вытягивания обеспечивается тянущим устройством. В пултрузионных установках используются тянущие устройства различного типа [5]:

- ременные или гусеничные устройства со сменными траками (под каждый типоразмер изделия);
- непрерывные возвратно-поступательные устройства;
- прерывистые возвратно-поступательные устройства.

Пропитка армирующего материала при пултрузии может осуществляться в ванночке со связующим, расположенной до матрицы предварительного формования, как показано на рис. 5.51. Второй способ получения изделий заключается в предварительном формовании профиля сухими волокнами и последующей его пропитке в формующей фильере. Важным этапом в технологии пултрузии является отверждение изделий. Продолжительность этого этапа определяет производительность процесса пултрузии. В зависимости от типа связующего и толщины получаемых изделий скорость вытягивания профиля составляет  $\sim 0,6 \dots 1,5$  м/мин [5]. Этап отверждения термореактивных матриц реализуется в туннельных термических камерах при использовании внешних нагревателей или непосредственно в формующей фильере при обработке материала электромагнитным полем сверхвысокой частоты (рис. 5.52) [5]. Последний способ нагрева изделий отличается большей производительностью.

На мерные длины изделия разделяют пилами, оснащенными режущими элементами на основе сверхтвердых материалов (алмазов, карбидов и др.). В некоторых случаях применяют технологию гидравлической резки.

Процесс пултрузии композиционных материалов с термопластичной полимерной матрицей имеет существенные технологические отличия от процесса производства ПКМ с матрицей термореактивного типа. Эти отличия связаны с режимами термической обработки и особенностями пропитки арматуры. При использовании термопластичных полимеров пропитка армирующих элементов осуществляется непосредственно в формующей фильере. Охлаждают изделие также в фильере, иначе оно не отвердеет и при выходе из фильеры потеряет форму. Изделие в фильере охлаждается до температуры стеклования матрицы [5]. Таким образом, при производстве ПКМ на основе термопластичных полимеров конструкция фильеры сложнее, чем при использовании в качестве матричного материала термореактивных смол.



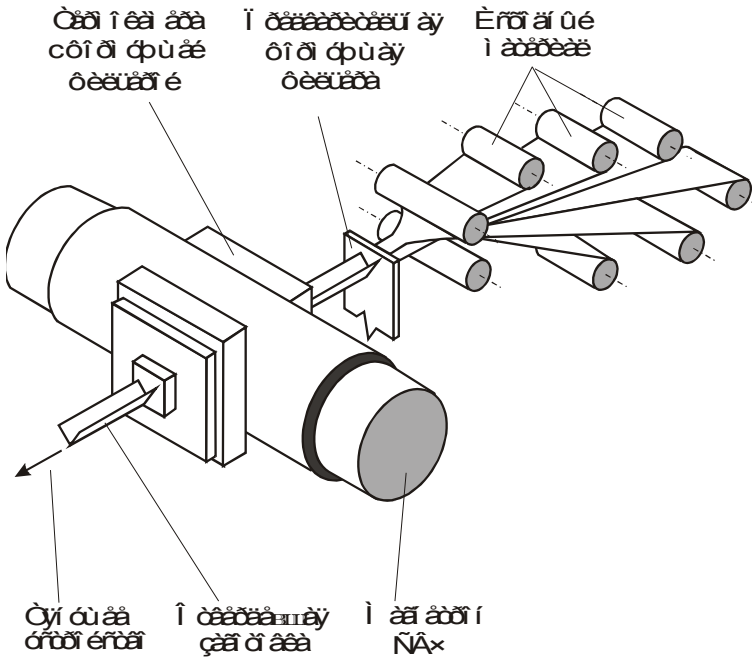


Рис. 5.52. Схема пултрusionной установки с отверждением заготовки в электромагнитном поле сверхвысокой частоты

Давление формования в фильере создается за счет уменьшения сечения канала по длине формирующей зоны (зоны пропитки), увеличения скорости протягивания материала через фильеру и некоторого избытка формуемого материала. При получении ПКМ с термопластичными матрицами рекомендуется обеспечить избыток плавких (матричных) волокон в объеме  $\sim 5...15\%$  от расчетного содержания [5].

Пултрузия обеспечивает следующие достоинства полимерных композиционных материалов: высокая точность; возможность изготовления длинномерных изделий; высокий коэффициент использования материала; высокая производительность процесса; высокое качество строения материала (точное регулирование соотношения между объемными долями арматуры и связующего); применение устройств относительно простой конструкции (шпулярника, ванночек, формирующих фильер, термокамер), используемых и в других технологических процессах [5]. При использовании в качестве матричного материала термопластичных полимеров создается возможность переформовки изделий из них.

## 5.7. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ФОРМОВАНИЕ ЗАГОТОВОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С целью снижения себестоимости изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, повышения производительности процессов их формообразования в некоторых случаях используют специальные заготовки. Форма и размеры заготовок соответствуют габаритам будущих деталей. Разработано и на практике используется несколько способов изготовления заготовок [5, 24]:

- откачка воздуха из сетчатой матрицы (формы);
- откачка жидкости из перфорированной формы;
- распыление;
- центробежная фильтрация;
- отлив пульпы и вакуумное обезвоживание.

### 5.7.1. МЕТОД ОТКАЧКИ ВОЗДУХА ИЗ СЕТЧАТОЙ МАТРИЦЫ

Схема реализации метода, основанного на откачке воздуха из сетчатой матрицы (формы), приведена на рис. 5.53. В приточную камеру на поворотный стол устанавливают сетчатый каркас,

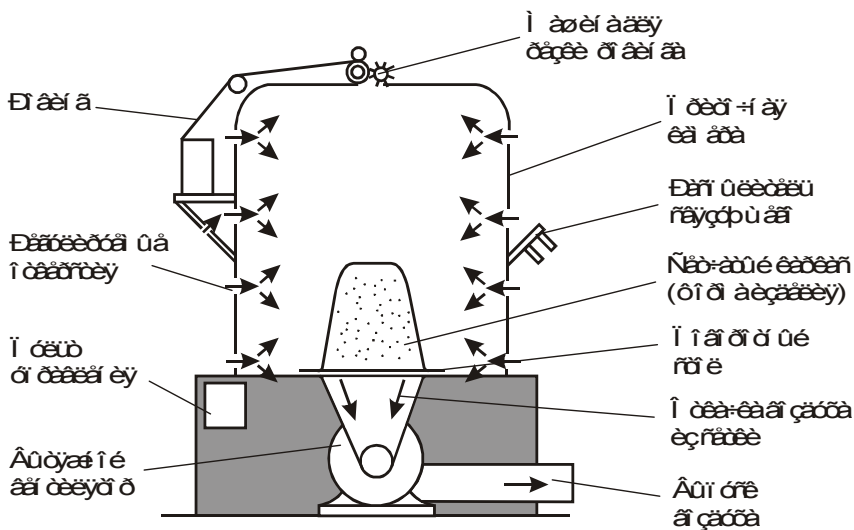


Рис. 5.53. Схема установки для получения заготовок с использованием приточной камеры

соответствующий по форме будущему изделию. Каркас выполняется из стальной проволоки или стального перфорированного листа. Поверхность сетчатого каркаса покрывают слоем антиадгезионного материала. Скорость вращения поворотного стола составляет  $\sim 30 \dots 60$  об/мин. Вращение стола необходимо для получения заготовок с равномерной толщиной стенок.

В верхней части камеры закреплена машина для резки ровинга. Поступающий в нее ровинг рубится на отрезки длиной  $12,7 \dots 76$  мм (в зависимости от конструкции изделия и требований, предъявляемых к нему). При откачке вытяжным вентилятором из сетчатого каркаса воздуха отрезки ровинга плотно притягиваются к его поверхности. Для сохранения образующимся волокнистым каркасом формы на него распыляют связующее. Обычно используются связующие в виде водных растворов. Содержание твердого связующего в растворе составляет  $\sim 5$  % от массы заготовки [5]. После высыхания или отвердения эмульсии заготовку с сетки снимают.

Толщина заготовок, полученных по такой технологии, достигает  $\sim 6,5$  мм. Расход воздуха, обеспечивающий эту толщину, составляет  $\sim 85$  м<sup>3</sup>/мин [5]. Для получения более толстых изделий могут быть изготовлены и вложены одна в другую две заготовки. Для их изготовления необходимо использовать сетки разного размера.

### **5.7.2. МЕТОД ОТКАЧКИ ЖИДКОСТИ ИЗ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ФОРМЫ**

Этим методом производят заготовки из коротких волокон, нитевидных кристаллов (рис. 5.54). Одним из основных элементов технологической оснастки, используемых при реализации данного технологического процесса, является специальная форма, выполненная в виде сита. В эту форму подается пульпа, содержащая армирующий материал. Короткие волокна, находящиеся в пульпе, оседают на поверхности формы. Излишки влаги откачиваются центробежным насосом и снова подаются в аппарат для приготовления пульпы. После осаждения на форме заготовки необходимой толщины она извлекается и сушится горячим воздухом. С целью сохранения формы заготовки ее предварительно обрабатывают связующим. Окончательная пропитка заготовки связующим производится в процессе прессования детали в форме [5]. На практике этот метод используется для получения тонких матов.

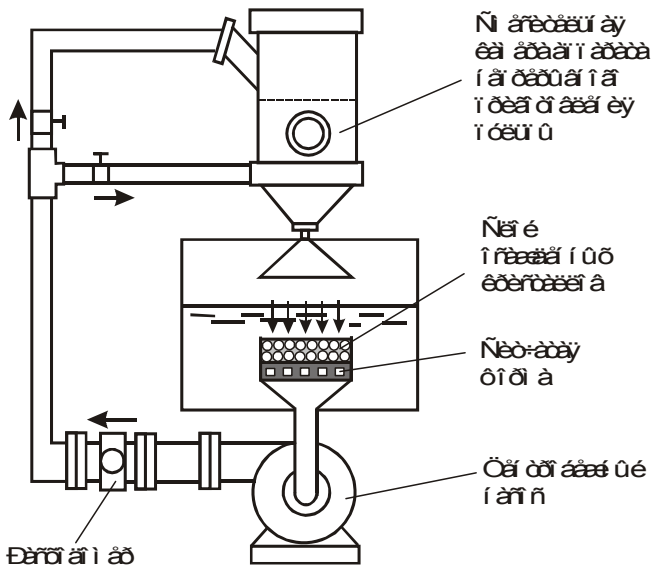


Рис. 5.54. Схема установки для получения заготовок методом откачки жидкости из перфорированной формы [5]

### 5.7.3. МЕТОД РАСПЫЛЕНИЯ ВОЛОКОН И СВЯЗУЮЩЕГО

Достоинством метода распыления является возможность получения заготовок большой толщины. Процессом распыления волокон и связующего управляет оператор (рис. 5.55). Оператор направляет на перфорированную сетку, закрепленную на поворотном столе, поток рубленого волокна и поток связующего. Вентилятор откачивает воздух из внутреннего объема перфорированной сетки, обеспечивая плотное прилипание волокон. Управляя обоими потоками, оператор обеспечивает получение заготовки необходимой толщины. Скорость осаждения волокна на сетку обычно составляет 0,45 кг/мин [24]. На последнем этапе получения заготовки производится нанесение только связующего (без подачи волокна). Это позволяет равномерно пропитать заготовку связующим. В местах утолщений будущих изделий возможна дополнительная укладка матов. Полученную заготовку с сеткой помещают в печь, где происходит удаление воды из эмульсии и отверждение смолы.

С целью повышения производительности изготовления заготовок используются установки механизированного типа (рис. 5.56).

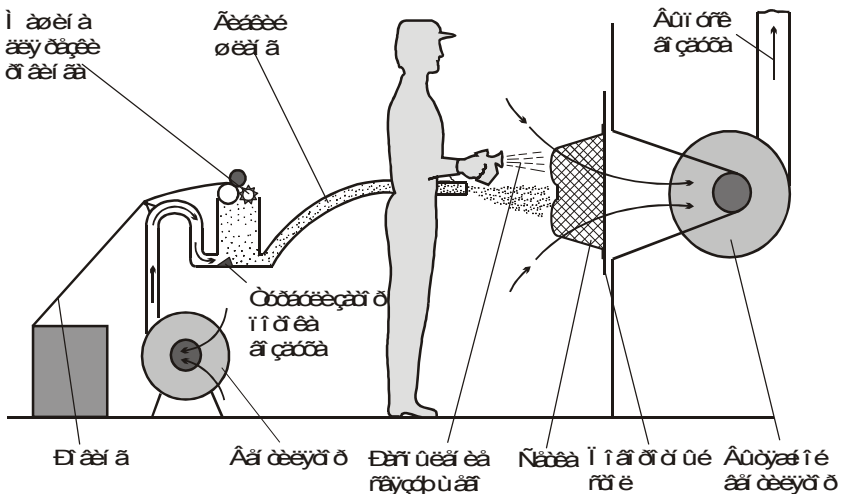


Рис. 5.55. Схема получения заготовок распылением материала

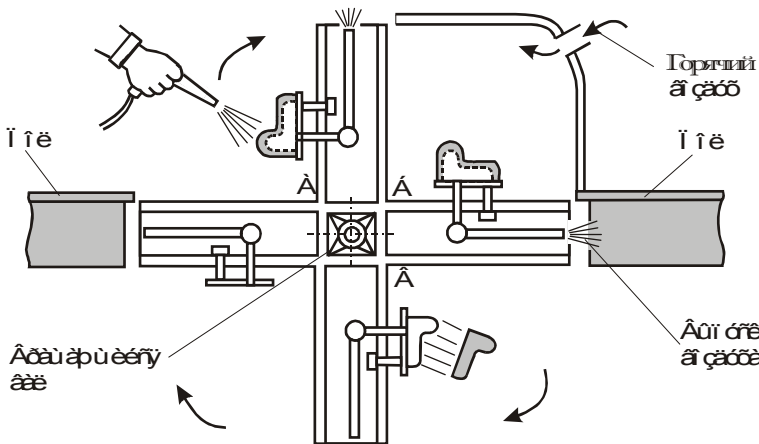


Рис. 5.56. Механизированная установка для получения/ заготовок распылением волокна и связующего:

А – участок нанесения волокна и связующего; Б – участок отверждения и сушки в печи; В – участок извлечения заготовки

При вращении вала заготовка последовательно проходит зоны нанесения волокна и связующего (А), отверждения и сушки в печи (Б) и извлечения (В).

### 5.7.4. МЕТОД ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В качестве формообразующего элемента при реализации метода центробежной фильтрации используется перфорированный барабан, закрепленный в центробежной камере (рис. 5.57). Пульпа, содержащая нитевидные кристаллы, подается внутрь вращающегося барабана. Под действием центробежной силы волокна плотно прилегают к поверхности барабана. Влага отводится из барабана через отверстия и затем центробежным насосом подается в аппарат для приготовления пульпы. Этим методом могут быть получены маты толщиной до ~ 20...30 мм и заготовки, имеющие форму тел вращения [5]. При использовании для подачи пульпы специального трубчатого мундштука удастся обеспечить преимущественную ориентацию волокон в окружном направлении.

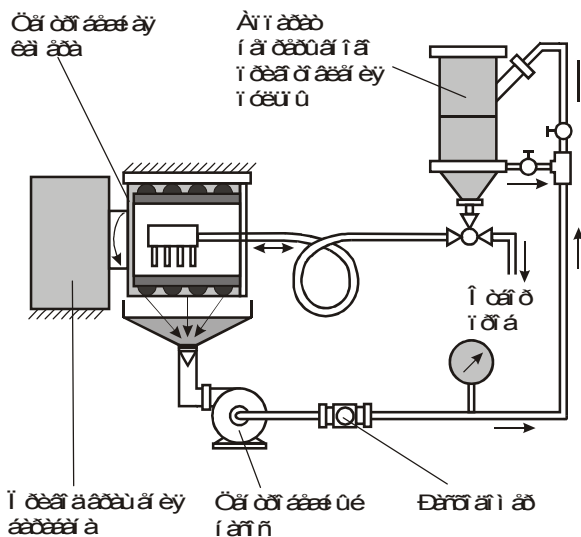


Рис. 5.57. Схема установки для получения матов из нитевидных кристаллов методом центробежной фильтрации

### 5.7.5. МЕТОД ОТЛИВА ПУЛЬПЫ И ВАКУУМНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

Метод позволяет получать заготовки различной формы, в том числе плоские и имеющие форму оболочек (цилиндры, конусы). На рис. 5.58 показан принцип действия установки для получения заготовок в виде матов на внешней поверхности цилиндрического

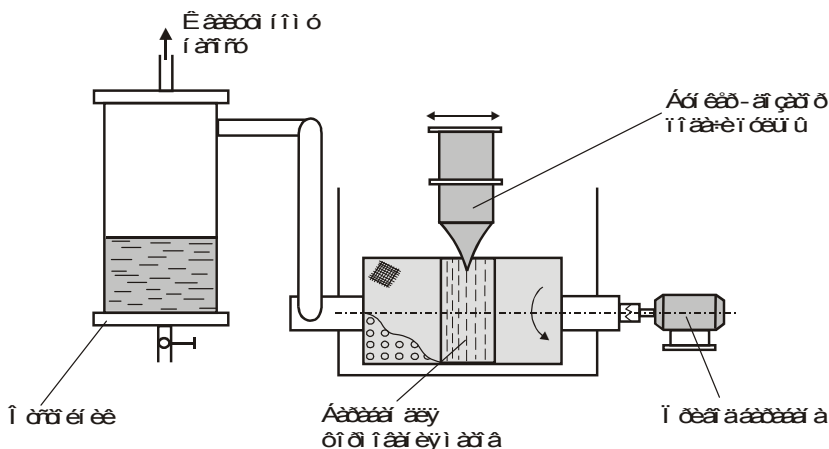


Рис. 5.58. Схема установки для получения матов из нитевидных кристаллов при отливе пульпы с одновременным вакуумным обезвоживанием

барабана. Пульпа, содержащая осаждаемые волокна, подается из бункера-дозатора на поверхность вращаемого электрическим двигателем перфорированного барабана. Из внутреннего объема барабана вакуумным насосом постоянно откачивается воздух. В результате разности давлений снаружи оболочки барабана и внутри ее волокна притягиваются к барабану. По мере подачи новых порций пульпы происходит постепенное увеличение толщины формируемого мата. Метод характеризуется высокой производительностью получения полуфабрикатов. Возможно закономерное ориентирование волокон в получаемом полуфабрикате.

#### 5.7.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МАТОВ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОЛУЧЕННЫХ ЗАГОТОВОК

Маты, полученные одним из отмеченных выше способов, в дальнейшем используются для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов. На рис. 5.59 показаны схемы формования матов в матрицах. Одна из них соответствует верхнему (а), а другая – нижнему (б) расположению матрицы. Чаще реализуется схема формования матов с нижним расположением матрицы [24].

При формовании заготовок их обычно помещают на пуансон, как показано на рис. 5.60. Расположение пропитывающего материала относительно заготовок при формовании изделий зависит от размеров изделий. В том случае если изделие имеет малые габари-

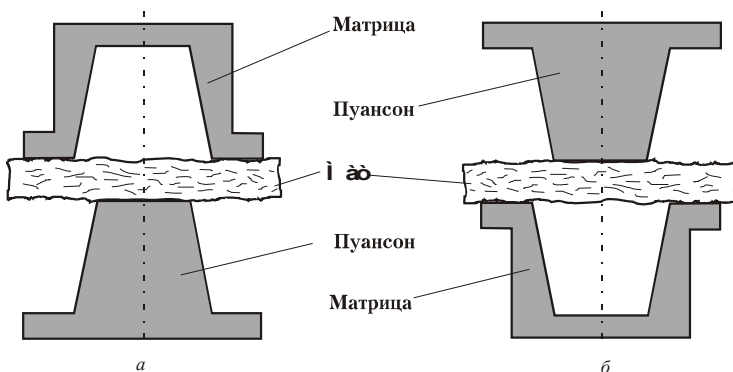


Рис. 5.59. Схемы формования матов в матрице:  
 а – нижнее расположение пуансона; б – нижнее расположение матрицы

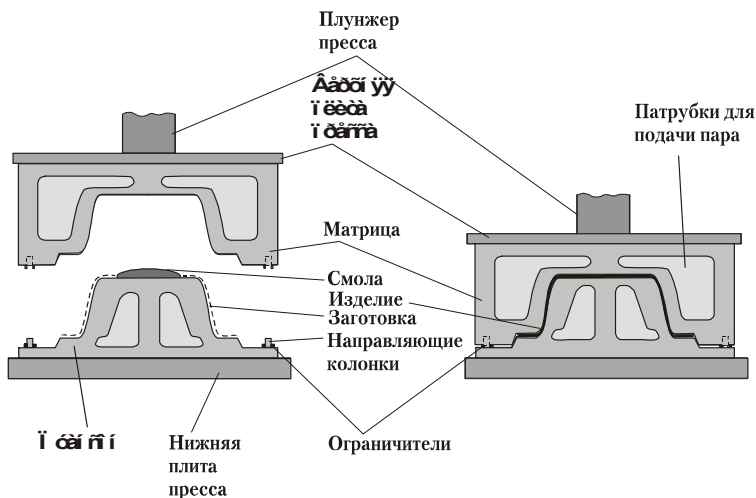


Рис. 5.60. Схема формования заготовок в матрице

ты, матричный материал рекомендуется располагать сверху заготовки в виде локального пятна. При прижатии матрицы к пуансону смола равномерно распределяется по поверхности заготовки и пропитывает ее. Если площадь изделия велика, то пропитывающую композицию необходимо поместить на заготовку не локально, а предварительно распределить ее по нескольким участкам. В каждом конкретном случае вопрос об оптимизации точек расположения пропитывающего материала на поверхности заготовки решается отдельно, с учетом геометрии получаемого изделия [24].





## **6. УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ, КЕРАМИЧЕСКИЕ И ГИБРИДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **6.1. УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) – одни из наиболее известных современных композитов. Материалы этого типа часто считают самыми перспективными для изготовления конструкций, работающих при высоких температурах [5]. Они используются для изготовления носовых обтекателей ракет, сопловых блоков, лопаток турбин, деталей тормозных устройств самолетов, высокотемпературных подшипников ядерных силовых установок, других деталей ответственного назначения.

УУКМ состоят из углеродной (графитовой) матрицы, упрочненной углеродным (графитовым) волокном. Углеродные волокна используются не только как упрочняющие элементы, они препятствуют распространению трещин. Основные достоинства УУКМ, определяющие их широкое применение, заключаются в высокой прочности, малой плотности, высокой теплостойкости, стойкости к тепловому удару и облучению [5]. В окислительной среде углерод-углеродные материалы сохраняют работоспособность до 773 К, в инертной среде и в вакууме – до 3273 К. УУКМ способны выдерживать перепад температур, достигающий 1000 К/см. В зависимости от структуры предел прочности на растяжение углерод-углеродных композитов изменяется в диапазоне ~ 100...1000 МПа.

Производство углерод-углеродных композиций осуществляется преимущественно по трем схемам [5]: пропитка волокнистого каркаса смолой с последующей карбонизацией; осаждение из газовой фазы углерода между волокнами каркаса; сочетание пропитки волокнистого каркаса смолой и карбонизации с осаждением углерода из газовой фазы.

Первый способ реализуется следующим образом. Методами намотки или выкладки из углепластика (углеродного волокна со связующим) формируется заготовка. Далее осуществляются опера-

ции полимеризации связующего, карбонизации матричного материала, уплотнения пиролитическим углеродом, окончательной термической обработки и нанесения противоокислительных покрытий на основе карбидов кремния, циркония, иридия. Для повышения плотности углерод-углеродного материала цикл пропитка–отверждение–карбонизация многократно повторяется. Цель повторения цикла пропитка–карбонизация заключается в устранении пористости и повышении плотности карбонизованной матрицы. Операция повторной пропитки реализуется по режиму вакуум–давление [6]. Для этого заготовка нагревается в вакууме, затем помещается в связующее, находящееся под избыточным давлением до 0,6...1,0 МПа. После выполнения каждого цикла пористость карбонизованной матрицы снижается, поэтому в дальнейшем для пропитки необходимо использовать связующее с меньшим уровнем вязкости. Схема технологического процесса получения углерод-углеродных композиционных материалов с использованием метода пропитки приведена на рис. 6.1 [32].

Применение технологии получения УУКМ, основанной на получении армирующего каркаса, пропитке его связующим и последующей термической обработке, сдерживает необходимость многократного проведения операции уплотнения матрицы. Эта операция значительно удлиняет и удорожает процесс получения композиционных материалов.

В зависимости от реализованной технологии и структуры сформированного материала плотность УУКМ находится в пределах 1300...2000 кг/м<sup>3</sup> [5].

При реализации второго способа из сухого волокна методами намотки, укладки, плетения, армирования в третьем направлении, прошивкой формируется заготовка. В дальнейшем выполняется операция осаждения углерода из газовой фазы, во время которой заполняется пространство между волокнами. В качестве углеродсодержащих газов используют природный газ метан или аналогичный газообразный углеводород в комбинации с водородом или аргоном [5]. Это более дорогая технология. Преимущества второго способа заключаются в том, что он обеспечивает более высокую плотность материала, более высокое содержание углерода и более прочную связь матрицы с волокном.

При производстве изделий из УУКМ важен оптимальный выбор армирующих элементов, их геометрии, объемной доли. В каждом случае эта задача решается индивидуально, в зависимости от условий, в которых будет работать проектируемый материал. Привычным является упрочнение композитов однонаправленными



используются одинарные нити. При необходимости возможно усиление нити в каком-либо направлении. Схемы укладки нитей с соотношением числа нитей 1.1.1 применяют для получения пустот малого размера.

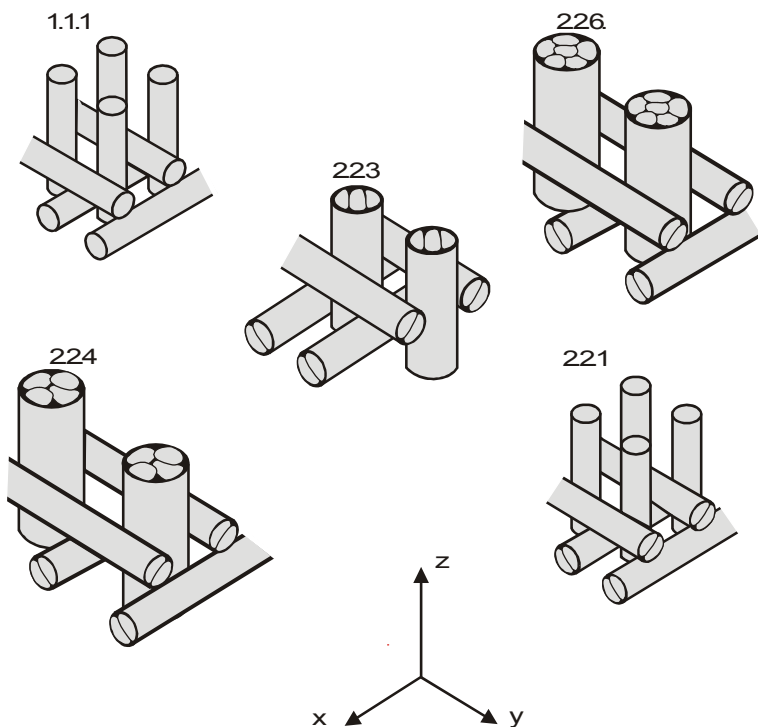


Рис. 6.2. Схемы ортогонального трехнаправленного переплетения

Некоторые характеристики конструкций с пространственными армирующими структурами (ПАС) типа 3D, 4D, 6D отражены в табл. 6.1 [5]. На рис. 6.3 приведена типичная схема укладки волокон малого диаметра в ортогонально армированном материале с целью получения каркаса высокой плотности [5].

На практике разработано несколько способов формирования блоков с пространственной армирующей структурой типа 3D. Один из них схематически представлен на рис. 6.4 [5]. В соответствии со схемой в горизонтальных плоскостях с определенным шагом укладываются волокна одного направления. Волокна двух других направлений, образующих 3D структуру, вводятся в объем

Таблица 6.1

**Характеристики сбалансированных 3D, 4D, 6D конструкций из пучков волокон круглого сечения.**

Наименование характеристик	Структура		
	3D	4D	6D
Размещение пучков волокон	Квадратная сетка	Шахматный порядок	Шахматный порядок
Углы между пучками стержней	$2 \times 90^\circ$	$3 \times 70,5^\circ$	$1 \times 90^\circ, 3 \times 60^\circ$
Компактность, %	59	68	49,4
Пористость	Закрытая	Открытая	Открытая
Изотропия	Слабая	Хорошая	Близкая к совершенной
Жесткость	Слабая	Хорошая	Отличная
Расслоение	Возможно	Невозможно	Невозможно
Минимальная поверхность стержней в срезе плоскости, %	19,7	34,0	24,7

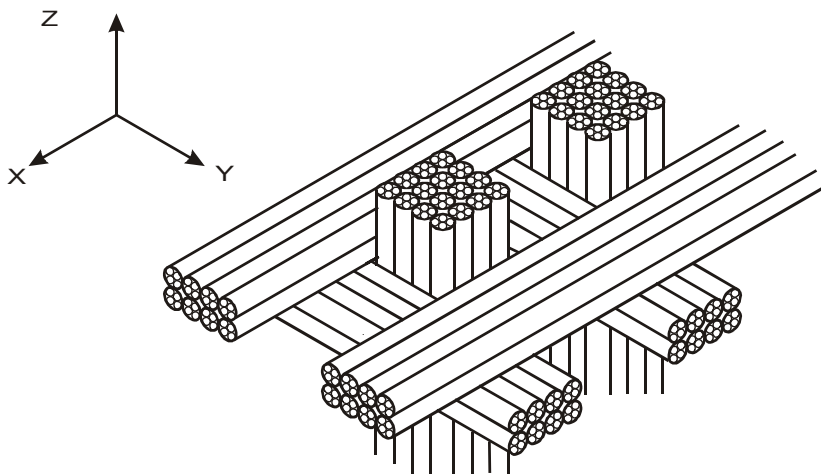


Рис. 6.3. Типичная схема укладки волокон малого диаметра в ортогонально армированном материале с целью обеспечения каркаса высокой плотности

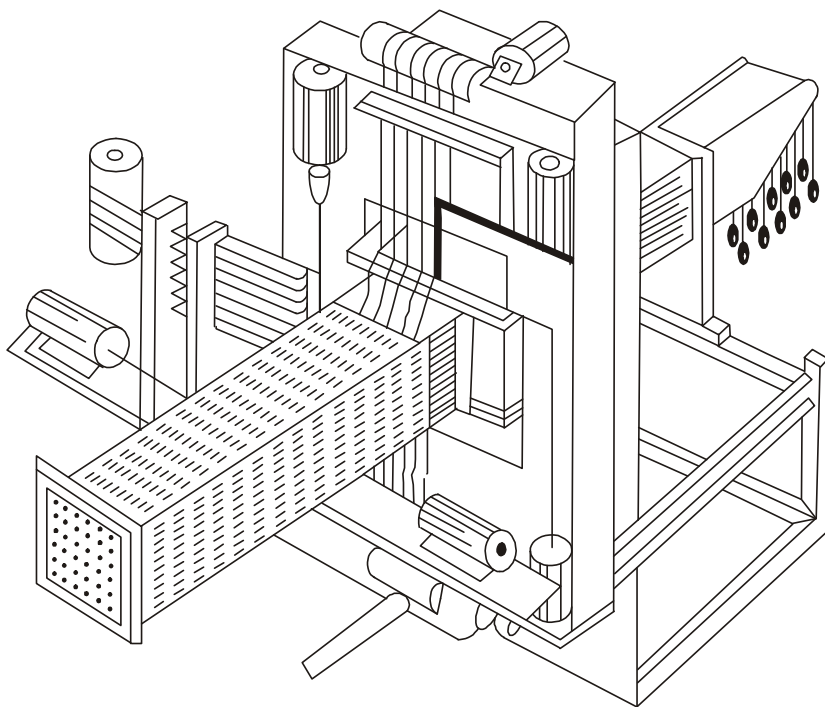
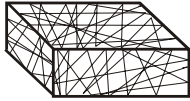


Рис. 6.4. Схема устройства для получения блоков со структурой 3D

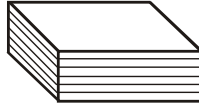
формируемого блока с помощью системы рапир при их возвратно-поступательном движении. Фиксирование образующихся на выходе петель осуществляется кромошной нитью.

С целью снижения степени анизотропии композиционных материалов применяют армирование с получением структур 4D, 5D, 7D, 11D. На рис. 6.5 приведены схемы армирования, применяющиеся при изготовлении углерод-углеродных композиционных материалов [5].

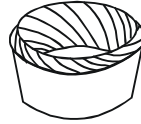
Более сложной технической задачей является изготовление объектов в виде цилиндров, усеченных конусов, шаров, тел неправильной формы. На рис. 6.6 [5] представлена схема формирования цилиндра путем трехнаправленного переплетения осевых, радиальных и окружных нитей. Для того чтобы в данной схеме обеспечить постоянство плотности армирования, можно использовать переплетение с систематическим увеличением диаметра осевых нитей, как это показано на рис. 6.7 [5].



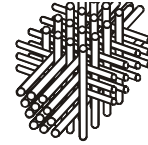
Öäi öè-í äý



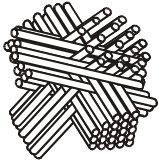
Ñèí èñtäý



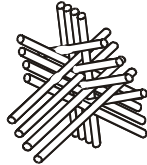
Èí çäü -í äý



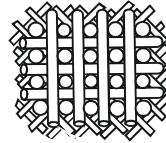
Î öü ä í äüü äý 3Ä



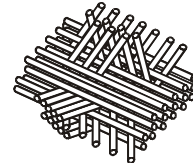
Ñööööööä 4Ä



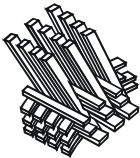
Ñööööööä 4Ä-È



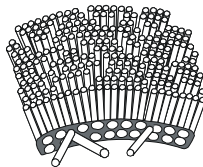
Ñööööööä 5Ä-È



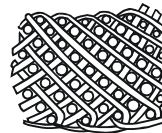
Ñööööööä 5Ä



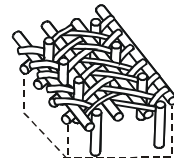
Äèñäüü í -öäèäüü í -  
í èöäè äý



Èäèäüü í -  
ñí èöäüü äý



Äèñäüü í -  
ñí èöäüü äý



Äèñäüü í -öäèäüü í -  
ñí èöäüü äý

Рис. 6.5. Принципиальные схемы расположения волокон в углерод-углеродных композиционных материалах

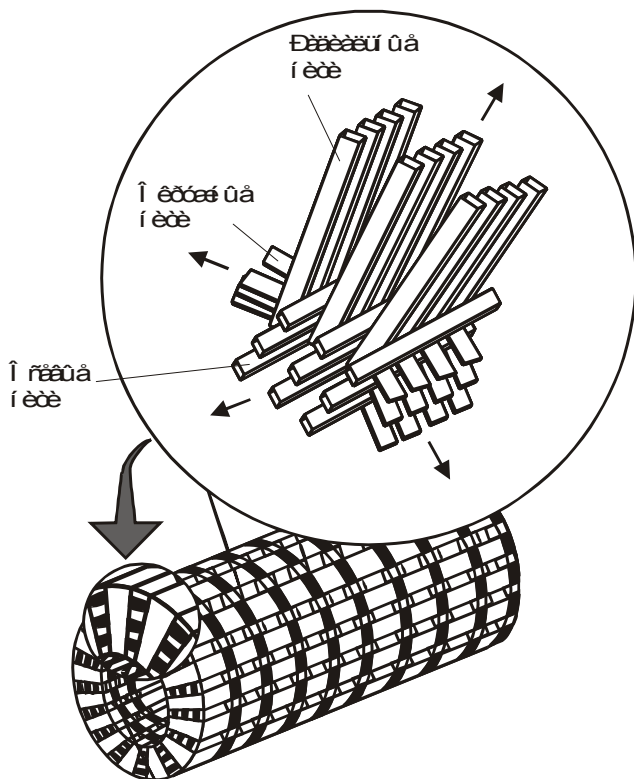


Рис. 6.6. Расположение нитей в трехнаправленном цилиндрическом переплетении

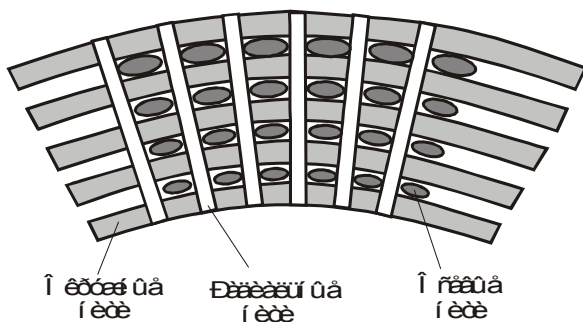


Рис. 6.7. Схема трехнаправленного цилиндрического переплетения с использованием осевых нитей различного диаметра



Разработано несколько технологических процессов получения многонаправленных структур: метод сухого ткачества; прошивка тканей; намотка и плетение; сборка жестких прутков; комбинированные методы [5]. При производстве углерод-углеродных композиционных материалов широко применяется метод сухого ткачества. Один из вариантов реализации этого метода схематически показан на рис. 6.8 [5]. В соответствии с этим методом в плоскости  $x$ - $y$  укладываются ряды параллельных нитей. Между ними в направлении  $z$  располагаются спицы. После формирования нитями необходимой структуры в плоскостях  $x$ - $y$  спицы вынимаются и замещаются семейством нитей в направлении оси  $z$ .

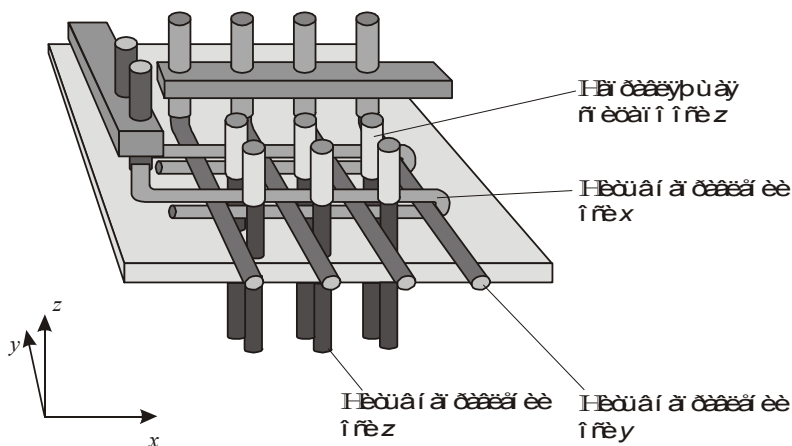


Рис. 6.8. Схема раскладки трехнаправленного (3D) армирующего каркаса

Модифицированный вариант описанного способа, показанный на рис. 6.9 [5], основан на использовании ткани со структурой 2D. Семейство слоев ткани надевают на жесткую решетку из вертикальных металлических стержней. После формирования необходимого объема стержни заменяют графитовыми нитями или углепластиковыми стержнями. Полученные таким образом материалы называют проколотыми тканями. Метод прошивки реализуется на малогабаритных швейных машинах при использовании тканей толщиной до 3 мм.

В некоторых случаях пространственные армирующие структуры формируют с применением жестких стержней, получаемых методом осаждения углерода из газовой фазы или по технологии пултрузии

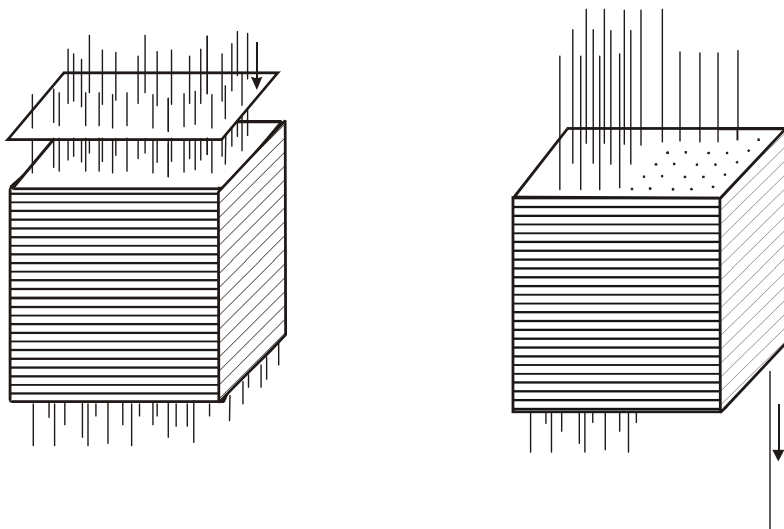


Схема процесса изготовления блока из проколотовой ткани

Схема процесса изготовления блока из проколотовой ткани

Рис. 6.9. Схема процесса изготовления блока из проколотовой ткани

с использованием ориентированных волокон, пропитанных термопластичным или термореактивным связующим [5]. На рис. 6.10 показана схема формирования стержней по технологии пултрузии. Волокна сматываются с бобин, попадают в пропиточную ванну со связующим, обжимаются в фильере, где формируется профиль стержня. Далее в камере при  $380...390^{\circ}\text{C}$  происходит сушка заготовки. Перед тем как поместить заготовку в камеру для термообработки, ее дополнительно уплотняют в промежуточной фильере. Термическая обработка проводится при  $450...550\text{ K}$ . На выходе из камеры происходит окончательное уплотнение профиля фильерой. При изготовлении стержней в качестве упрочняющих элементов возможно применение волокон независимо от их способности к текстильной переработке [6]. Стержни способствуют выравниванию волокон в армирующем каркасе.

Из стержней изготавливают многонаправленные армирующие каркасы. На рис. 6.11 приведены три схемы укладки стержней со структурами 4D (левая схема) и 4D-Л (средняя и правая схемы) [5].

После получения из армирующих элементов заготовки производится выбор полимера для ее пропитки. Обычно в качестве полимеров, являющихся исходным материалом для получения углеродной

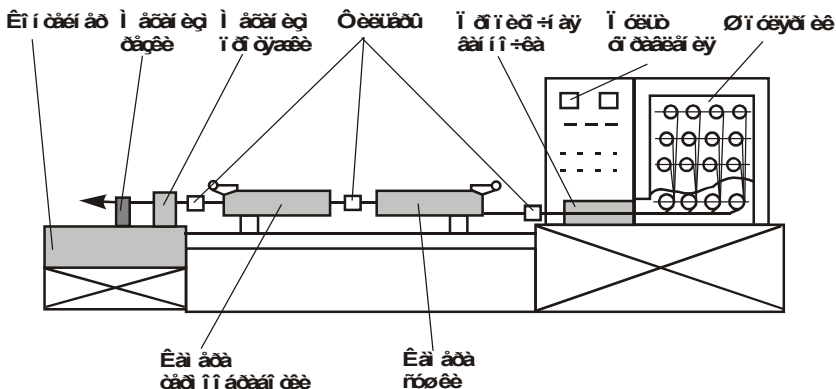


Рис. 6.10. Схема установки для изготовления стержней, используемых при изготовлении УУКМ

матрицы, применяют фенолформальдегидные и фурановые смолы, а также каменноугольный или нефтяной пек.

Тип используемого связующего определяет технологию, стоимость и важные свойства получаемых углерод-углеродных композиционных материалов [6]. Достоинствами фенолформальдегидных смол являются технологичность, относительно низкая стоимость, высокая прочность образующегося каркаса. В то же время фенолформальдегидные смолы обладают рядом недостатков. Один из них – трудность получения однородной плотной структуры. Образующийся из смол кокс плохо поддается графитизации.

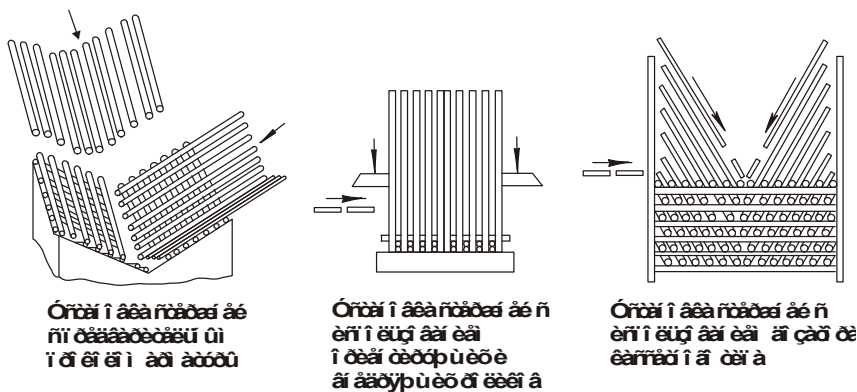


Рис. 6.11. Схемы устройств для установки стержней при производстве изделий из углерод-углеродных композитов

Усадка материала во время карбонизации фенолформальдегидных связующих больше, чем при использовании связующих других типов. Это ведет к возникновению значительных внутренних напряжений и снижает физико-механические свойства композитов.

Фурановые смолы по сравнению с фенолформальдегидными отличаются меньшей технологичностью, цикл их отверждения более сложен. Достоинствами фурановых смол, объясняющими их применение при производстве УУКМ, являются меньшая, по сравнению с фенолформальдегидными связующими, усадка при карбонизации, более высокая прочность и плотность каркаса. Плотность каркаса, образуемого из фенолформальдегидных смол, составляет  $\sim 1650 \text{ кг/м}^3$ , из фурановых связующих  $\sim 1850 \text{ кг/м}^3$ , из пеков  $\sim 2100 \text{ кг/м}^3$ .

Достоинствами нефтяных и каменноугольных пеков кроме высокой плотности кокса являются низкая стоимость, доступность, хорошая склонность к графитизации, исключение из технологического процесса растворителя. К недостаткам пеков относят:

- появление значительной пористости;
- термопластичность, приводящая к миграции связующего при термообработке материала;
- наличие в пеках канцерогенных соединений.

Введение матричного материала в армирующий каркас обычно осуществляется методом пропитки под низким давлением. Следующая стадия получения углерод-углеродного композита заключается в карбонизации матрицы в инертной среде. При необходимости реализуется и стадия графитизации материала. Характерные циклы карбонизации и графитизации углеродной матрицы показаны на рис. 6.12 [5]. Для повышения качества углерод-углеродных материалов цикл пропитка–термообработка может проводиться многократно. Метод получения УУКМ, основанный на пропитке каркаса под низким давлением, используется в тех случаях, когда допускается открытая пористость материала в пределах 10 %.

Повышение свойств углерод-углеродных композиционных материалов и сокращение времени их изготовления возможно при использовании технологии пропитки армированного каркаса под высоким давлением. Основная стадия этой технологии заключается в карбонизации материала под высоким давлением. Речь идет о термобарическом процессе изготовления высокоплотных УУКМ, т. е. процессе термообработки, выполняемой с одновременным приложением давления [6]. При реализации технологии заготовка помещается в тонкий металлический контейнер, заливается и пропитывается жидким пеком, разогретым до  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , и закрывается

металлической крышкой. Карбонизация под высоким давлением проводится при изостатическом давлении в газостатах (рис. 6.13) или автоклавах.

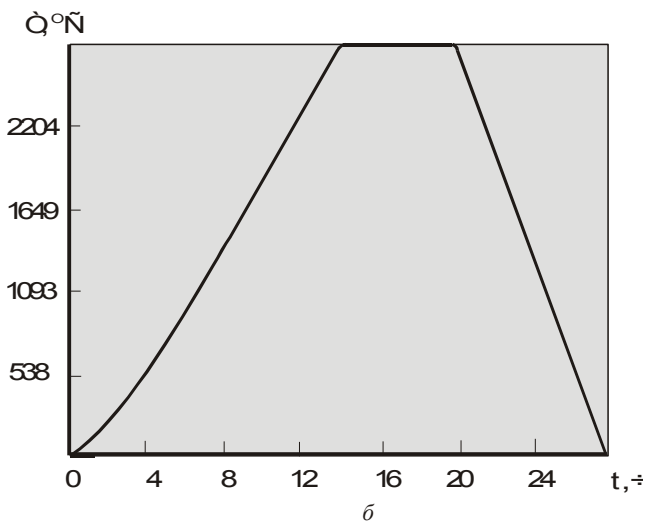
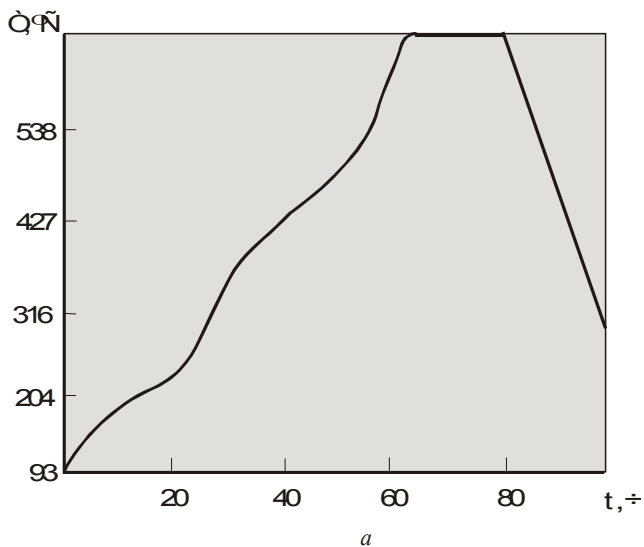


Рис. 6.12. Характерные циклы карбонизации (а) и графитизации (б) углерод-углеродных композиционных материалов [5]

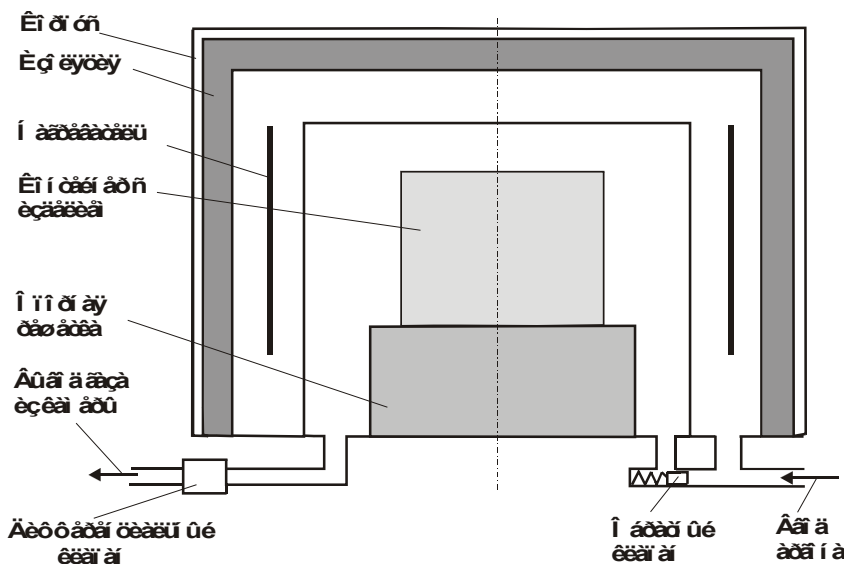


Рис. 6.13. Схема устройства газостата для карбонизации УКМ при высоком давлении

Давление на пек передается через корпус тонкого металлического контейнера, выполняющего функцию «резинового мешка». Схематически последовательность операций от подготовки образца до его очистки после карбонизации показана на рис. 6.14. После очистки проводится операция графитизации материала. Во многих случаях заготовка высокого качества может быть получена всего за один цикл. При необходимости повышения плотности матрицы полный цикл обработки может повторяться.

Для получения более термостабильного материала с высоким уровнем механических свойств после карбонизации может быть выполнена стадия высокотемпературной обработки материала – графитизация. Эта операция реализуется в индукционных печах или печах сопротивления в графитовой засыпке, в вакууме или инертном газе, т. е. в неокисляющей среде [6]. Степень структурных изменений при выполнении этой стадии определяется в основном температурой, поэтому длительность ее по сравнению с карбонизацией невелика (несколько часов). В процессе графитизации происходят необратимые изменения формы изделий, залечиваются дефекты структуры. В том случае если для формирования матрицы использовали пеки, хорошо поддающиеся графитизации,

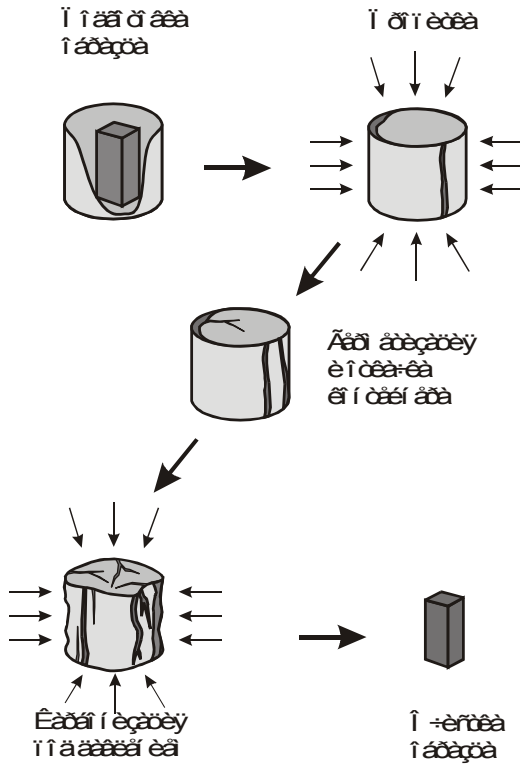


Рис. 6.14. Последовательность операций цикла пропитка – карбонизация под давлением

во время высокотемпературного нагрева (свыше 2473 К) наблюдается рост трехмерно упорядоченных углеродных кристаллитов вплоть до перехода к структуре графита [6]. В материалах на основе полимерных связующих, плохо поддающихся графитизации, вплоть до 3273 К материал остается в неграфитизированной турбо-стратной форме.

Второй технологический процесс формирования матрицы в углерод-углеродных материалах заключается в осаждении пироуглерода из газовой фазы [5]. В качестве газов используют углеводороды (метан, бензол, ацетилен и др.) или смеси углеводородов с разбавляющим газом (инертный газ или водород). Под действием высоких температур газы в печи распадаются с образованием углерода и других компонентов. Углерод осаждается на поверхности разогретых волокон, постепенно создавая мостики между волокнами

и заполняя межволоконное пространство армирующего каркаса. Другие газообразные продукты удаляются из реакционной камеры. Структура пироуглеродной матрицы углерод-углеродного композиционного материала показана на рис. 6.15.



Рис. 6.15. Структура пироуглеродной матрицы углерод-углеродного композиционного материала [31]

На практике используются два варианта реализации метода осаждения углерода из газовой фазы. Один из них выполняется в изотермических условиях и позволяет заполнять углеродом относительно тонкие армирующие каркасы. Схема камеры для осаждения углеродной матрицы в изотермических условиях показана на рис. 6.16 [5]. Установка содержит кожух, нагреватель (индукционную катушку), графитовый сердечник. Графитовый сердечник (сусцептор) является тепловыделяющим элементом, обеспечивающим равномерность обогрева материала в индукционной печи [6]. Внутри графитового сердечника располагают армирующий углеродный каркас. Газы подводятся через нижнюю часть камеры, нагреваются, разлагаются, проходят через межволоконное пространство упрочняющего каркаса. Углерод осаждается на поверхности волокон. Газообразные продукты реакции удаляются через отверстие в крышке печи. Температура, при которой реализуется этот процесс, составляет 1173...1423 К, давление – 130...2000 кПа [6]. Увеличение температуры способствует росту скорости осаждения



углерода. Недостаток заключается в том, что газ не успевает диффундировать в объем заготовки и при этом происходит наслоение углерода на поверхности объекта.

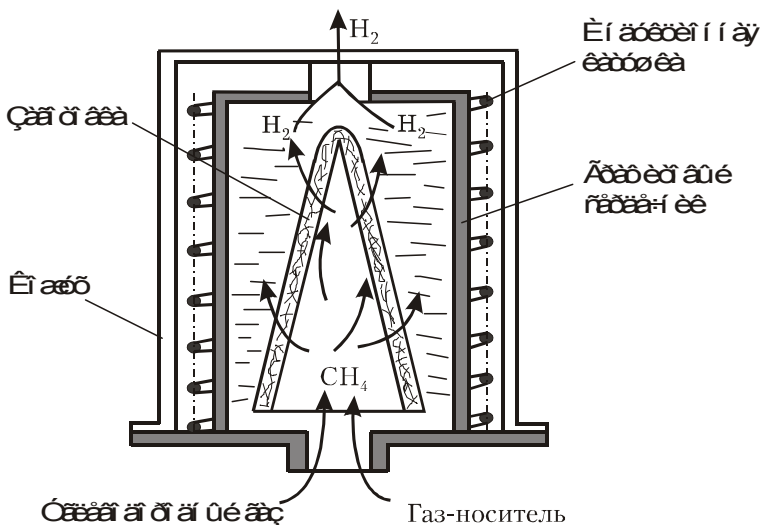


Рис. 6.16. Схема камеры для изотермического процесса осаждения углерода на углеродный волокнистый каркас

Достоинства изотермического метода получения углерод-углеродных композитов следующие [6]: простота; хорошая воспроизводимость свойств материала; высокая плотность матрицы; хорошая графитизируемость матрицы; возможность одновременной обработки нескольких изделий. Недостатки этой технологии связывают с малой скоростью осаждения, плохим заполнением крупных пор, склонностью к поверхностному осаждению пироуглерода.

Для получения УУКМ может быть использован модифицированный вариант изотермического метода, выполняемый в режиме давление–вакуум [6]. Реализация метода заключается в попеременном заполнении реакционного объема углеводородным газом и вакуумировании. Достоинством метода является высокая степень объемного уплотнения армирующего каркаса пироуглеродом.

Осаждение углерода из газовой фазы на толстостенные заготовки осуществляется по методу температурного градиента (рис. 6.17) [5]. Армирующий углеродный каркас помещают на обогреваемую металлическую оправку или разогревают путем прямого пропускания тока. Газ подают со стороны печи, имеющей более

низкую температуру. Таким образом, в армирующем каркасе наблюдается температурный градиент. Осаждение пироуглерода происходит в более горячей зоне, т. е. в области сердечника. Постепенное увеличение плотности заполняемого углеродом каркаса приводит к изменению температурных условий осаждения и перемещению фронта осаждения в менее плотную область каркаса. По истечении определенного времени заготовка полностью заполняется углеродом. Плотность углерод-углеродных материалов, полученных этим методом, составляет  $1700 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$ .

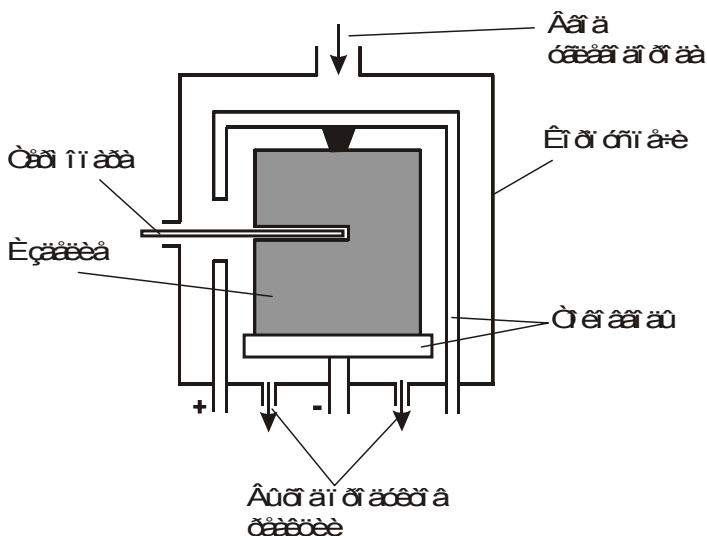


Рис. 6.17. Схема печи для осаждения пироуглерода по методу температурного градиента

Достоинствами неизотермического метода являются [6]: большая скорость осаждения углерода; возможность заполнения крупных пор; объемное уплотнение материала. К недостаткам относят следующие факторы: необходимость использования сложной аппаратуры; возможность одновременной обработки лишь одного изделия; недостаточная плотность и графитизируемость матрицы; образование микротрещин.

В данном разделе была описана технология получения УУКМ с упорядоченным расположением армирующих элементов. В то же время на практике используются композиты с хаотически армированной структурой. Технология получения таких материалов заключается в следующем [6]. На первом этапе углеродные волокна

разделяют на отрезки длиной 40...60 мм. Затем в водной среде волокна измельчают до длины 0,5...10 мм. Полученный таким образом материал в необходимой пропорции смешивают с порошком фенолформальдегидной смолы. Приготовленную суспензию заливают в форму, вакуумируют и сушат. На следующих этапах производят термическую обработку материала при 430...460 К и дополнительную термообработку при 1100...1300 К.

Кроме метода пропитки каркаса полимерным связующим и осаждения углерода из газовой фазы, матрица в УУКМ может быть сформирована и комбинированными методами, сочетающими описанные выше технологии. Один из вариантов получения углеродной матрицы комбинированного типа (из полимерного связующего и пироуглерода) заключается в следующем [6]. На первом этапе по технологии пропитки получают карбонизованный углепластик. На следующем этапе осуществляют осаждение на полученную заготовку углерода из газовой фазы. Пироуглерод уплотняет поверхностный слой карбонизованного углепластика, уменьшает открытую пористость. В результате такого комбинирования двух технологических процессов значительно возрастают прочностные свойства углерод-углеродного материала.

Используют и другие варианты формирования комбинированных матриц. Разработана технология, в соответствии с которой на первом этапе получают углеродный армирующий каркас. Для повышения его жесткости и предотвращения деформации во время пропитки жидким связующим, осуществляют осаждение углерода из газовой фазы. Оптимальная толщина углеродного слоя на моноволокне составляет 0,001...0,1 нм [6]. В результате введения операции осаждения углерода на волокно прочностные свойства композиции возрастают.

Более сложная схема получения комбинированной матрицы предусматривает осаждение пироуглерода на двух этапах изготовления УУКМ. Эта технология, обеспечивающая значительное увеличение прочностных свойств композиционного материала, используется в следующей последовательности:

- осаждение из газовой фазы тонкого слоя углерода на углеродные волокна армирующего каркаса;
- пропитка каркаса полимерным связующим;
- формообразование заготовки;
- карбонизация материала при 1273 К;
- уплотнение карбонизованной заготовки по технологии осаждения углерода из газовой фазы;
- графитизация материала при 2273 К.

## 6.2. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Керамические композиционные материалы имеют керамическую матрицу и содержат металлическую или неметаллическую волокнистую арматуру. Условно к керамическим композиционным материалам относят также композиты с комбинированной матрицей, содержащей тугоплавкие неметаллические частицы и частицы металла, выполняющего функцию связки [1].

Достоинства керамических композитов определяются, в первую очередь, свойствами матрицы. Керамические матрицы обеспечивают наиболее высокий уровень рабочих температур композиционных материалов. Керамика является химически и термически стойким материалом, имеет высокий уровень прочностных свойств на сжатие.

Недостатком абсолютного большинства керамических материалов является очень низкий уровень трещиностойкости. Попытки приблизить керамику по показателям вязкости к металлическим материалам привели к разработке керметов, т. е. материалов, имеющих комбинированную матрицу, полученную из порошков (более 50 % (объемн.) керамика, а остальное – металл). Более эффективным является введение в керамическую матрицу металла в форме не порошка, а волокон. Одинаковая с керметами термостойкость у композитов с волокнистым упрочнителем достигается в том случае, если объемная доля волокна в 3 раза меньше, чем объемная доля частиц металла в керметах [1].

В керамических композиционных материалах нагрузка посредством матрицы передается на волокно. В том случае если модуль упругости волокна при растяжении меньше, чем модуль матрицы, нагрузку в первую очередь воспринимает матрица. При этом увеличение объемной доли волокна приводит к снижению прочностных свойств керамики.

Для того чтобы волокнистая арматура, вводимая в матрицу, обеспечивала увеличение прочностных свойств керамики, необходимо чтобы волокна представляли собой более жесткий по сравнению с керамической матрицей материал. Другим техническим решением, позволяющим повысить прочностные свойства керамики за счет введения армирующих волокон, является предварительное напряжение арматуры [1]. Механизм термического напряжения материала реализуется при использовании волокон, имеющих коэффициент термического расширения больше, чем у матрицы. В этом случае при охлаждении системы, находившейся при повышенных температурах, в керамической матрице возникают сжимающие

напряжения. Эти напряжения повышают прочностные свойства керамики, снижают склонность матрицы к растрескиванию.

Основными способами производства керамических композиционных материалов являются прессование со спеканием, горячее прессование и шликерное литье. Первая из этих технологий неприемлема для получения композитов, армированных волокнами (особенно большого диаметра). Это объясняется тем, что волокна препятствуют уплотнению порошка, являются причиной образования дефектов структуры матрицы [1].

Тип армирующих волокон, используемых в керамических композиционных материалах, определяется условиями работы изделий (температурой, наличием и видом агрессивной среды). В том случае если армирующими элементами служат металлические волокна, эффективность работы композитов при высоких температурах будут определять газопроницаемость керамической матрицы, наличие в ней трещин. Работоспособность таких композитов при высоких температурах зависит от свойств металлических волокон. Основным фактором, ограничивающим применение металлических волокон в керамических композитах, является их повышенная склонность к окислению при высоких температурах эксплуатации.

Наиболее часто для упрочнения керамики используются волокна вольфрама, молибдена, ниобия, стали [5]. Металлические волокна более пластичны по сравнению с керамикой. Они воспринимают значительную часть нагрузки, сдерживают развитие трещин в композите, выполняют функцию структурных элементов, повышающих трещиностойкость и термостойкость материалов. При увеличении объемной доли металлических волокон до ~ 25 % вязкость и термостойкость керамических композитов повышается. При дальнейшем увеличении содержания волокна возрастает пористость керамических матриц и свойства композитов снижаются. Основными технологическими процессами получения керамических композиционных материалов с металлическими волокнами являются методы горячего прессования и шликерного литья.

При разработке керамических композиционных материалов в качестве армирующих элементов часто используют керамические волокна. Достоинства волокон этого типа заключаются в следующем [1]: малое различие модулей упругости и коэффициентов термического расширения материалов волокон и матрицы; химическое сродство компонентов композитов; жаростойкость керамических волокон. В качестве примера композита такого типа можно отметить материал с матрицей из оксида хрома, армированной усами муллита. Керамические матрицы из оксидов  $Al_2O_3$  и  $MgO$

упрочняют монокристаллами  $ZrO_2$  и  $MgO$ , имеющими игольчатую форму, а также пластинчатыми кристаллами  $\beta$ -глинозема и  $Cr_2O_3$ . Оптимальная объемная доля упрочняющих элементов составляет 10...20 %. Для получения композитов с пористостью матрицы менее 3 % применяют технологию горячего прессования. По сравнению с неармированной горячепрессованной керамикой термостойкость отмеченных композиционных материалов в 3...5 раз выше [1].

Эффективными армирующими элементами керамического типа в композиционных материалах являются волокна карбида кремния. Эти волокна применяются в сочетании с матрицами из боросиликатного, алюмоборосиликатного, литиевоборосиликатного стекла. Карбид кремния используется в виде моноволокон диаметром ~ 10...12 мкм. Технология получения композитов такого типа основана на горячем прессовании слоев лент волокна и стеклянного порошка [5]. Прессование осуществляют в среде аргона.

Керамические композиционные материалы с армирующими керамическими волокнами перспективны для изготовления конструкций ядерных силовых установок, высокотемпературных подшипников, лопаток газотурбинных двигателей, носовых обтекателей ракет, антенных обтекателей летательных аппаратов [5].

В качестве упрочняющих элементов керамических композиционных материалов могут быть использованы углеродные волокна. Для армирования керамики рекомендуется применять высокомолекулярные волокна. Матрицами в углекерамических материалах могут служить боросиликатные, алюмосиликатные, литиевосиликатные стекла [5].

### 6.3. ГИБРИДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Используемые на практике композиционные материалы не обязательно являются двухкомпонентными. В композитах одновременно могут присутствовать разнородные матрицы и волокна. В том случае если композиты состоят из трех и большего количества компонентов, их называют гибридными. Композиционные материалы, состоящие из двух или более матричных компонентов, отделенных друг от друга поверхностями раздела, называют полиматричными, или гетероматричными [5]. Если в композите с матрицей одного типа присутствуют разнородные по составу армирующие компоненты, тогда гибридный материал называют полиармированным, или поливолоконистым.

Схематически некоторые варианты гибридных структур, используемых в композиционных материалах, приведены на рис. 6.18 [5]. Одним из вариантов сочетания различных волокон является создание гетероволокнистых материалов по принципу однородных смесей, в соответствии с которым волокна различных типов равномерно распределяются в первичной нити, ленте или жгуте (рис. 6.18, *а*). На рис. 6.18, *б* показана схема строения ткани с полотняным переплетением полимерных и стеклянных нитей. Возможен вариант строения гибридных композиционных материалов с чередующимися листовыми слоями, армированными волокнами различного типа (рис. 6.18, *в*).

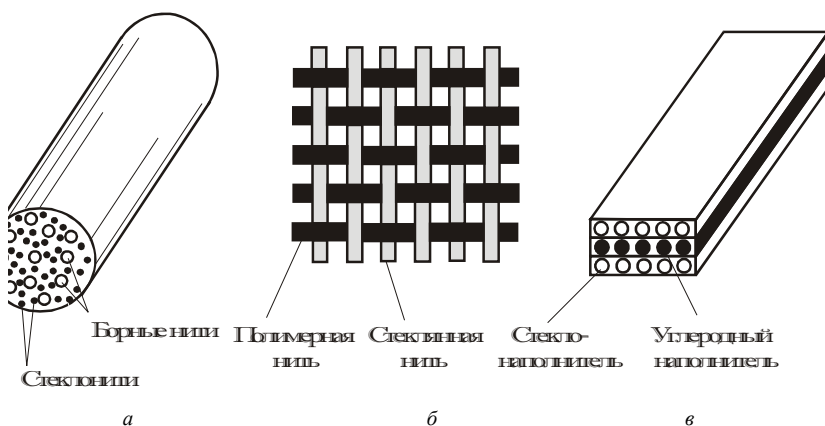


Рис. 6.18. Варианты гибридных структур, используемых в композиционных материалах:

*а* – гетероволокнистая нить; *б* – двухкомплектная ткань; *в* – слоистый гибридный композиционный материал

Гибридные композиционные материалы необходимы для устранения недостатков волокон одного типа за счет включения в состав материала волокон другого типа, снижения цены композиционного материала за счет включения в состав некоторой доли более дешевых компонентов. Отмечается [5], что гибридный материал, содержащий 20 % углеродных и 80 % стеклянных волокон, имеет предел прочности на уровне 75 % от прочности углепластика. При этом стоимость гибридного композита составляет только 30 % от стоимости углепластика.

На рис. 6.19 [5] показано, что в диапазоне от  $-120^{\circ}\text{C}$  до  $+160^{\circ}\text{C}$  наблюдается существенная зависимость коэффициента линейного

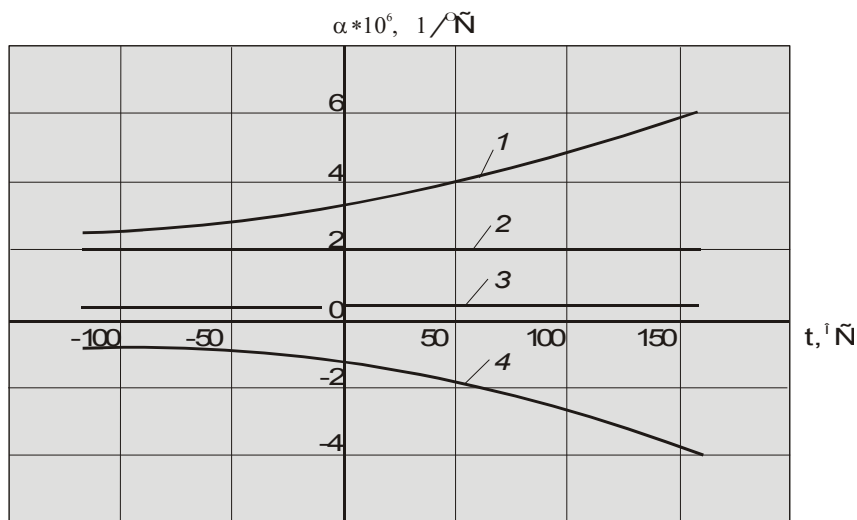


Рис. 6.19. Зависимость коэффициента линейного термического расширения двух- и трехкомпонентных композиционных материалов от температуры:

1 – стеклопластик; 2 – стеклоуглепластик; 3 – органоглепластик; 4 – углепластик

термического расширения (КЛТР) стеклопластика и углепластика от температуры. У гибридных композиционных материалов типа стеклоуглепластиков и органоглепластиков такой зависимости нет. Следовательно, подбирая материал компонентов, можно целенаправленно управлять свойствами композитов. Путем изменения содержания волокон различного типа можно эффективно влиять на модуль упругости, прочностные свойства, вязкость, тепловые характеристики гибридных композиционных материалов.





## 7. ОБРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технология изготовления изделий из композиционных материалов в большинстве случаев разрабатывается одновременно с проектированием этих изделий. Это связано, с одной стороны, с анизотропией свойств материалов и необходимостью учета влияния механической обработки на прочность готового изделия и, с другой, – с возможностью создания таких конструкций, которые позволяли бы снизить производственные затраты без ущерба для качества изделий. Форма и размеры наиболее ответственных изделий, несущих нагрузки, близкие к предельно допустимым для материала, обеспечиваются вместе с формированием материала. В результате этого последующая обработка изделий сводится к минимуму или вообще исключается. Использование механической обработки при изготовлении изделий из композиционных материалов позволяет полностью или частично выделить процесс формирования композиционного материала и резко снизить производственные затраты.

Классификация методов обработки композиционных материалов показана на рис. 7.1. При назначении режимов обработки композитов важное значение имеют их реальные физико-механические свойства, которые определяются типом и состоянием матричного материала, свойствами и геометрией упрочняющей фазы.

Резка ножницами применяется в основном для раскроя неотвержденных препрегов и тонких слоистых пластиков (толщиной менее 3,2 мм) [24], используемых для конструкций, не являющихся несущими. Применяются как обычные, так и дисковые ножницы. Режущая часть инструмента изготавливается из твердого сплава. Быстрый износ ножниц и возможность образования расслоений в зоне резания делают этот способ малоприменимым для раскроя других композиционных материалов.

Резка дисковыми и ленточными пилами [5, 24] применяется для раскроя стеклопластиков с термореактивными связующими и распиловки термопластов. Во время раскроя происходит размельчение упрочняющей фазы композиционного материала и как следствие –

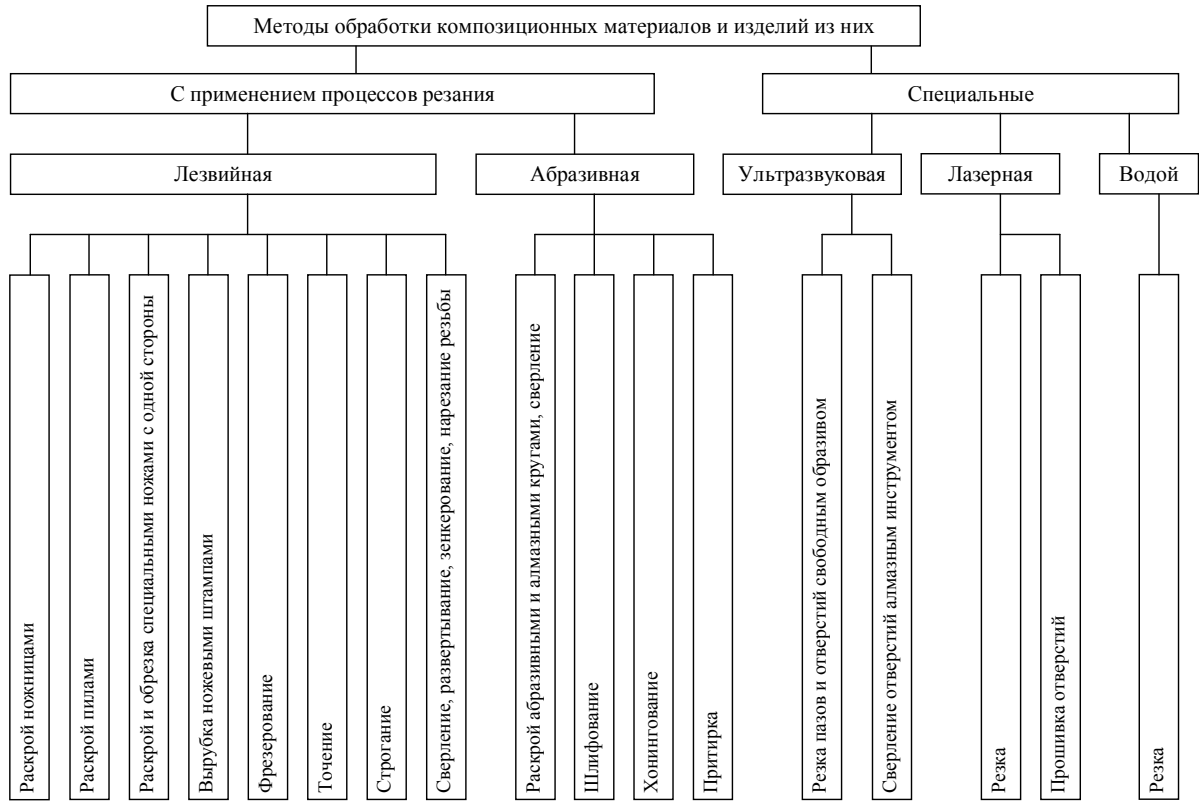


Рис. 7.1. Классификация методов обработки композиционных материалов и изделий из них

интенсивный износ зубьев пилы и снижение качества получаемого реза. Для повышения качества реза назначают высокие скорости резания, применяют направляющие кондукторы, ограничивающие поперечные перемещения инструмента. Применение охлаждающих жидкостей приводит к снижению износа инструмента, повышению скоростей резания и увеличению качества реза. Однако большинство композиционных материалов являются пористыми и не допускают применения смазок и жидкостного охлаждения. Режущая часть пил изготавливается из инструментальных сталей и вольфрамкобальтовых твердых сплавов. С целью увеличения стойкости инструмента и увеличения производительности резания зубья пил изготавливаются из твердосплавных смесей с добавлением алмазной крошки с предварительным твердофазным спеканием и пропиткой металлическим расплавом. В этом случае лезвийная обработка совмещается с алмазно-абразивной. Качество реза повышается, а окружная скорость дисковой пилы может достигать 3965 м/мин и ленточных – 2440 м/мин [24].

Раскрой и обрезка специальными ножами возвратно-поступательного действия аналогичны применяемому в швейной промышленности способу раскроя тканей. Применяют этот метод для раскроя готовых препрегов со скоростью резания до 22,9 м/мин. Однако этот способ требует дополнительных мер, обеспечивающих укрывание препрега от отходов резки. Метод непригоден для резки борноэпоксидных материалов в силу быстрого износа ножей.

Вырубка ножевыми штампами аналогична раскрою и обрезке специальными ножами. Применяется эта операция для вырубки за один рез целой заготовки. Листовой композиционный материал располагают между стальным резаком замкнутого контура и плитой из мягкой стали.

Фрезерование слоистых композиционных материалов осуществляется на металлорежущих станках фрезами, используемыми для обработки металлических материалов. При выборе схем закрепления заготовок и выборе режимов фрезерования следует учитывать склонность композиционных материалов к расслоению. Скорость резания для большинства композиционных материалов должна составлять 180...300 м/мин [24], глубина резания не должна превышать 0,25 мм, подача – до 0,15 мм/об. В качестве охлаждения рационально использование сжатого воздуха или тумана смазывающе-охлаждающих жидкостей.

Точение, как и фрезерование, осуществляется на соответствующих металлорежущих станках (токарных, расточных, обраба-

тывающих центрах). Режимы обработки определяются свойствами обрабатываемого композиционного материала и требуемым качеством обработанной поверхности. Для слоистых материалов подачи и глубины имеют малые значения, а скорость резания обеспечивается в пределах 183...305 м/мин [24]. Для терморезистивных материалов (например, стеклопластиков) режимы резания должны обеспечивать температуру в зоне резания не выше 300 °С [5]. Режущую часть резцов предпочтительно изготавливать из мелкозернистых твердых сплавов с низким содержанием кобальта (ВК2, ВК3М, ВК4), имеющих высокие значения теплопроводности [5]. Для обработки стекло-, угле- и органопластиков в качестве режущего инструмента применимы быстрорежущие стали [35]. Лезвийный инструмент, применяемый для обработки композиционных материалов, должен отвечать следующим требованиям [5, 35]:

- величины задних углов резания должны быть максимально увеличены (вплоть до 20...30 °) с целью снижения сил трения по задним граням инструмента;
- передние углы из соображений оптимального стружкообразования должны быть в пределах 0...15 °;
- режущая кромка должна быть острозаточенной (не допускаются большие величины износа);
- стружечные канавки для исключения прилипания продуктов резания должны быть отполированы.

Строгание применяется при обработке протяженных поверхностей. Требования к инструменту такие же, как и при токарной обработке.

Обработка отверстий (сверление, развертывание, нарезание резьбы) производится либо металлообрабатывающим инструментом, либо инструментом, размеры которого компенсируют упругие деформации обрабатываемого композиционного материала. Для сверл и разверток предпочтительны технологические ленточки уменьшенной ширины, а канавки для стока стружки – повышенной ширины и полированные [24]. Такой инструмент позволяет снизить трение, исключить забивание канавок стружкой и улучшить качество обработанных отверстий. Точность обработанных отверстий после сверления невелика и не превышает 11 квалитета, шероховатость по критерию  $R_z$  – 20 мкм и выше [5].

При необходимости ужесточить точность отверстий и снизить шероховатость обработанной поверхности проводят несколько операций: сверление, зенкерование с применением направляющего штифта, который базирует инструмент по предварительно просверленному отверстию, и развертывание. Режимы обработки и конструкция инструмента зависят от свойств обрабатываемого ма-

териала и условий обработки (наличия СОЖ, применения дополнительных устройств для направления инструмента и отвода продуктов обработки). В лучшем случае, основываясь на научных рекомендациях, проводят инженерные исследования. Наилучшие показатели качества обработки и технологические результаты обеспечивает применение алмазных сверл, хотя по существу это уже абразивное резание.

Нарезание резьбы в композиционных материалах – один из самых трудоемких процессов. Размеры метчиков и плашек должны учитывать пластические деформации обрабатываемого материала. Конструкция резьбы для соединения композиционных материалов с металлическими изделиями значительно отличается от стандартных типов резьбы. Кроме того, углы заточки резьбообразующего инструмента, применяемого для композиционных материалов, отличаются от соответствующих углов заточки металлообрабатывающих метчиков, плашек и резцов.

Абразивная обработка композиционных материалов применяется с целью обеспечения высокого качества обработанной поверхности. Применяется при раскросе и сверлении материалов со сверхтвердой упрочняющей фазой.

Раскрой абразивными и алмазными кругами применяется для обработки композиционных материалов, имеющих упрочняющую фазу из сверхтвердых материалов. Толщина кругов составляет 1...4 мм, скорость вращения – до 3500 мин<sup>-1</sup>, что позволяет обеспечить высокое качество поверхности реза. Для раскроя применяются круги карборунда на вулканитовой или на бакелитовой основе, а также алмазные круги на бакелитовой или металлической связках. Скорости резания достигают 2100 м/мин. Проведение этого вида обработки затрудняют необходимость интенсивного охлаждения зоны реза с целью исключения плавления наполнителя композиционного материала, а также быстрое засаливание инструмента материалом наполнителя и продуктами его разрушения.

Алмазный инструмент может иметь форму фрез (дисковые, пальцевые и фасонные), что позволяет вести высокопроизводительную обработку с высокой точностью не только на операциях раскроя, но и при формировании пазов, резьб и фасонных поверхностей.

Алмазное сверление отверстий является разновидностью абразивной обработки. Алмазные сверла представляют собой металлические стержни или трубки с нанесенной на торцевую и цилиндрическую поверхности алмазной крошкой зернистостью 60...100 [24], связанной металлической матрицей. Производительность такого сверления и качество обработанного отверстия очень высо-

кие, стойкость инструмента также высокая. Недостатком является засаливание инструмента продуктами резания. Снижению засаливания помогает внесение в конструкцию сверл канавок, придающих режущему алмазносному слою форму зубьев.

Шлифование, хонингование и притирка поверхностей изделий из композиционных материалов проводятся с целью обеспечения точной геометрии (формы и размеров) и снижения шероховатости. Шлифование и хонингование проводятся абразивным инструментом (кругами и брусками) из карбида кремния или окиси алюминия. Наилучшие результаты по производительности и качеству обработки обеспечивает алмазный инструмент. Недостаток его заключается в быстром засаливании и необходимости использования СОЖ для исключения оплавления материала наполнителя. Наименьшему засаливанию подвержен инструмент зернистостью 30...80 [24]. Шлифование может осуществляться абразивной и алмазной шкуркой в ленточном варианте. Притирка осуществляется с помощью абразивных и алмазных порошков. Недостаток обработки заключается в возможности шаржирования абразивом обрабатываемой поверхности.

Чтобы исключить оплавление наполнителя, избежать появления микротрещин в волокнах упрочняющей фазы из сверхтвердых материалов, применяют технологию размерной ультразвуковой обработки. Схема расположения инструмента и обрабатываемого изделия показана на рис. 7.2 [5].

В качестве рабочего инструмента используются суспензии из порошков сверхтвердых материалов (карбид бора, карбид кремния,

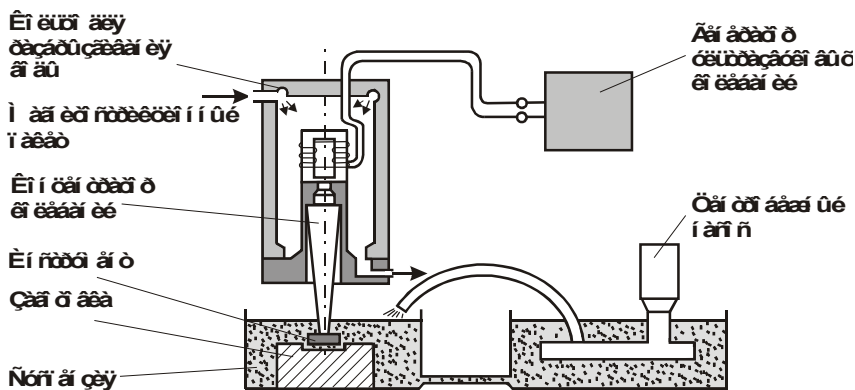


Рис. 7.2. Схема ультразвуковой обработки материала

оксид алюминия, алмаз) и формообразующий инструмент, выполненный из мягкого материала. В основе обработки лежит хрупкое разрушение обрабатываемого материала в зоне вдавливания в его поверхность единичной частицы абразива. При этом в зоне вдавливания абразивной частицы образуется сетка микротрещин, по которым происходит выкрашивание обрабатываемого материала. Абразивные частицы подаются в зону обработки в виде суспензии (чаще всего водной) под небольшим давлением. Для вдавливания абразивных частиц используется инструмент из отожженных или нормализованных низкоуглеродистых сталей.

Инструмент представляет собой пластину любой формы, выполненную на торце трансформатора ультразвуковых колебаний, которые инициируются магнитострикционным или пьезокерамическим преобразователем колебаний напряжения электрического тока высокой частоты (16...60 кГц) в механические колебания. Трансформатор имеет переменное поперечное сечение, изменяющееся, как правило, по линейной (конические трансформаторы) или экспоненциальной (экспоненциальные трансформаторы) зависимости. Длина концентратора (расстояние от торца преобразователя до торца, воздействующего на абразивные частицы) равна половине длины звуковой волны. Основное преимущество метода – возможность прорезать отверстия и пазы сложной формы в высокотвердых и сверхтвердых компонентах композиционных материалов, а также высокое качество боковых поверхностей обработанных отверстий (отсутствие привнесенных обработкой дефектов поверхностного слоя). Недостаток метода заключается в сложности оборудования и невысокой производительности процесса. Мягкие матричные материалы обрабатываются этим методом с очень низкой производительностью.

Ультразвуковое сверление отверстий алмазным инструментом отличается от алмазного сверления с наложением ультразвуковых колебаний на алмазные сверла. В последнем случае снижается трение инструмента об обработанную поверхность, уменьшается эффект прилипания продуктов резания к инструменту и, как следствие снижается его засаливание. Стойкость алмазных сверл возрастает в два и более раз. Недостаток метода заключается в сложности придания сверлу ультразвуковых колебаний.

Лазерная резка и лазерное прошивание отверстий в композиционных материалах основаны на испарении локальных объемов материала. Использование мощных лазеров на углекислом газе и столов с программным управлением позволяет с высокой точностью и в автоматизированном режиме раскраивать, вырезать отверстия в различных композиционных материалах (таблица) [5].

### Параметры лазерной резки композиционных материалов и волокнистых полуфабрикатов [5]

Композиционный материал, полуфабрикат	Толщина, мм	Скорость резания, м/с	Ширина реза, мм
Стеклоткань МКТ	5	0,8	0,5
Стеклоткань ТСФ	1,5	5,0	0,4
Кварцевая ткань	5	0,50	0,5
Стеклопластики на основе ткани МКТ и эпоксидного связующего	3	0,25	0,4
	6	0,10	0,4
	9	0,05	0,7
Стеклотекстолит ПСД-Д	15	0,01	0,8
Органопластик	5	1,50	0,5
Боропластик	3	0,30	0,4
Углепластик	3	0,50	0,5
Кварцевое стекло	1	0,02	0,2

Лазерная прошивка отверстий позволяет получать отверстия диаметром до 0,5 мм с высокой производительностью, что имеет большое практическое значение при соединении изделий из композиционных материалов с другими конструкциями. Недостаток метода заключается в низкой точности формы отверстий.

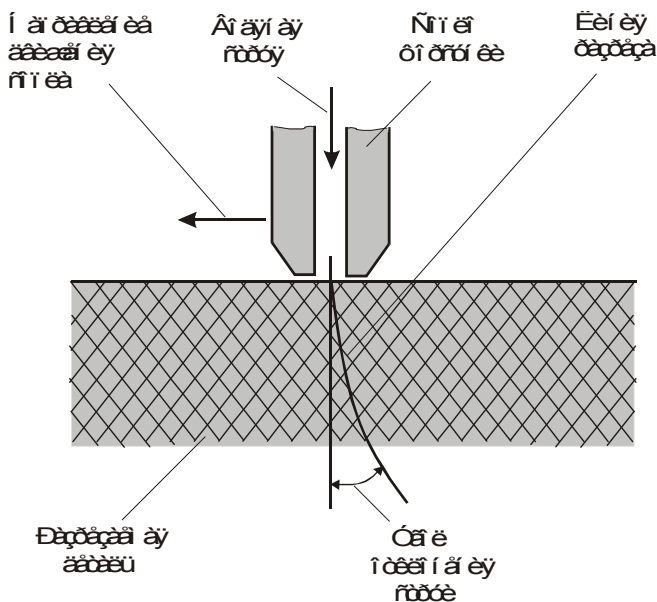


Рис. 7.3. Схема гидравлической резки материала



---

Важное место среди технологий раскроя композиционных материалов занимает резка струей воды, подаваемой из сопла со скоростью 0,6...0,8 м/с (рис. 7.3) [5]. Для обеспечения такой скорости давление в системе подачи воды должно быть равно 294...441 МПа. Сопла диаметром 0,1...0,3 мм обеспечивают ширину реза 0,15...0,35 мм со скоростью до 4 м/мин. Увеличение скорости истечения струи воды позволяет обеспечить ей жесткость и твердость и разрезать композиционные материалы толщиной до 25 мм. Однако с повышением давления в системе подачи воды возрастает температура ее замерзания, во избежание последнего используют водно-спиртовые смеси (смесь воды и глицерина). Метод отличается следующими недостатками: высокий уровень шума; сложность системы фильтрации воды; возможность расслоения материала в зоне резания.



## **8. КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

По принятым в машиностроении классификациям соединения деталей из композиционных материалов могут быть отнесены к разъемным и неразъемным, подвижным и неподвижным. В то же время специфические свойства композиционных материалов позволяют создавать конструкции, нередко удовлетворяющие противоречивым и даже, казалось бы, взаимоисключающим требованиям. Жесткость требований, предъявляемых к конструкциям из композиционных материалов, является основанием для разработки новых технологий их изготовления. Поэтому в данном разделе конструкции соединений деталей из композиционных материалов рассматриваются в неразрывной связи с их назначением и технологией производства.

### **8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Конструкции соединительных сборочных единиц, изготовленных с применением композиционных материалов, по характеру передачи нагрузок подразделяют на стыковочные и поддерживающие. Наиболее распространены комбинированные и металлопластиковые стыковочные соединения. В стыковочных соединениях нагрузки, приходящиеся на стык, воспринимаются металлическими элементами и передаются через соединительный отсек, представляющий собой оболочку из композиционного материала. В поддерживающих соединениях нагрузка на стыке передается непосредственно адгезионными прослойками (например, соединение обшивки с сотовым наполнителем). Соединения деталей из композиционных материалов подразделяют на три класса [5]:

- сплошные (клеевые, формовочные, сварные);
- механические (резьбовые, клепаные, самозаклинивающиеся, сшивные и игольчатые);

– комбинированные (клееклепаные, клеесшивные, клееигольчатые, клееболтовые, клеерезбовые и другие сочетания механических и клеевых соединений).

Среди этих соединений только механические являются разъемными или частично разъемными, которые применяют не с целью обеспечения возможности разборки, а для передачи сосредоточенных нагрузок в соединениях элементов, имеющих большую толщину. Прочность и выносливость этих соединений определяется уровнем концентрации напряжений около крепежных отверстий. При нагружении этих соединений происходит перераспределение напряжений, что приводит к изменению прочностных характеристик конструкции. Для снижения концентрации напряжений в зоне отверстий композиционные материалы армируют металлической фольгой или высокопрочными пленками. Применение армирования позволяет снизить массу конструкции без ущерба для эксплуатационных характеристик. В свою очередь снижение массы позволяет увеличить работоспособность конструкции в условиях динамических нагрузок. Важнейшими параметрами, определяющими тип и конструктивные особенности механических соединений, являются:

- механические характеристики соединяемых материалов и дополнительных армирующих элементов;
- количество и геометрическое расположение крепежных элементов;
- размеры отверстий и расстояние от отверстий до кромки скрепляемых элементов;
- количество скрепляемых слоев в конструкции.

Неразъемные сплошные соединения применяют для передачи распределенной нагрузки, неразъемные комбинированные – для передачи концентрированной нагрузки с ее перераспределением. При этом важнейшими параметрами, определяющими тип и конструктивные особенности соединения, являются:

- соотношение толщины соединяемых элементов;
- длина и жесткость адгезионной прослойки;
- физико-механические свойства клеевой прослойки;
- соотношение модулей сдвига клеевого и механического соединений.

Способность композиционных материалов к перераспределению нагрузки в процессе эксплуатации должна учитываться при проектировании конструкций и соединений элементов в них. Необходимо учитывать также следующие факторы:

- наличие и величину натяга в механических соединениях при изготовлении и при эксплуатации изделий;

- усилия зажима резьбовых крепежных элементов;
- точность размеров, формы и расположения отверстий под крепежные элементы;
- изменение свойств композиционного материала в процессе эксплуатации, связанное с изменением температуры эксплуатации, влажности окружающей среды и т. п.

Проектирование конструкций из композиционных материалов с учетом перечисленных факторов делает необходимым:

- изготовление на стадии разработки технического и рабочего проектов опытных образцов соединений и всего изделия с целью их испытания;
- изготовление опытной серии изделий, их контрольную эксплуатацию и внесение изменений в рабочую и технологическую документацию.

## 8.2. КЛЕЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Сплошные неразъемные соединения получают путем использования веществ (клеев), имеющих высокий уровень адгезии к соединяемым материалам. В качестве клеев используются материалы на основе синтетических полимеров. Конструктивно швы клеевых соединений выполняются внахлест с возможным применением дополнительных накладок, усиливающих конструкции. На рис. 8.1 [24] показаны конструкции клеевых швов.

Технология выполнения клеевых соединений предусматривает следующие этапы:

- подготовка склеиваемых поверхностей с целью обеспечения высокой адгезии клея (может проводиться длительно и в несколько этапов);
- нанесение слоя клея на одну или на обе склеиваемые поверхности;
- прижатие склеиваемых поверхностей друг к другу в особых температурно-временных условиях.

Достоинствами клеевых соединений являются:

- высокие показатели прочности;
- возможность соединять детали и элементы конструкции, имеющие очень малую толщину;
- способность соединять материалы, имеющие различные физико-механические свойства;
- способность соединять детали, имеющие разную толщину;

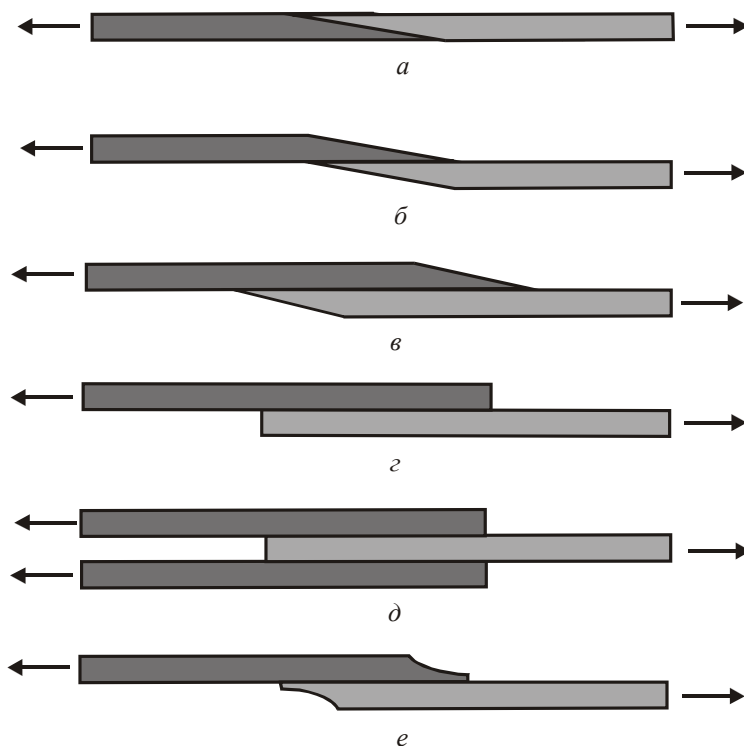


Рис. 8.1. Конструкции клеевых швов:

*a* – соединение в «ус»; *б* – нахлесточное соединение со скосом; *в, г* – простое нахлесточное соединение; *д* – двойное нахлесточное соединение; *е* – модифицированное нахлесточное соединение

- отсутствие эффекта снижения прочности соединяемых деталей;
- возможность обеспечить соединению герметичность и исключить проявление коррозии;
- хорошие тепло-, звуко-, и электроизоляционные свойства;
- универсальность по форме склеиваемых поверхностей и как следствие – возможность создания изделий сложной формы.

Недостатки клеевых соединений:

- нестабильность физико-механических и электрических свойств в течение времени эксплуатации и при изменении условий эксплуатации (температуры, влажности, состава окружающей среды);
- токсичность клеев;
- пожароопасность;

- сложность технологической оснастки и процесса подготовки склеиваемых поверхностей;
- недостаточная эффективность соединения при высокой жесткости склеиваемых деталей.

### 8.3. ФОРМОВОЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Формовочные соединения аналогичны клеевым. Процессы образования формовочных соединений называются приформовкой и контактным формованием. Эти соединения широко применяются при производстве крупных изделий из стеклопластиков и других композитов. Приформовка заключается в нанесении в место стыка соединяемых деталей слоя наполнителя (например, стеклоткани), пропитанного связующим. После отверждения связующего образуется прочное соединение. Контактное формование от приформовки отличается последовательностью операций: сначала отдельно формуется и пропитывается матричным материалом (клеем) новый слой наполнителя и после отверждения производится операция склеивания нового слоя с заготовкой изделия таким же матричным материалом.

### 8.4. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ





Сварные соединения относятся к сплошным и обеспечиваются путем нагрева или химического взаимодействия материала свариваемых элементов конструкции. При этом происходит исчезновение границы раздела между материалами изделий в зоне соединения за счет их частичного или полного перемешивания. В случае сварки полимерных композиционных материалов прочность сварного шва определяется размерами, формой и ориентацией макромолекул [5]. Сварке чаще всего подвергаются изделия, изготовленные из одинаковых материалов. Нагрев материала свариваемых изделий обеспечивает взаимодиффузию молекул материала в зоне сварки деталей. Такой же эффект может быть достигнут с помощью растворителя, нанесенного на свариваемые поверхности. Диффузионная сварка используется для соединения деталей из эластопластов и термопластов. Основным недостатком таких соединений заключается в изменении структуры материала в зоне шва.

Химическая сварка отличается от диффузионной тем, что вместо растворителя используется химический присадочный реагент, который вступает в химическую реакцию с материалом свариваемых изделий без образования самостоятельной непрерывной фазы. Химическая сварка применяется для соединения деталей, изготовленных из термопластов и реактопластов с поперечными связями между молекулами.

## 8.5. РЕЗЬБОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Резьбовые соединения изделий из композиционных материалов выполняются посредством нарезания резьбы на сопрягаемых поверхностях соединяемых деталей, или посредством металлических крепежных изделий. Конструкция резьбы (ее диаметр и профиль) при сопряжении деталей из полимерных композиционных материалов отличается от конструкции стандартных типов резьбы. Как правило, проектируемые конструкции предусматривают резьбовое сопряжение детали из полимерного композита с металлической деталью, либо между двумя деталями из полимерного композиционного материала располагают металлическую деталь с двумя резьбовыми частями. Учитывая, что металл выдерживает более высокие нагрузки на срез, чем полимерные композиционные материалы, применяемые резьбы имеют несимметричный профиль. В таблице представлены профили применяемых резьб, их достоинства и недостатки [5].

**Типы несимметричных профилей резьбы, используемых в соединениях композитов с металлами**

Профиль резьбы	Преимущества	Недостатки
Треугольный 	Простота изготовления и контроля, большая площадь среза	Наличие радиальных напряжений при нагрузке, концентрация напряжений в острых углах
Круглый 	Малая концентрация напряжений, большая площадь среза	Наличие радиальных напряжений при нагрузке, трудность изготовления и контроля
Прямоугольный 	Отсутствие радиальных напряжений при нагрузке, простота изготовления и контроля	Уменьшение площади среза и снижение прочности из-за наличия ленточной канавки, трудность изготовления
Упорный 	Отсутствие радиальных напряжений при нагрузке, большая площадь среза	Наличие концентрации напряжений, трудность изготовления

Прочность резьбового соединения лимитируется низким сопротивлением сдвиговым нагрузкам связующего полимерных композиционных материалов. Существует два направления увеличения прочности таких соединений: использование специальных конструктивных решений и изменение технологии изготовления изделий из композиционных материалов.

Конструктивные решения принимаются с учетом характера нагружения. Так, например, при нагружении оболочки из композиционного материала давлением изнутри резьба на ней нарезается наружной, а металлическая сопрягаемая деталь имеет внутреннюю резьбу (рис. 8.2, а) [5]. И, наоборот, при нагружении снаружи металлическая деталь выполняется с внутренней резьбой (рис. 8.2, б). Возможно применение конструкций, в которых деталь из композиционного материала имеет одновременно и внутреннюю и наружную резьбы, отличающиеся разной длиной свинчивания. В этом случае прочность соединения значительно возрастает, но усложняется изготовление металлической детали.

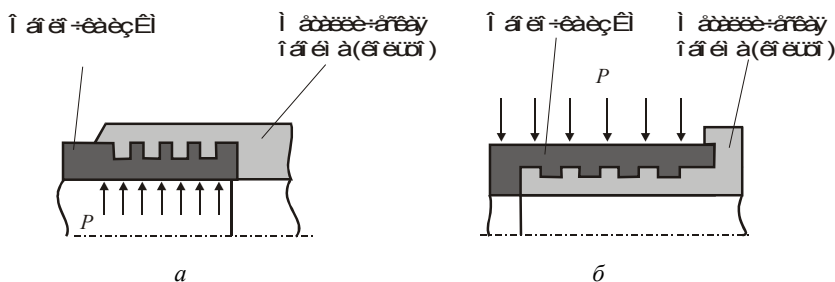


Рис. 8.2. Способы расположения элемента соединения композиционного материала с металлом в зависимости от места приложения давления  $P$ :

$a$  – схема с внутренним и  $b$  – с внешним давлениями

Изменение технологии изготовления изделия из композиционного материала возможно в следующих направлениях:

- повышение эластичности связующего;
- специальная укладка армирующего наполнителя при изготовлении детали, предусматривающая восприятие им нагружения на срез (это повышает допустимые напряжения до 8 раз);
- проклеивание резьбового соединения (после чего оно становится неразъемным), повышающее прочность до 30 %.

Металлические крепежные изделия (болты и шпильки) применяются для соединения как тонкостенных изделий, так и фланцев. В случае соединения болтами (в комплекте с гайками) тонкостен-



ных изделий большое значение имеет их толщина и состав соединяемых материалов. Так, для изделий толщиной менее 1,5 мм применяют дополнительные накладки или втулки. Для соединения деталей из стекло- и органопластиков применяют крепежные изделия относительно больших размеров ( $\varnothing > 8$  мм), а для боропластиков и углепластиков, напротив, – малых размеров.

Важными факторами являются количество крепежных элементов и их расположение. Поскольку отверстия, в которые вставляются крепежные элементы, являются концентраторами напряжений, расстояние между отверстиями и краем детали, а также расстояние между соседними отверстиями имеют большое значение. При этом важно учитывать направление нагрузки, возможность ее перераспределения между крепежными элементами, точность формы и размеров отверстий, а также точность их взаимного расположения.

Для скрепления деталей встык используют также штифтоболтовые и штифтошпилечные соединения (рис. 8.3) [6]. Штифты, которые вставляются в отверстия во фланцевых утолщениях, выполняют роль гаск. Фланцевые утолщения могут иметь различные конструкции, изготавливаться различными методами и упрочняться

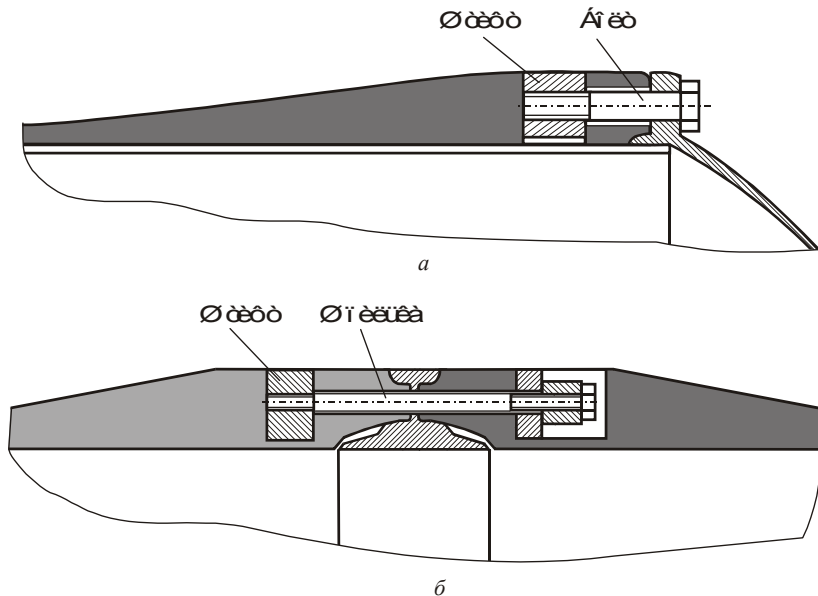


Рис. 8.3. Конструкция штифтоболтовых (а) и штифтошпилечных (б) соединений

введением дополнительных элементов в виде металлической фольги, борных пленок и др. С целью распределения нагрузки на фланце отверстия под штифты могут располагаться не в один, а в несколько рядов.

## 8.6. КЛЕПАНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Неразъемные соединения, получаемые посредством установки заклепок, находят применение в отраслях машиностроения, широко использующих конструкционные композиционные материалы. В первую очередь речь идет о самолетостроении. Клепанные соединения выполняют в виде закономерно расположенных рядов (так называемых швов) заклепок, соединяющих тонкостенные изделия. Виды наиболее широко применяемых швов представлены на рис. 8.4 [5]. Заготовка заклепки устанавливается в предварительно просверленные отверстия в соединяемых деталях, после чего проводится операция изготовления второй (замыкающей) головки заклепки. Предварительно перед расклепыванием головки соединяемые детали сжимаются. После операции расклепывания проводят контроль полученного соединения.

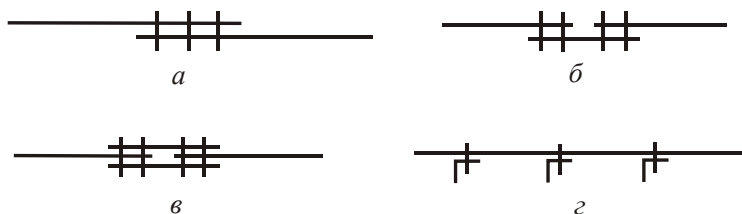


Рис. 8.4. Виды клепанных изделий:

*а* – внахлест; *б* – встык с одной накладкой; *в* – встык с двумя накладками; *г* – стрингерные соединения

Для соединения деталей из композиционных материалов используют заклепки из легких сплавов. Процесс расклепывания заготовки осуществляется без предварительного нагрева. Отверстия под заклепки, как правило, обрабатываются в соединяемых деталях совместно, что позволяет исключить погрешности их взаимного положения. Наиболее широкое применение имеют стержневые заклепки. Замыкающая головка формируется специальным инструментом ударного (клепальные молотки) или раскатывающего (пуансоны – раскатники) действия. При необходимости обеспечения герметичности клепаной конструкции используют упругие про-

кладки из резины, металла, пластмасс. Лучшая герметизация обеспечивается применением специальных материалов – герметиков, которые после полимеризации приобретают упругие свойства и высокую адгезию к материалу изделия и заклепки.

Кроме стержневых широко применяются специальные заклепки, примеры которых приведены на рис. 8.5 [24]. Для расчета прочности клепаных соединений разработаны методики, часть из которых стандартизована на уровне предприятий и отраслей промышленности.

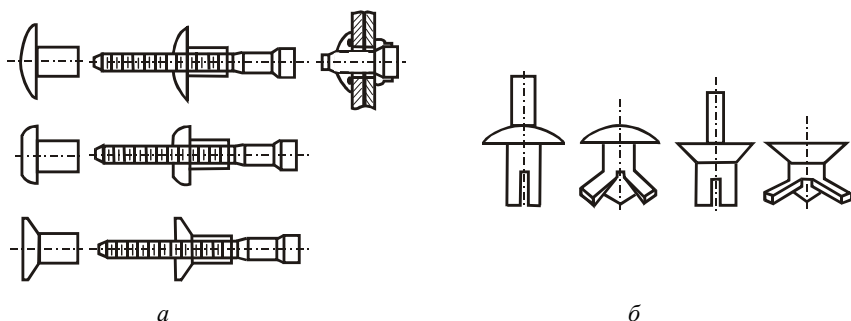


Рис. 8.5. Заклепки для одностороннего доступа:

*а* – с втягиваемым и обрезным стержнем; *б* – алюминиевые заклепки с забиваемым стержнем для расклинивания лепестков

## 8.7. САМОЗАКЛИНИВАЮЩИЕСЯ СОЕДИНЕНИЯ

В местах соединения изделий из композитов происходит ослабление прочностных свойств материалов за счет дополнительных концентраторов напряжений вблизи отверстий, проточек, резьбы. Выше, на рис. 8.2, было показано конструктивное решение, позволяющее увеличить прочность соединения за счет использования эксплуатационной нагрузки. В авиастроении нашли применение аналогичные конструкторские решения, позволяющие использовать значительные эксплуатационные нагрузки для увеличения прочности соединения. В основу конструкторских решений положено требование обеспечения сжимающих напряжений между элементарными слоями композиционного материала. При увеличении нагрузки на соединение сжимающие напряжения должны возрастать и как следствие – увеличивать его прочность и несущую способность.

Примеры самозаклинивающихся соединений показаны на рис. 8.6 [5]. Как видно на рисунках, заклинивающиеся профили

располагают на конических сопрягаемых поверхностях. Это позволяет равномернее распределить нагрузки по толщине детали из композиционного материала. Специальное профилирование заклинивающихся поверхностей позволяет равномерно распределять нагрузки по длине соединения.

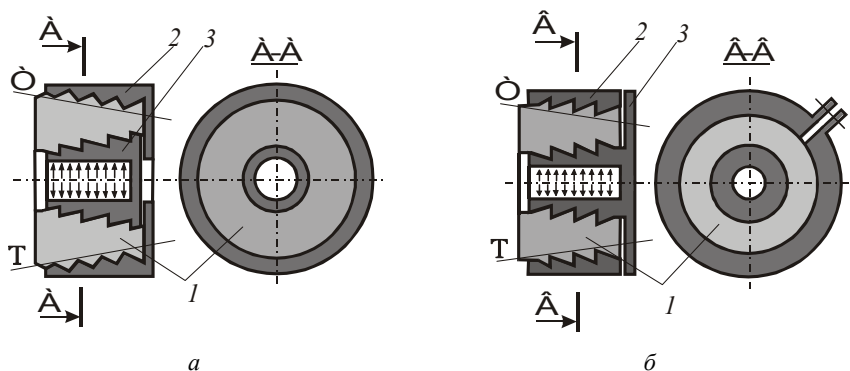


Рис. 8.6. Самозаклинивающиеся соединения:

*a* – кососимметричное; *б* – симметричное; 1 – композиционный материал; 2, 3 – неразъемные (*a*), разъемные (*б*) металлические обоймы

В зависимости от характера нагружения и конструкции опорных элементов самозаклинивающиеся соединения могут быть различными. На рис. 8.6 представлено разборное самозаклинивающееся соединение труб из полимерного композиционного материала, которые эксплуатируются при наличии внутреннего давления. Конические поверхности Т-Т, снабжены специальными заклинивающимися канавками, которые могут быть спиральными (рис. 8.6, *a*) или кольцевыми (рис. 8.6, *б*). Угол наклона самозаклинивающегося профиля может быть неизменным по всей длине, или изменяться по заданному закону, а самозаклинивающиеся профили располагаться асимметрично (рис. 8.6, *a*) и симметрично (рис. 8.6, *б*). В соединении используются две металлические обоймы (2 и 3), которые с помощью днища образуют единую силовую конструкцию. При эксплуатации соединения под действием давления происходит равномерное распределение нагрузки между обоймами. При этом труба из композиционного материала сдавливается с усилиями, которые возрастают при увеличении давления. При выполнении обжим со спиральными поверхностями конструкция со-

бирается путем свинчивания. В случае использования кольцевых конических поверхностей обоймы делаются разъемными.

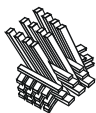
### **8.8. СШИВНЫЕ И ИГОЛЬЧАТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

При соединении тонкостенных деталей из композиционных полимерных материалов важным фактором является равномерное распределение нагрузки в зоне соединения. В тех случаях когда клеевые соединения не обеспечивают достаточной прочности, а механическое крепление с помощью болтов и заклепок значительно ослабляет конструкцию, могут быть применены сшивные и игольчатые соединения. Прочность таких соединений близка к прочности материала скрепляемых деталей, а их долговечность может превышать долговечность болтовых соединений (на примере фактических данных) до 18 раз [5].

### **8.9. КОМБИНИРОВАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

К комбинированным относятся неразъемные соединения. Они совмещают клеевые и механические соединения (клееклепаные, клеесшивные, клееигольчатые, клееболтовые, клеерезьбовые). Такие соединения выдерживают большие нагрузки, одновременно распределяя их по всей контактируемой площади сопрягаемых деталей. Они позволяют полностью использовать несущую способность композиционного материала, снижая влияние концентраторов напряжений в зоне механического крепления.

Особую группу комбинированных соединений составляют фланцы, заформованные в различные оболочки и трубы, заформованные фитинги и соединительные втулки [6]. Такие соединения рассчитаны на передачу больших сосредоточенных нагрузок от металлических ответных изделий к композиционному материалу.



## **9. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Основными механическими свойствами композиционных материалов являются хорошо известные стандартные параметры, такие как предел прочности и модуль Юнга при растяжении и сжатии ( $\sigma, E$ ), предел прочности и модуль сдвига ( $\tau, G$ ), коэффициент Пуассона ( $\mu$ ). Особенности строения композиционных материалов предъявляют некоторые специфические требования к форме и размерам образцов, схемам их нагружения. В данном разделе обсуждаются некоторые из этих схем.

### **9.1. ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ**

Испытание материалов на растяжение – традиционный вид механических испытаний. Растяжение композиционных материалов в направлении главных осей симметрии позволяет определить модули упругости, пределы прочности и коэффициенты Пуассона в этих направлениях.

При испытании на растяжение композитов с ориентированной структурой, в отличие от изотропных материалов, в значительной степени проявляется концевой эффект, связанный с неравномерным распределением напряжений по длине образца. По этой причине приходится значительно увеличивать длину рабочей части образца.

Для проведения испытаний на одноосное растяжение используют плоские и трубчатые образцы. Плоские образцы по форме можно разделить на полоски и двусторонние лопатки.

Образцы в виде двусторонних лопаток (рис. 9.1, *a*) характеризуются меньшей вероятностью разрушения в местах крепления и, таким образом, в большей степени гарантируют разрушение в пределах рабочей части. Образцы такого вида рекомендуют использовать для проведения испытаний композитов на растяжение перпендикулярно к слоям арматуры [1].

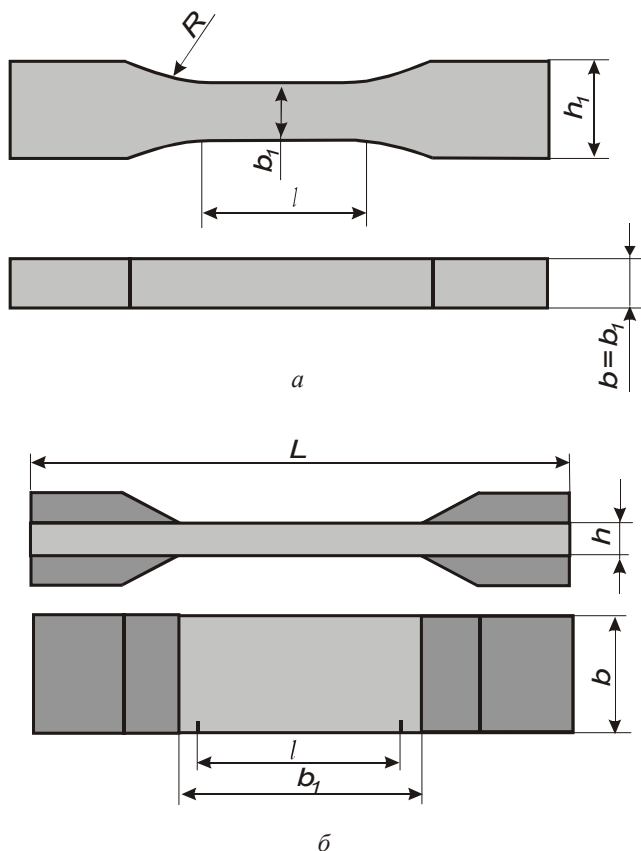


Рис. 9.1. Образцы для испытаний на растяжение:

*a* – лопатка, *б* – полоска с накладками

Образцы в виде полосок (рис. 9.1, *б*) используют при испытаниях с нагружением вдоль направления армирования. Основным недостатком образцов такого типа является сложность надежного закрепления полоски в захватах разрывной машины. Это связано с тем, что при малой длине и ширине образца наблюдается его проскальзывание или раздавливание в захватах машины растяжения. Для устранения этих недостатков к полоске приклеивают накладки из материала с большей пластичностью и меньшей жесткостью, чем испытываемый материал. Толщина накладок должна быть в 1,5...4 раза больше, чем толщина образца [5]. Условия проведения испытаний на растяжение приведены в ГОСТ 256.01-80.

При испытаниях композиционных материалов на растяжение следует избегать изгиба образцов. С этой целью в головках образцов сверлят отверстия и вставляют центрирующие пальцы (рис. 9.2) [1]. Одновременно центрирующие пальцы устраняют проскальзывание образца относительно захватов испытательной машины.

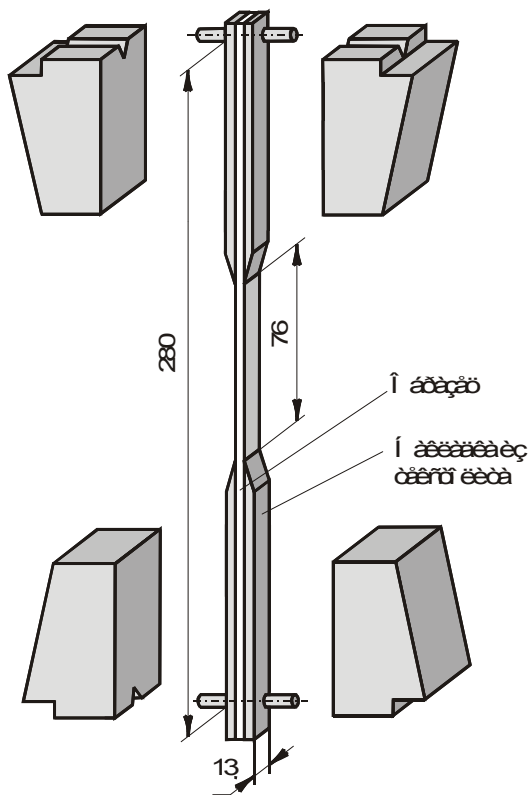


Рис. 9.2. Крепление образца при помощи фиксирующих пальцев, опирающихся на пазы захватов

На результаты механических испытаний значительное влияние оказывает направление укладки волокон. Под действием растягивающих напряжений многослойный композиционный материал, в зависимости от угла укладки волокон по отношению к растягивающим напряжениям, испытывает не только линейные, но и сдвиговые деформации. Многочисленными экспериментами установ-



лено, что эффективный модуль Юнга многослойных образцов растет с увеличением ширины образца, асимптотически приближаясь к модулю Юнга однослойного материала. Однако при испытаниях на растяжение широкого образца достаточно трудно обеспечить однородность напряженного состояния по всей его ширине. По этой причине часто используют трубчатые образцы (рис. 9.3), которые при определенных допущениях можно рассматривать как образцы бесконечной ширины [1].

Результаты осевого растяжения трубчатых и плоских образцов часто не совпадают. Это связано, главным образом, с различием напряженного состояния материала и технологии изготовления образцов. По этой причине сравнивать между собой механические характеристики, полученные при растяжении плоских и трубчатых образцов, не рекомендуется [1].

Формулы для расчета модулей упругости, пределов прочности и коэффициентов Пуассона при одноосном растяжении армированных КМ используют те же, что и при испытании изотропных материалов. Модуль нормальной упругости  $E$  (модуль Гука) рассчитывают по формуле

$$E = \frac{\Delta P}{F} \frac{l}{\Delta l}, \quad (9.1)$$

где  $\Delta P$  – приращение нагрузки в пределах упругой деформации;  $F$  – площадь поперечного сечения рабочей части образца;  $l$  – дли-

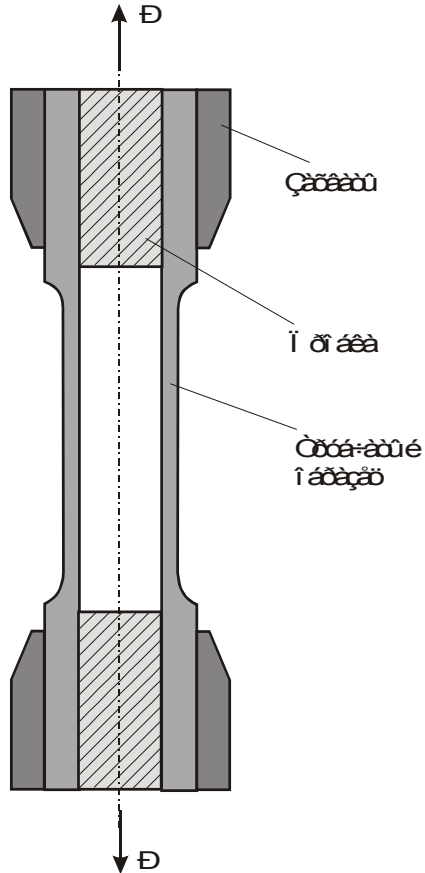


Рис. 9.3. Трубчатый образец для проведения испытаний на растяжение.  
P – растягивающее усилие

на рабочей части образца (база тензометра, на которой измеряется деформация);  $\Delta l$  – удлинение образца на базе  $l$  при изменении нагрузки на величину  $\Delta P$ .

Предел прочности  $\sigma_B$  рассчитывается по формуле

$$\sigma_B = \frac{P_p}{F}, \quad (9.2)$$

где  $P_p$  – разрушающее усилие.

Коэффициент Пуассона  $\nu$  находят из соотношения

$$\nu = \frac{\Delta l_{\perp}}{l_{\perp}} \frac{l_{\text{пр}}}{\Delta l_{\text{пр}}} = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\text{пр}}}, \quad (9.3)$$

где  $\Delta l_{\perp}$  – абсолютная поперечная деформация образца на базе  $l_{\perp}$ ;  $\Delta l_{\text{пр}}$  – абсолютная продольная деформация образца на базе  $l_{\text{пр}}$ ;  $\varepsilon_{\perp}$  и  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – относительные деформации образца в поперечном и продольном направлениях.

## 9.2. ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Для испытаний композиционных материалов на сжатие используют образцы в виде параллелепипедов, двусторонних лопаток и с круглым поперечным сечением. Прочность и жесткость анизотропных композитов в условиях сжатия определяют по тем же формулам, что и при растяжении.

При нагружении образцов вдоль главных осей используют образцы – параллелепипеды для определения упругих постоянных материалов. Ширина образцов  $b$  варьируется в пределах 13...30 мм, длина  $l$  выбирается таким образом, чтобы гибкость образца находилась в интервале:

$$\lambda = l / \sqrt{J_{\text{min}} F} = 11 \dots 15, \quad (9.4)$$

где  $J_{\text{min}}$  – минимальный момент инерции;  $F$  – площадь поперечного сечения образца.

Для предотвращения смятия концов образца на него крепятся дополнительные накладки. При ориентации волокон по отношению к сжимающей нагрузке под углом  $45^\circ$  стремятся выдерживать соотношение  $l/b \geq 3$ .

При определении жесткости и прочности КМ с различной ориентацией волокон используют образцы типа двусторонних лопаток с явно выраженной рабочей частью. Для устранения смятия торцов на концы образцов наклеивают накладки или наконечники.

При испытаниях образцов в условиях сжатия необходимо обеспечивать параллельность торцов (тангенс угла между осью образца и направлением приложения нагрузки не должен превышать 0,001).

### 9.3. ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИТОВ НА СДВИГ

Для композиционных материалов характерно малое сопротивление сдвиговым напряжениям. В композитах с ориентированной структурой различают два вида сдвиговых деформаций (рис. 9.4): сдвиг в плоскости укладки арматуры, происходящий под действием касательных напряжений  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{yx}$  (рис. 9.4, а), и межслойный сдвиг под воздействием касательных напряжений  $\tau_{xz}$  или  $\tau_{zx}$  (рис. 9.4, б).

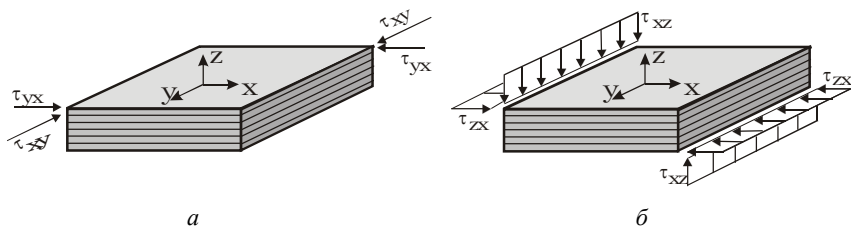


Рис. 9.4. Схема сдвига композиционного материала с ориентированной структурой:

а – сдвиг в плоскости укладки арматуры, б – межслойный сдвиг

Испытания на сдвиг в плоскости листа позволяют определить модуль сдвига  $G_{xy}$  и сдвиговую прочность  $\tau_{xy}$  материала. Для этого используют метод перекашивания пластин (рис. 9.5, а) в шарнирном четырехзвеннике (рис. 9.5, б) [1]. Модуль сдвига  $G_{xy}$  определяют по формуле

$$G_{xy} = \frac{P_p}{ah\sqrt{2}} \frac{1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (9.5)$$

где  $P_p$  – растягивающая нагрузка;  $a$  – сторона рабочей части пластины;  $h$  – толщина пластины;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные деформации пластины вдоль диагоналей растяжения и сжатия.

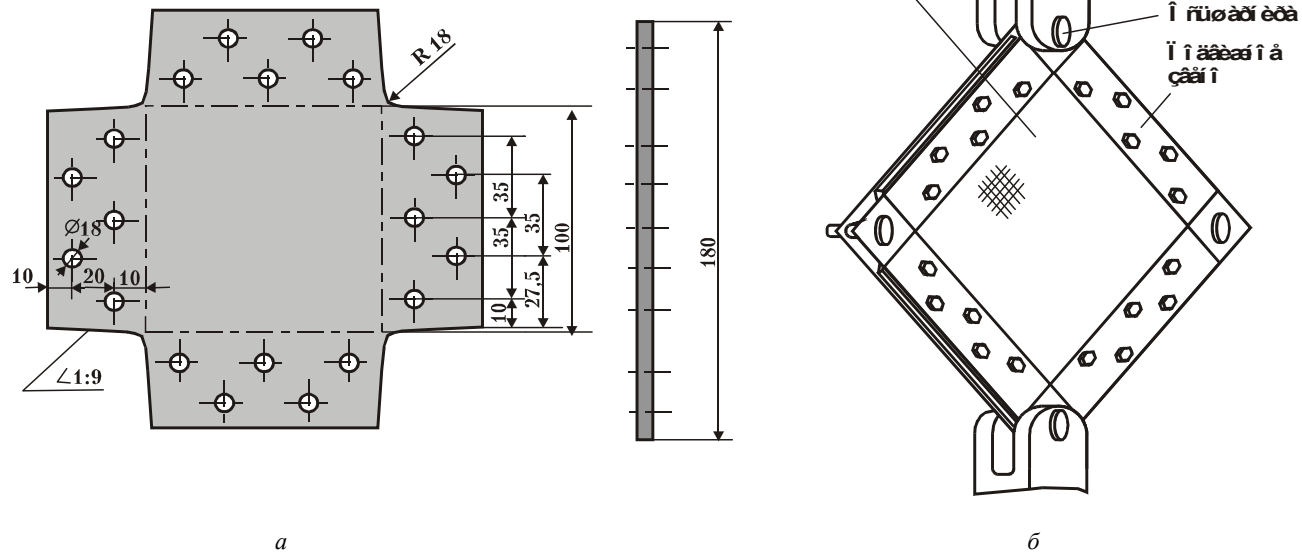


Рис. 9.5. Образец (а) и шарнирный четырехзвенник (б) для испытания армированных материалов на сдвиг

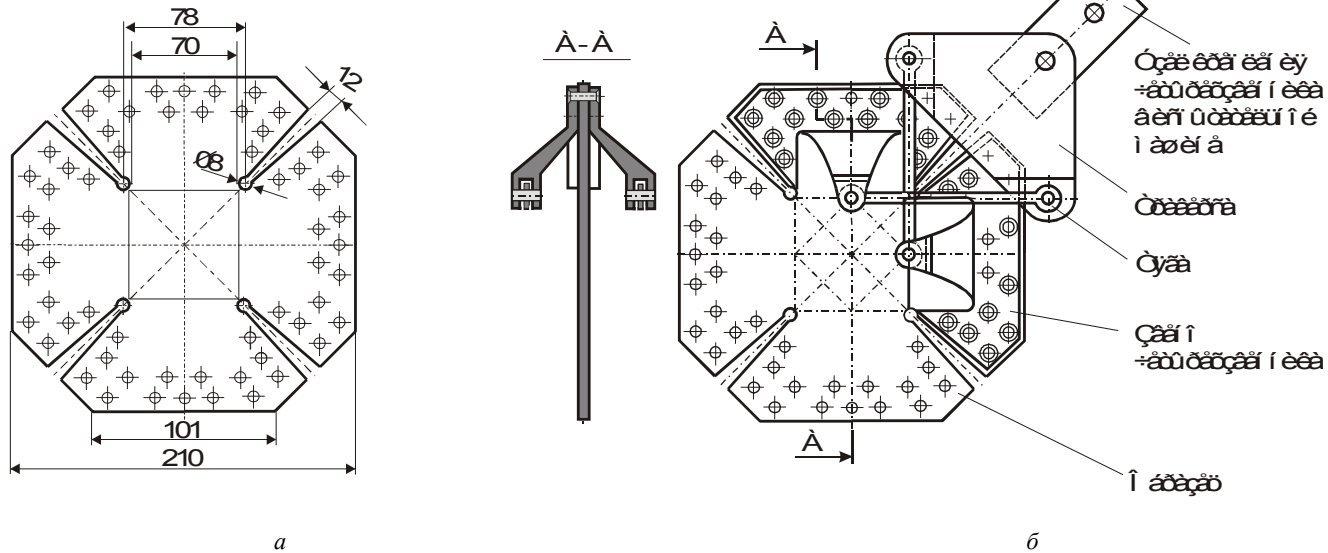


Рис. 9.6. Образец с пропилами (а) и модифицированный шарнирный четырехзвенник (б) для проведения испытаний композиционных материалов на сдвиг

Сдвиговую прочность  $\tau_{xy}$  в плоскости листа определяют из соотношения:

$$\tau_{xy} = \frac{P_p}{F} = \frac{P_p}{ah\sqrt{2}}. \quad (9.6)$$

При испытаниях образцов в углах рабочей части возникает концентрация напряжений, а в местах крепления возможно выпучивание материала. Для устранения этих недостатков в образцах делают пропилы, как указано на рис. 9.6, *а*, а нагружение производят в модифицированных четырехзвенниках (рис. 9.6, *б*) [1]. В подобных конструкциях концентрация напряжений значительно снижается, так как нагрузка прикладывается на некотором расстоянии от рабочей части образца.

При испытаниях композиционных материалов на межслойный сдвиг используют образцы двух типов: с двумя несимметрично расположенными надрезами (рис. 9.7, *а*) и с двумя симметрично расположенными надрезами и центральным отверстием (рис. 9.7, *б*).

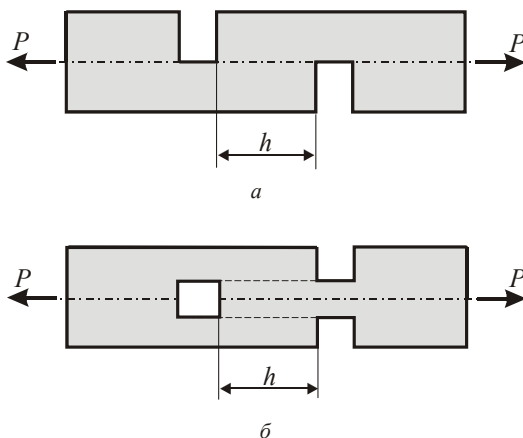


Рис. 9.7. Образцы для проведения испытаний композиционных материалов на межслойный сдвиг:

*а* – образец с несимметричными надрезами, *б* – образец с симметричными надрезами.  $h$  – длина, на которой происходит сдвиг материала,  $P$  – растягивающее усилие

Прочность при межслойном сдвиге  $\tau_{м.с}$  определяют по формуле:

$$\tau_{м.с} = P_p / F. \quad (9.7)$$

где  $F$  – площадь образца, на которой происходит сдвиг;  $P_p$  – усилие в момент разрушения образца.

Площадь поперечного сечения  $F$  для образцов с двумя надрезами в разных сечениях равна  $hb$ , для образцов с двумя надрезами в одном сечении –  $F = 2hb$ , где  $h$  – расстояние между надрезами,  $b$  – ширина образца.

Модуль межслойного сдвига рассчитывают по формуле

$$G_{\text{м.с}} = \frac{\Delta P}{F \Delta \gamma}, \quad (9.8)$$

где  $\Delta P$  – приращение нагрузки;  $\Delta \gamma$  – среднее приращение деформации сдвига, соответствующее величине  $\Delta P$ ,  $\Delta \gamma = \Delta l_c / h_1$ ;  $\Delta l_c$  – смещение при сдвиге, определяемое разностью общего смещения  $\Delta$ , измеряемого в испытаниях, и деформации растяжения  $\Delta l_p$

$$\Delta l_c = \Delta - \Delta l_p = \Delta - \frac{\Delta P l_{\text{б.т}}}{bcE}, \quad (9.9)$$

где  $h_1$  – средняя толщина одного слоя связующего,  $h_1 = c/n$ ;  $c$  – толщина образца;  $n$  – число слоев волокон в образце;  $l_{\text{б.т}}$  – база тензометра.

Результаты расчетов показателей межслойного сдвига можно использовать для сравнительного анализа свойств различных КМ, так как на них в значительной степени оказывают влияние форма и размеры образцов, всевозможные структурные и технологические дефекты, которые невозможно учесть аналитически [1].

#### 9.4. ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ И РАСТЯЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА

Механические характеристики композиционных материалов можно определить при испытаниях кольцевых образцов. Эта методика характеризуется достаточной простотой, высокой воспроизводимостью и надежностью получаемых результатов. Растяжение кольцевых образцов осуществляют жесткими полудисками, эластичным кольцом, либо гидростатическим давлением (рис. 9.8) [5]. Для снижения трения контактирующие поверхности колец и полудисков смазывают графитовыми смазками.

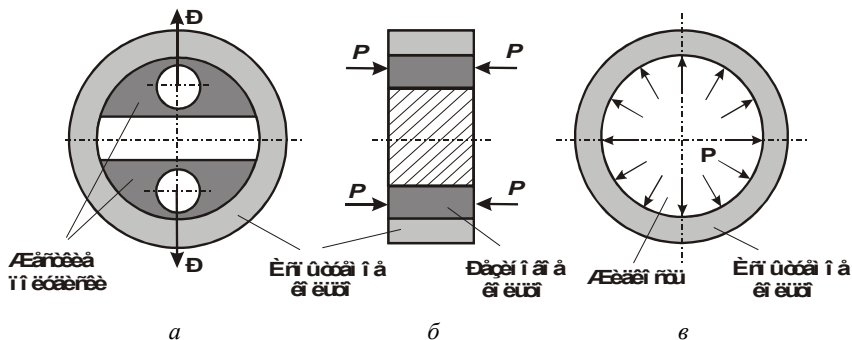


Рис. 9.8. Схемы нагружения кольцевых образцов при испытаниях на растяжение: а – нагружение жесткими полудисками; б – нагружение эластичным кольцом; в – нагружение путем приложения гидростатического давления

Растяжение кольцевых образцов полудисками (ГОСТ 25603-82) используют для определения прочности, модуля упругости в окружном направлении и прочности при сдвиге. Разрушающее напряжение рассчитывают по формуле

$$\sigma_p = \frac{P_p}{2bh} k_{\text{изг}}, \quad (9.10)$$

где  $P_p$  – разрушающая нагрузка;  $b$  – ширина кольцевого образца;  $h$  – толщина кольцевого образца;  $k_{\text{изг}} = 1,01 \dots 1,05$  – коэффициент, учитывающий влияние изгибающих напряжений при растяжении, зависящий от относительной толщины образца.

Модуль упругости рассчитывают из соотношения

$$E = \frac{\Delta P}{2bh} \frac{\pi D}{2\Delta U}, \quad (9.11)$$

где  $D$  – средний диаметр образца;  $\Delta U$  – изменение расстояния между полудисками при увеличении нагрузки на величину  $\Delta P$ .

Нагружение образцов гидростатическим давлением, либо эластичным кольцом позволяет исключить влияние отрицательных эффектов, связанных с изгибом кольца в месте разреза жестких полудисков.

Сжатие кольцевых образцов производят путем создания наружного давления жесткими полудисками, эластичным кольцом, гидростатическим давлением, либо металлической лентой (рис. 9.9) [5].



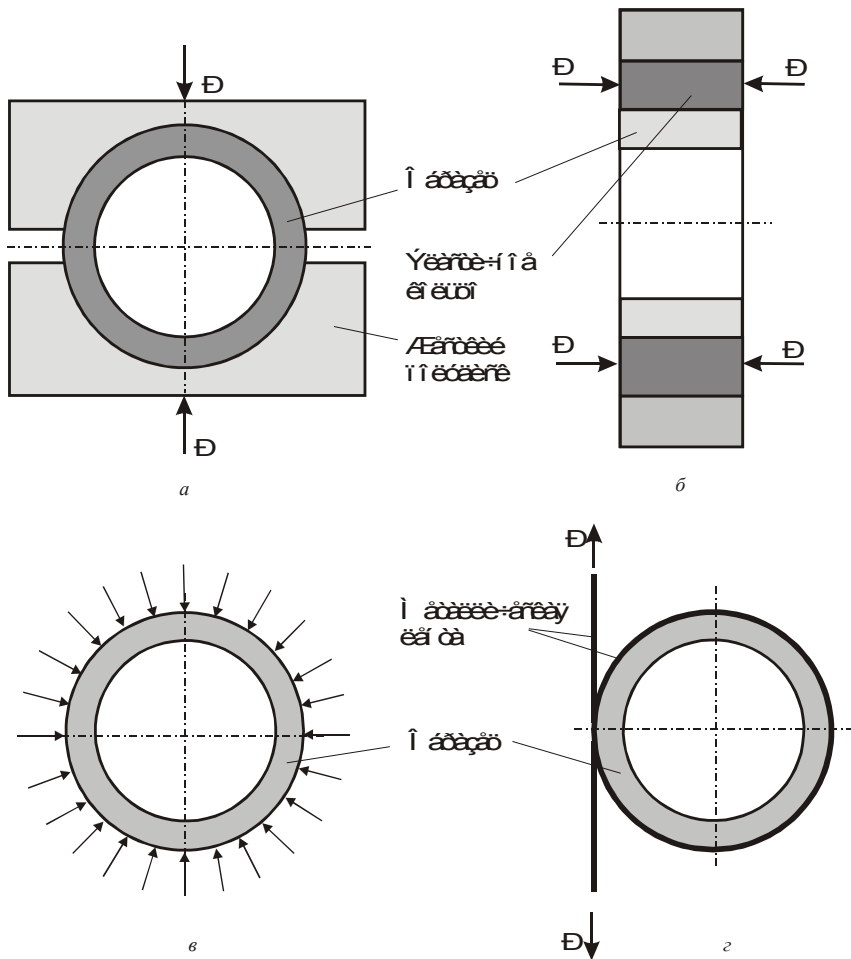


Рис. 9.9. Схемы нагружения кольцевых образцов при испытаниях на сжатие: а – жесткими полудисками; б – эластичным кольцом; в – гидростатическим давлением; г – металлической лентой



## **10. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Композиционные материалы относятся к группе высокотехнологичных материалов. Как правило, своим появлением они обязаны развитию таких высокоразвитых отраслей промышленного производства, как авиа- и ракетостроение, судостроение. В то же время после отработки технологий изготовления, снижения стоимости до приемлемого уровня композиционные материалы постепенно используют и другие отрасли. В частности, они широко применяются для изготовления товаров народного потребления. Анализ условий работы современных проектируемых конструкций и темпов внедрения в производство композиционных материалов, достигнутых в последние десятилетия, позволяет обоснованно считать, что композиты можно называть материалами XXI в.

### **10.1. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТОВ В АВИА- И РАКЕТОСТРОЕНИИ**

Аэрокосмическая промышленность является одним из основных заказчиков и потребителей композиционных материалов. На рис. 10.1 [5] представлена относительная доля композиционных материалов в массе таких конструкций, как космические аппараты, стратегические ракеты с твердотопливными двигателями (РДТТ), крупногабаритные твердотопливные ракетные двигатели, стратегические ракеты с жидкостными двигателями (ЖРД), боевые самолеты и вертолеты, транспортные и пассажирские самолеты. Ярким примером являются крупногабаритные твердотопливные ракетные двигатели. Доля композиционных материалов от массы этих конструкций составляет 85...90 % [5]. Применение композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов позволяет уменьшить их массу, увеличить массу полезного груза, скорость и дальность полета.

Аэрокосмическая промышленность широко использует композиционные материалы различного типа, в том числе полимерные, металлические, керамические, углерод-углеродные, гибридные. В 1958 г. фирма «Боинг» использовала стеклопластик для изготовления

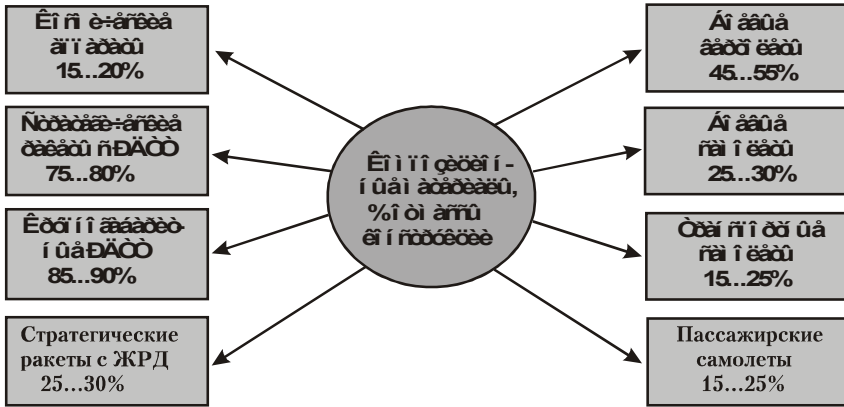


Рис. 10.1. Композиты в ракетной и аэрокосмической технике

самолета типа ДС-8. Материалы этого типа находят применение для изготовления элементов спортивных самолетов. Из стеклопластика была выполнена тепловая защита спускаемого корабля-спутника «Восток».

Одним из наиболее активно используемых в самолетостроении типов композиционных материалов являются углерод-углеродные композиты. На рис. 10.2 [5] отражена структура материального

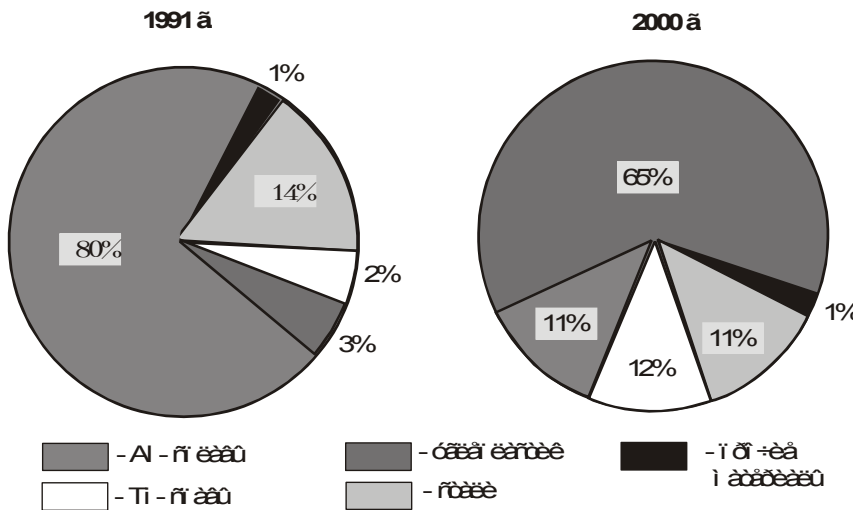


Рис. 10.2. Структура материального баланса планера самолета в 1991 и 2000 г. [5]

баланса планера самолетов. В 1991 г. основными материалами конструкции планера являлись алюминиевые сплавы (80 %). В связи с ужесточением требований за десятилетие объем их применения сократился на порядок (11 % в 2000 г.). При этом доля углепластиков увеличилась с 3 % до 65 % [5].

Конструкция планера американского спортивного самолета «Вояджер», облетевшего в 1987 г. без промежуточных посадок земной шар, была целиком выполнена из углепластика. В табл. 10.1 представлены данные по использованию углепластиков в самолетах серии МИГ [5]. Анализ таблицы показывает, что минимальное снижение массы конструкции за счет использования при ее изготовлении углепластиков составляет 105 кг (МИГ-29). Для самолета типа МИГ-«Х» величина снижения массы в несколько раз больше (750 кг).

Т а б л и ц а 10.1

**Применение углепластиков в самолетах серии МИГ**

Тип самолета	Масса углепластиков, кг	Снижение массы конструкции за счет применения композитов, кг
МИГ-29	90	105
МИГ-29м	137	140
МИГ-31	156	175
МИГ-«Х»	790	750

Технико-экономическая эффективность использования углепластиков в конструкции планера тяжелого транспортного самолета АН-124 отражена в табл. 10.2 [5]. Из углепластиков серии КМУ-3 изготавливается 200 различных деталей общей массой 2,2 т. Экономия алюминиевых сплавов за счет применения углепластиков составляет 6 т, экономия топлива –  $1,2 \cdot 10^4$  т.

Т а б л и ц а 10.2

**Технико-экономическая эффективность применения углепластиков серии КМУ-3 в конструкции планера самолета АН-124**

Объем применения, т	2,2
Количество деталей, шт	200
Снижение массы конструкции, т	0,8
Сокращение количества деталей, %	1200
Снижение общей трудоемкости, %	180
Экономия алюминиевых сплавов, т	6,0
Увеличение объема грузоперевозок, ткм	$1 \cdot 10^6$
Снижение расхода топлива, т	$1,2 \cdot 10^4$

Использование современных композиционных материалов можно проанализировать на примере авиационных двигателей. Детали узлов двигателя работают в очень жестких условиях при воздействии высокой температуры, вибрации, механических напряжений высокого уровня. Детали должны хорошо сопротивляться ползучести, выдерживать частые теплосмены, быть легкими, жаростойкими, жаропрочными.

Ключевым фактором, определяющим коэффициент полезного действия газотурбинного двигателя, является его рабочая температура. С увеличением рабочей температуры технические характеристики двигателя существенно возрастают. Распределение температур в различных зонах авиационного газотурбинного двигателя показано на рис. 10.3 [23]. В камерах сгорания современных двигателей температура достигает  $\sim 1300 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Предполагается, что в будущем она может достигнуть  $\sim 1800 \dots 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура  $\sim 2000 \text{ }^\circ\text{C}$  считается оптимальной для двигателя, поскольку она представляет собой стехиометрический предел для идеального процесса горения всех видов топлива [23]. Ни один металл или используемый сегодня сплав не сможет быть успешно применен для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в зоне камеры сгорания при таких высоких температурах. Есть сомнения, что даже новые материалы смогут эксплуатироваться и выдерживать огромные механические нагрузки при этих температурах.

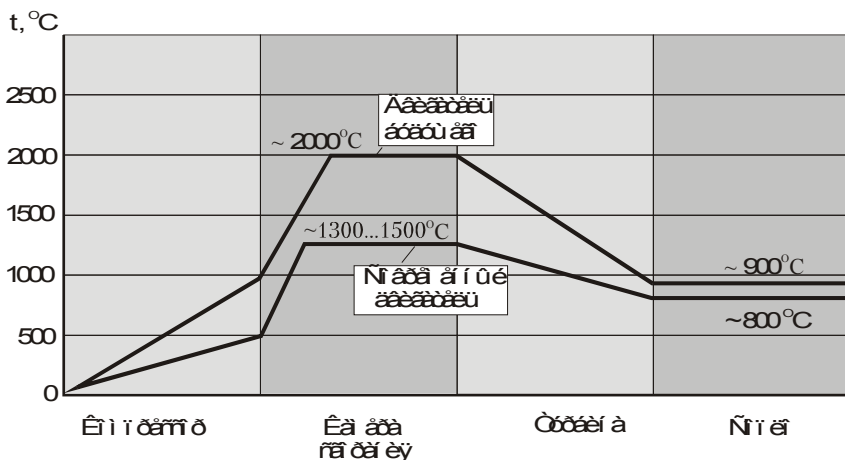


Рис. 10.3. Распределение рабочих температур в газотурбинном авиационном двигателе

Важнейшей деталью газотурбинного авиационного двигателя, работающей при высоких температурах и высоком уровне механических напряжений, является турбинная лопатка. Ранее турбинные лопатки изготавливались методомковки. Следующим шагом явилась разработка технологии производства направленно кристаллизованных лопаток со столбчатой кристаллической структурой. Дальнейшее повышение рабочей температуры и технических характеристик двигателя стало возможным при использовании монокристаллических лопаток с внутренними каналами охлаждения. По сравнению с направленно кристаллизованными лопатками срок службы монокристаллических лопаток в 2...3 раза больше [23].

При проектировании современных двигателей эффективное решение данной проблемы связывают с разработкой и применением композиционных материалов с керамической матрицей (рис. 10.4) [23]. Повышение максимальной рабочей температуры двигателя до 1500 °С позволит увеличить его экономичность, применять дешевые виды топлива. Недостатком материалов с керамической матрицей является низкий уровень надежности. Критический размер дефекта в керамических материалах < 100 мкм, в металлических материалах возможно присутствие подобных дефектов длиной

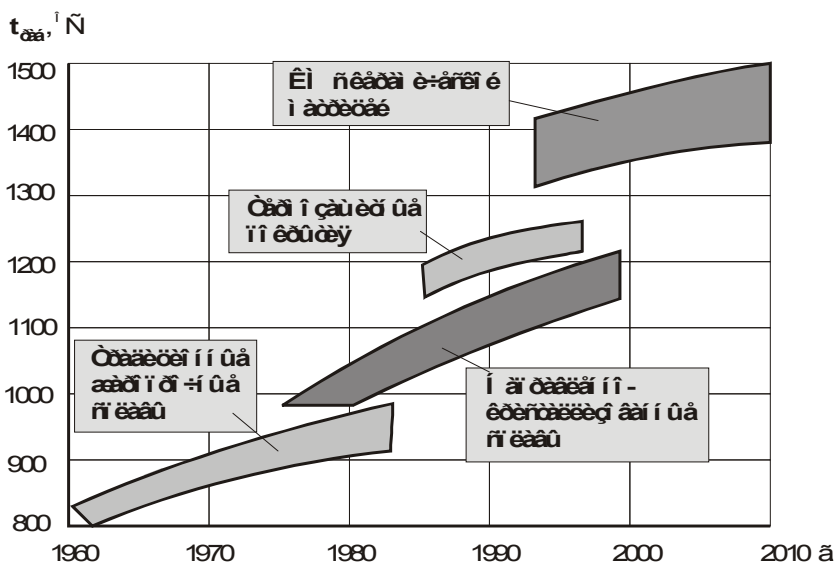


Рис. 10.4. Прогноз применения материалов повышенной жаропрочности в самолетостроении [23]

до миллиметров. Дальнейшее повышение рабочей температуры возможно лишь при разработке новых, более совершенных материалов. Предполагается, что это также будут композиционные материалы.

В течение последних двух десятилетий при изготовлении высокотемпературных трактов авиационных двигателей применение композиционных материалов неуклонно возрастало (рис. 10.5) [23]. Нет сомнений, что в ближайшей перспективе эта тенденция сохранится. При этом относительная доля титана и его сплавов, сталей, жаропрочных сплавов при производстве высокотемпературных трактов авиационных двигателей постепенно снижается.

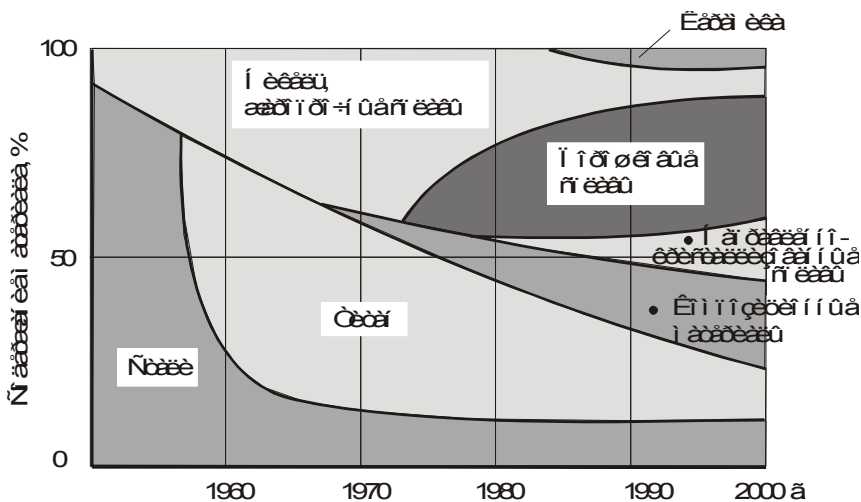


Рис. 10.5. Применение сплавов в высокотемпературных трактах двигателей самолетов во второй половине XX в. [23]

Авиационная и аэрокосмическая промышленность является основным потребителем боропластиков. В наибольшей степени эффективность композитов этого типа проявляется при изготовлении конструкций, работающих в условиях действия сжимающих напряжений и конструкций, к жесткости которых предъявляются высокие требования. Боропластики могут использоваться в сочетании с углепластиковыми. Та часть конструкции, которая испытывает действие сжимающих напряжений, изготавливается из боропластиков, а часть, находящаяся под действием напряжений растягивающего типа, — из углепластиков. При одинаковой несущей способности

масса балок такого типа на 20...30 % ниже, чем масса балок, изготовленных из алюминиевых сплавов [5]. Перспективным считается применение боропластиков при изготовлении стоек шасси, отсеков фюзеляжа самолетов, обшивки крыльев, дисков компрессоров газотурбинных двигателей. Высокая стоимость боропластиков (главным образом борного волокна) сдерживает их распространение в других отраслях промышленного производства.

## 10.2. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТОВ В СУДОСТРОЕНИИ

Судостроение является одной из отраслей промышленного производства, широко использующей композиционные материалы. В первую очередь речь идет о применении стекловолоконных композиционных материалов. Начало промышленного использования стеклопластиков в судостроении относится к сороковым годам 20 века [24]. Факторами, с которыми связано эффективное применение композитов этого типа, являются высокий уровень прочностных свойств и возможность их регулирования, долговечность при эксплуатации в морской воде, отсутствие гниения, коррозии, низкая теплопроводность, простота ремонта, уменьшение до минимума количества швов при изготовлении сложных изделий, возможность многократного воспроизведения формы и др. Конструкции, изготовленные из стеклопластика, имеют хорошие удельные характеристики. Морские конструкции из стеклопластика обычно в 2 раза легче аналогичных конструкций, изготовленных из сталей [7].

При изготовлении крупных конструкций, например корпусов судов, в основном используют методы «мокрой» ручной выкладки или напыления. При необходимости обеспечения более высокого качества изделий используют стеклопластики с высоким содержанием волокна, полученные методом вакуумного формования с эластичной мембраной. Применимы технологии изготовления изделий, основанные на процессах намотки волокна, формования в автоклавах. В качестве матричных материалов обычно используют полиэфирные смолы, твердеющие при комнатной температуре. Могут быть использованы и эпоксидные смолы. Однако по сравнению с полиэфирными смолами эпоксидные дороже, поэтому в конструкциях обычного назначения применяются реже. Жизнеспособность полимерных связующих, используемых в судостроении, обеспечивают в пределах 15 мин...2 ч. Для придания смоле необходимого цвета в нее добавляют пигменты. Огнестойкость компози-



ционных материалов может быть достигнута путем введения специальных добавок, например трехокси сурьмы. Функцию армирующих материалов при изготовлении стеклопластиков могут выполнять все промышленные виды стекловолокон и изделий из них, в том числе рубленое волокно, маты, тканые текстильные изделия, ровинги [24]. Обычно стеклопластики армируют стеклянным волокном марки Е, иногда применяется высокопрочное стекло S [7].

При использовании стеклопластиков в судостроении важным фактором, который следует учитывать, является влияние воды на свойства материалов. Установлено, что вода может быть абсорбирована смолой, действовать как пластификатор и уменьшать показатели прочности и жесткости [24]. Проникая путем диффузии через полимерную матрицу, а также через пустоты и трещины, расположенные вдоль элементов арматуры, вода может приводить к ослаблению прочности связи стеклянных волокон с полимерной матрицей.

В случае использования стекловолоконистых композиционных материалов с полиэфирной матрицей величина снижения прочностных свойств составляет 10...15 %. Снижение прочностных свойств стеклопластиков в морской воде происходит в течение одного-двух месяцев. Дальнейшая выдержка в воде на механических свойствах композитов существенно не отражается. Отрицательное влияние воды отражается, главным образом, на пределах прочности, определяемых в условиях сжатия, изгиба и сдвига [24]. В качестве ускоренного метода оценки влияния воды на свойства композитов может быть использован метод, основанный на двухчасовом нахождении исследуемого материала в кипящей воде. Такая процедура считается эквивалентной месячной выдержке композита в воде при нормальной температуре. Длительная сушка стеклопластиков обычно приводит к восстановлению их прочностных свойств.

Стеклопластики могут быть использованы для изготовления конструкций, работающих в воде на больших глубинах (более 1 км). Проведенные исследования показали, что повышенное давление существенно не сказывается на свойствах стекловолоконистых композиционных материалов [24]. Влияние воды на уровень механических свойств является более значительным.

Снижению механических свойств стеклопластиков способствуют ультрафиолетовое излучение, а также теплая, влажная атмосфера. Для защиты стеклопластиков от этих воздействий рекомендуется использовать гелькоат с пигментом или специальные лако-

красочные покрытия [24]. Считается, что вредное влияние морских организмов на стеклопластики незначительно и поэтому им можно пренебречь. Борьба с организмами, вырастающими на поверхности стеклопластика (на подводной поверхности морских судов), заключается в их механическом соскабливании.

Если в процессе осмотра на поверхности стеклопластика обнаруживаются дефекты (царапины, вмятины, расслоения, потертые участки), то в этих случаях производится ремонт изделий. Эти операции являются несложными и могут быть выполнены с использованием обычных ручных инструментов. В качестве матричного материала при ремонте используется смола, отверждаемая при комнатной температуре. Упрочнителем обычно служат армирующие элементы того же типа, которые входят в состав исходного композиционного материала [24].

Стекловолоконные композиционные материалы широко применяются для изготовления корпусов судов различного типа и размеров. Из этих материалов изготавливают ялики длиной  $\sim 3...4$  м, катера длиной  $\sim 7...15$  м, парусные яхты различных размеров. В Великобритании из стеклопластика построен минный тральщик «Гилтон». Длина этого судна составляет 46,7 м [24]. Оснащение флота судами такого типа является одной из приоритетных задач, решаемых в Великобритании. Основная причина, обуславливающая эффективное применение стеклопластиков для изготовления корпусов минных тральщиков, связана с немагнитностью этих материалов. Суда, предназначенные для использования в военноморских силах, обычно изготавливаются из огнестойких композитов. Из стеклопластиков могут быть изготовлены также относительно крупные суда гражданского назначения. Речь идет, в частности, о рыболовецких траулерах длиной  $\sim 15...30$  м. Такие суда выпускаются в ЮАР, США, Перу, других странах.

Стекловолоконные композиционные материалы используются для изготовления различного рода обтекателей и кожухов, применяемых на морских судах для обеспечения хороших гидродинамических характеристик, снижения турбулентности потоков. В качестве удачных конструкций отмечаются обтекатели, которые были установлены на американских подводных лодках класса «Гаппи» [24].

Имеются примеры эффективного применения стеклопластиков при изготовлении корпусов глубоководных аппаратов. Для изготовления морского глубоководного спасательного судна длиной 15 м, способного опускаться до глубины более 1000 м, были ис-

пользованы материалы в виде стеклоткани и стеклоровинга, предварительно пропитанного эпоксидной смолой. Для получения основных элементов конструкции использовали технологию вакуумного формования с эластичной диафрагмой. Отверждение смолы осуществлялось в автоклаве под давлением 0,7 МПа в течение 10 ч при 163 °С [24]. Использование такой технологии позволило получить материал с пористостью менее 1,5 %. Толщина корпуса из композиционного материала составляла 6,7...12,7 мм.

Стеклопластик может быть применен для изготовления не только корпусов судов различного типа, но также и для изготовления конструкций, используемых на судах. Применение композитов позволяет снизить массу конструкций, решить проблему коррозии. Из стекловолоконистых композиционных материалов изготавливают рубки, резервуары для хранения воды и топлива, мачты. Для одного из судов из стеклопластика была изготовлена мачта длиной 27,1 м. Технология изготовления мачты заключалась в намотке стеклоровинга. Матричным материалом являлась полиэфирная смола [24]. Стеклопластиковые рубки используются на военно-морских судах и судах торгового флота.

При использовании композитов для изготовления резервуаров обычно учитывают, что стеклопластики являются более стойкими к некоторым видам органического топлива, чем к воде. Поэтому материалы этого типа чаще используют для изготовления топливных баков. Особые требования предъявляются к композитам, используемым при изготовлении баков для хранения питьевой воды. Матричный материал должен полностью отвердевать. Он должен быть инертным по отношению к воде, не должен оставлять какого-либо привкуса.

Армированные пластики нашли широкое распространение при изготовлении трубопроводов корабельной вентиляции, морозильных камер, крышек люков, стояков отопительных систем на судах. Из стеклопластиков изготавливают крышки гидролокаторов и обтекатели антенн.

Имеются примеры успешного использования стеклопластиков для изготовления поплавков, применяемых на минных тральщиках. Заполнение поплавка, изготовленного из композиционного материала, пенопластом делает его практически непотопляемым даже в случае сильного механического повреждения [24].

Широкое применение стеклопластиков в судостроении обусловлено в основном их относительной дешевизной. Тем не менее наблюдается тенденция к применению и других композитов с бо-

лее высоким уровнем механических свойств. Речь идет в первую очередь о пластиках, армированных волокнами с более высоким модулем упругости, чем у стекловолокна. В качестве такой арматуры обычно используют борные, арамидные и углеродные волокна. Эти волокна являются более дорогими по сравнению со стеклянными. Высокие первоначальные издержки на изготовление композитов с использованием дорогих волокон компенсируются низкими расходами на эксплуатацию судов, увеличением полезной нагрузки, улучшением других показателей [24].

### **10.3. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОВАРОВ МАССОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ**

Исторически сложилось так, что основным заказчиком большего количества высокотехнологичных композиционных материалов была военная промышленность. Первые образцы многих композиционных материалов появлялись в самолетостроении, ракетостроении, судостроении. Таким образом, военная промышленность явилась инициатором разработки многих композиционных материалов, обладающих наиболее высоким комплексом служебных свойств. Однако постепенно, по мере совершенствования технологии производства композитов, снижения их себестоимости они стали применяться и в других, гражданских отраслях промышленного производства. В настоящее время можно привести большое количество реальных примеров, отражающих эффективность применения композиционных материалов при производстве товаров массового производства.

Широкое распространение композиционные материалы получили в автомобилестроении. Речь идет как о гоночных (единичных) автомобилях, так и об автомобилях массового производства. Основная причина, в соответствии с которой композиты широко используются при создании спортивных автомобилей, заключается в необходимости снижения веса изделия. В массовом производстве автомобилей очень важным фактором является также и возможность снижения их цены за счет использования композиционных материалов. При использовании полимерных композитов экономия в массе автомобиля достигает ~ 40 % при сохранении грузоподъемности [7]. Результатом этого является снижение нагрузки на основные узлы автомобиля, повышение его долговечности.

Первым типом матричного материала, использованного для изготовления композитов в автомобилестроении, была полиэфирная смола [7]. Этот материал является высокотехнологичным и относительно дешевым. В качестве упрочнителя широко используется стекловолокно (стеклоткани, маты, ровница). В настоящее время полимерные композиционные материалы широко используются для изготовления различных элементов кузова автомобилей. Однако этим область применения композитов в автомобилестроении далеко не исчерпывается. Активно ведутся работы по использованию металлических и керамических композиционных материалов для изготовления тяжело нагруженных деталей двигателей автомобилей.

В электротехнических приборах широко применяются автоматические выключатели, размыкающие электрическую цепь при перегрузках или коротких замыканиях. Важным элементом выключателя является контакт. Часто контакты выполняются из серебра или с серебряным покрытием. Для изготовления крупных по размерам контактов применяются композиционные материалы типа серебро–окись кадмия. Содержание окиси кадмия может достигать 10...15 % [7]. Получают такие композиты по методу внутреннего окисления.

Для изготовления прерывателей, рассчитанных на величину тока до 125 А, используют композиционные материалы систем Ag–W, Ag–Mo, Ag–карбид вольфрама, содержащие 25...40 % серебра. Присутствие в материале вольфрама, карбида вольфрама или молибдена позволяет устранить сваривание контактов, снизить степень их разрушения при возникновении электрической дуги [7]. В трансформаторах мощностью до 10 кВА используют контакты, изготовленные из композитов типа Cu–W. Содержание вольфрама составляет 68 %, что обеспечивает высокую эрозионную стойкость контактов. Получают композиты такого типа по методу пропитки вольфрамового каркаса жидкой медью.

Для изготовления скользящих щеточных контактов, используемых в электрических двигателях и генераторах, могут быть применены металлические композиционные материалы. С целью снижения трения в них добавляют определенное количество графита.

Композиционные материалы нашли применение в осветительной технике. Основным материалом, используемым для изготовления нитей накаливания, является тонкая вольфрамовая нить. Для того чтобы снизить количество отказов ламп по причине обрыва нитей, были разработаны непровисающие накальные нити из тори-

рованного вольфрама. Упрочнению вольфрама способствуют мелкодисперсные частицы двуокиси тория  $\text{ThO}_2$  [7]. Материалом катода газоразрядных (неоновых) ламп служит вольфрам с окисью бария или стронция. Для изготовления импульсных ламп применяют спеченные композиционные материалы, в состав которых входят вольфрам, никель, алюминат бария или окись бария.

Высокие показатели удельной прочности композиционных материалов лежат в основе их выбора для изготовления спортивного инвентаря. Речь идет о теннисных ракетках, лыжных палочках, лыжах, клюшках для игры в гольф, спортивных велосипедах, других видах спортивных изделий. Прекрасными характеристиками обладают удочки, изготовленные из современных композиционных материалов (например, из УУКМ).

Композиционные материалы находят широкое применение при изготовлении протезов. Эти изделия должны быть легкими, надежными и долговечными. В настоящее время из углерод-углеродных и других типов композиционных материалов производят протезы рук и ног. Использование композиционных материалов при изготовлении протезов является наиболее перспективным направлением.

Подводя итоги данного раздела, следует отметить, что композиционные материалы находят все более широкое применение в различных отраслях производства. Можно привести сотни других убедительных примеров, свидетельствующих об эффективности практического использования композиционных материалов.

#### **10.4. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Перспективы широкого применения композиционных материалов связывают с разработкой новых видов армирующих и матричных материалов, разработкой и усовершенствованием существующих технологических процессов, значительным снижением стоимости получаемых композитов. Анализ этих трех перечисленных направлений позволяет говорить об очень широком поле деятельности, открывающемся для специалистов, связанных с проблемами разработки, производства и применения композиционных материалов.

В ближайшие годы композиционные материалы сохраняют ведущую роль в двигателестроении, судостроении, самолетострое-

нии, в некоторых областях электротехники. Возможности существенного улучшения свойств за счет использования традиционных подходов, основанных на оптимизации легирования сталей и сплавов, изменения режимов их термического и термопластического упрочнения, близки к исчерпанию. Анализ эффективных решений, осуществленных в материаловедении в течение последних десятилетий, свидетельствует о том, что наиболее существенное повышение уровня свойств материалов конструкционного назначения следует ожидать при разработке композиционных материалов.

Усилия специалистов, связанных с разработкой новых композиционных материалов, направлены на повышение удельной прочности композитов, существенное повышение жаропрочности, снижение веса конструкций, улучшение других характеристик.

В настоящее время не вызывает сомнений то, что создание высокоскоростных пассажирских поездов и автомобилей, самолетов новых поколений, судов без разработки новых композиционных материалов невозможно. Выпуск новой высокоэффективной техники, как правило, сопровождается одновременной разработкой новых материалов, в первую очередь композиционных. Как и прежде, наиболее эффективные материалы будут появляться, вероятно, в высокотехнологичных отраслях промышленного производства (самолетостроении, ракетостроении).

Важным фактором, способствующим использованию композитов при изготовлении товаров массового потребления, является снижение себестоимости их производства. Это возможно лишь при разработке относительно простых, экономичных технологических процессов. Поэтому в ближайшие годы следует ожидать больших изменений и в этой области.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализ перспектив разработки и применения материалов конструкционного назначения позволяет говорить о том, что в ближайшие годы композиты будут, вероятно, являться самым динамично развивающимся классом материалов. Это обусловлено рядом причин, главными из которых являются необходимость разработки новых конструкций, работающих в тяжелых условиях внешнего нагружения и невозможность достижения требуемого уровня свойств при использовании металлических, полимерных или керамических материалов.

В настоящее время невозможно представить разработку новых самолетов, космических аппаратов, подводных лодок, других видов современного оборудования без использования композиционных материалов. Объем применения композиционных материалов в течение последних лет стремительно возрастает. Нет сомнений, что высокие темпы применения композитов в ближайшие десятилетия сохранятся или даже возрастут. Появятся новые композиционные материалы, будут разработаны более совершенные технологические процессы их производства. Авторы учебного пособия надеются, что изложенные в нем материалы окажутся полезными при подготовке специалистов, интересы которых связаны с разработкой, изготовлением и применением композитов конструкционного назначения.



## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

При подготовке данного словаря терминов и определений преимущественно использованы материалы справочника по композиционным материалам [4] и учебника [5].

*Абляция* – эрозия в гидродинамическом потоке; процесс массо- и теплопереноса, обеспечивающий отвод большого количества теплоты из поверхностных слоев материала, которая поглощается, рассеивается и преобразуется окружающим пространством посредством различных физических механизмов.

*Аппретирование* – нанесение на поверхность волокна гидрофобных (водоотталкивающих) покрытий, снижающих водопоглощение ПКМ [1].

*Армирование* – закономерное или хаотичное усиление материала матрицы упрочняющими элементами различной формы.

*Армирующий элемент, наполнитель* – компонент композиционного материала; составная часть композита проволочной, ленточной, нитяной, жгутовой, тканевой структуры.

*Бобина, шпуля* – вид паковки ровинга.

*Бушинг* – подогреваемая электричеством, термоизолированная «лодочка» из металлического (чаще всего платинового) сплава, используемая для плавления и подачи стекломассы при формировании элементарных волокон.

*Волокно (первичное)* – гибкое и прочное протяженное тело с малыми поперечными размерами, не бывшее в контакте с какими-либо другими волокнами или твердыми материалами.

*Волокно одиночное непрерывное* – элементарное волокно большой (бесконечной) длины, сформованное из одного отверстия фильеры.

*Волокно (штапельное)* – волокно, получаемое резкой непрерывного жгута, состоящего из множества нитей, на отрезки определенной длины (обычно – 12...50 мм).

*Вспучивание* – самопроизвольная гофрировка волокон в композиционных материалах.

*Вулканизация* – образование неплавких нерастворимых пространственно-сшитых полимерных материалов в результате «сшивания» макромолекул поперечными связями.

*Выкладка, ручная укладка* – процесс ручной укладки последовательных слоев армирующего материала или пропитанного смолой композита на форме.

*Гель* – дисперсная, желеобразная система, обладающая некоторыми свойствами твердых тел, образуемая из жидких компонентов полимерной матрицы в процессе полимеризации.

*Герметики* – композиции на основе олиго- и полимеров, предназначенные для нанесения на различные механические соединения с целью обеспечения их полной непроницаемости.

*Графитизация* – стадия технологического процесса получения углеродных волокон или углерод-углеродных композиционных материалов, заключающаяся в высокотемпературной обработке (2600...2800 °С) и приводящая к образованию графитной структуры.

*Длина базовая* – длина части образца, на которой во время испытаний производится измерение его характеристик.

*Драпируемость* – способность предварительно импрегнированных текстильных материалов приспосабливаться к неправильной форме; поверхностная конфигурация текстильных материалов.

*Жгут* – совокупность (пучок) крупных или некрупных нитей различной линейной плотности.

*Ингибитор* – вещество, замедляющее химическую реакцию; используется в качестве добавки к мономерам и смолам для увеличения срока их хранения.

*Карбонизация* – стадия технологического процесса получения углеродных волокон и углерод-углеродных композиционных материалов, заключающаяся в нагреве матрицы и волокон в инертной среде при 1000...1500 °С.

*Катализатор* – вещество, изменяющее константы химических реакций без изменения состава; будучи добавленным в малых количествах в реакционную смесь, катализатор значительно увеличивает скорость отверждения компаундов.

*Когезия* – 1) склонность бинарных элементов субстанции к сцеплению в объеме данной субстанции; 2) притяжение друг к другу одномерных молекулярных частиц; 3) способность противостоять отделению однородных частиц от массы; 4) «внутренняя адгезия»; 5) сила, удерживающая однородные частицы вместе.

*Компаунд для литья* – широкий диапазон видов пластмасс, соответствующих специфическим требованиям процесса; употребляется в виде пресс-порошков, гранул или таблеток.

*Компаунд для формования, армированный* – компаунд, поставляемый изготовителем сырья в виде готового к употреблению материала.

*Компактность жгута* – степень, до которой отдельные составляющие жгута или ровинга удерживаются вместе наносимой шпихтой.

*Крутка* – придается нитям и пряже для повышения их компактности путем вращения вокруг фиксированной точки в процессе намотки; степень крутки оценивается количеством витков вокруг своей оси на единицу длины нити; символы «S» и «Z» соответствуют правому или левому направлению крутки.

*Мат* – волокнистый нетканый материал, состоящий из произвольно ориентированных волокон или спутанных нитей и пропитанный соответствующим связующим.

*Матрица* – составная часть композита, обеспечивающая его монолитность и совместную работу моноволокон наполнителя.

*Материал нетканый* – плоская структура текстильного материала, получаемая в результате провязывания, прошивки или склейки холста или прочеса.

*Мономер* – простая молекула, способная вступать в реакцию с аналогичными или отличающимися по строению молекулами с образованием полимера; наименьшая повторяющаяся структурная единица полимерной цепи.

*Монофиламент* – одиночное волокно или одиночная нить определенной длины; непрерывное волокно достаточной длины для применения в обычной текстильной переработке.

*Моток* – свободно намотанная непрерывная нить, пряжа, ровинг и т.д. определенной длины.

*Намотка волокном* – процесс создания композитной структуры, при котором непрерывный армирующий компонент (волокно, ровинг, проволока, пряжа, лента и др.) либо заранее импрегнируется материалом матрицы, либо обрабатывается связующим во время намотки, непрерывно подается на вращающуюся форму или оправку под постоянным натяжением под определенным углом; создание структуры осуществляется послойно.

*Намотка «мокрая»* – процесс намотки, при котором нить пропитывается смолой непосредственно перед контактом с каркасом.

*Намотка «сухая»* – намотка с применением предварительно импрегнированных нити или ровинга.

*Наполнитель* – относительно инертный материал, добавляемый к полимерной композиции с целью снижения стоимости изделий, модификации механических свойств, придания композиту необходимой окраски.

*Натяжение намотки* – степень натяжения армирующего материала при его контакте с оправкой.

*Нить комплексная* – множество тонких непрерывных волокон (от 5 до 1000 элементарных волокон, соединенных с некоторой степенью крутки).

*Нить (одиночная)* – элементарные волокна, собранные в единый пучок.

*Нить трощеная* – нить, образуемая скручиванием двух или более одиночных нитей в одной операции.

*Обертка слоевая* – метод формирования композиционного материала, при котором слои композита подаются на оправку, намазываются и уплотняются на ней.

*Основа* – нить, идущая по длине ткани.

*Паковка* – вид намотки ровинга или нити.

*Пиролиз* – высокотемпературное превращение органических соединений, сопровождающееся их деструкцией и вторичными процессами.

*Пластик стекловолоконистый* – общий термин, относящийся к любому типу композитов, армированных волокнами, нитями, матами, тканями или любыми другими видами текстильных материалов на основе стекловолокна.

*Переплетение ткацкое* – способ переплетения нитей при формировании тканей.

*Плотность ткани* – количество нитей на единицу ширины или длины.

*Полимер* – химическое соединение природного или синтетического происхождения с большой молекулярной массой, химическая структура которого может быть представлена повторением мелких единиц, звеньев, «долей».

*Премикс* – термореактивная формовочная композиция, армированная волокном, которая не нуждается в дальнейшем отверждении, сушке или других технологических операциях и готова для переработки на литьевом прессе.

*Препрег* – полуфабрикат, представляющий собой волокнистый наполнитель (нити, жгуты, ленты, ткани), пропитанный в определенном соотношении связующим.

*Пропитка* – обработка волокнистых или других пористых наполнителей смолой в процессе получения композитов, обеспечивающая совмещение наполнителя со связующим.

*Пряжа* – собранные совместным кручением волокна или нити, пригодные для использования в ткачестве и при каком-либо другом способе переработки в текстильный материал.

*Пултрузия* – технология производства стержней, труб и фасонных изделий с постоянным поперечным сечением.

*Разбавитель* – нелетучая жидкость, способствующая получению требуемой технологической вязкости связующего и остающаяся в нем после отверждения [1].

*Растворитель* – летучая жидкость, растворяющая смолу и другие компоненты связующего и удаляемая перед формированием [1].

*Расшихтовка* – процесс удаления шлихты (чаще всего крахмала) перед нанесением на волокна специальной аппретуры, отбеливателей или красителей.

*Ровинг* – жгут, образованный пучками непрерывных нитей в виде некрученых жгутов или крученых нитей. При намотке используется в виде лент с минимальной круткой.

*Ровинг тканый* – тяжелая ткань из стекловолокна, полученного при ткачестве ровинга.

*Ровница* – однонаправленная полоса арматуры [1].

*Связующее* – смола, раствор, газ, порошок, расплав, образующие матрицу в процессе изготовления композита.

*Снование* – операция перемотки одной или нескольких параллельных нитей, жгутов, лент или тканей на одну паковку с параллельной укладкой строго встык [1].

*Стренги (пучки)* – первичные пучки непрерывных нитей (или лент), собранных в единый компактный жгут без крутки.

*Стекло* – аморфный изотропный материал, получаемый переохлаждением расплавов неорганических соединений.

*D-стекло* – стекло с высоким содержанием бора; стекло с точно контролируемыми диэлектрическими характеристиками.

*E-стекло* – боросиликатное стекло; «электростекло»; пригодно для изготовления электроизоляционных материалов.

*M-стекло* – стекло с высоким содержанием бериллия; стекло с высоким модулем упругости.

*S-стекло* – получено в результате сплавления магнезии, глинозема и силиката; высокопрочное стекло.

*Текс* – внесистемная единица линейной плотности волокон или нитей, представляющая отношение их массы  $m$  к длине  $L$ ; 1 текс = 1 г/км = 1 мг/м.

*Уток* – поперечные нити или волокна в ткани; нити, расположенные перпендикулярно к основе.

*Усы* – нитевидные искусственные монокристаллы, выращенные в специальных условиях и имеющие механическую прочность, близкую к теоретической.

*Фильера* – тип экструзионного приспособления. Обычно представляет собой пластину со множеством мелких отверстий (до

7 мкм), через которые продавливаются расплав или раствор для получения волокон.

*Формование* – процесс получения волокон путем продавливания расплава или раствора через фильеры; процесс получения полимерных композиционных изделий.

*Шпулярник* – приспособление для установки необходимого количества паковок (бобин, шпуль) с волокнистым материалом; часть технологического оборудования для осуществления процессов намотки, пултрузии, автоматизированной выкладки.

*Шлихта* – аппрет; состав для обработки волокнистых материалов, включающий крахмал, желатин, масло, воск или другой ингредиент, наносимый для защиты их поверхности и облегчения последующей переработки в готовые изделия; обеспечивает смазку поверхности и сцепление волокон, но в отличие от замасливателей содержит подклеивающие компоненты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р.* Новые композиционные материалы. – Киев: Вища школа, 1977. – 312 с.
2. *Портной К.И., Заболоцкий А.А., Салибеков С.Е., Чубаров В.М.* Классификация композиционных материалов // Порошковая металлургия. – 1977. – N 12. – С. 70-75.
3. Композиционные материалы: Справочник /Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
4. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. – Кн. 1 /Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
5. *Буланов И.М., Воробей В.В.* Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
6. Композиционные материалы: Справочник /Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
7. Композиционные материалы: В 8 т. /Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978.- Т.3: Применение композиционных материалов в технике/Под ред. Б. Ногона. – М.: Мир, 1978. – 511 с.
8. Волокнистые и дисперсноупрочненные композиционные материалы /Под ред. Н.В. Агеева и др. – М.: Наука, 1976. – 215 с.
9. *Капустин А.И., Нурждин Г.А.* Получение и свойства сверхтвердых композитов. – М.: Машиностроение, 1999. – 94 с.
10. *Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф.* Материаловедение. – М.: МИСИС. – 1999. – 600 с.
11. Армированные пластики/ В.А. Бунаков, Г.С. Головкин, Г.П. Машинская и др.; Под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. – М.: Изд-во МАИ, 1997.– 404 с.
12. *Димитриенко Ю.И.* Механика композиционных материалов при высоких температурах. – М.: Машиностроение, 1997. – 368 с.
13. *Шаяхметов У.Ш.* Композиционные материалы на основе нитрида кремния и фосфатных связующих. – М.: «СП Ингермет Инжиниринг», 1999.– 128 с.
14. Композиционные материалы: В 8 т. /Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 2: Механика композиционных материалов /Под ред. Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978. – 566 с.
15. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей/ М.Х. Шоршоров, А.И. Колпашиников, В.И. Костиков и др.; Под ред. М.Х. Шоршорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.



16. Композиционные материалы: В 8 т. /Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.5: Разрушение и усталость/ Под ред. Л. Браутмана. – М.: Мир, 1978. – 486 с.
17. Химия синтеза сжиганием /А. Микино, О. Одавара, Е. Миямото и др.; Под ред. М. Коидзуми. – М.: Мир, 1998. – 247 с.
18. *Холлистер Г.С., Томас К.* Материалы, упрочненные волокнами. – М.: Металлургия, 1969. – 152 с.
19. *Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А.* Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
20. Технология и оборудование для обработки тугоплавких, порошковых и композиционных материалов. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
21. Композиционные материалы: В 8 т. /Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.1: Поверхности раздела в металлических композитах /Под ред. А. Меткалфа. – М.: Мир, 1978. – 438 с.
22. Волокнистые композиционные материалы /Под ред. С.З. Бокштейна. – М.: Мир, 1967. – 284 с.
23. Строение и свойства авиационных материалов /А.Ф. Белов, Г.П. Бенедиктова, А.С. Висков и др.; Под ред. А.Ф. Белова. – М.: Металлургия, 1989. – 368 с.
24. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. Кн. 2 /Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с.
25. *Прилуцкий Э.В., Гриднева И.В., Мильман Ю.В. и др.* О механических свойствах волокон карбида кремния. // ФИХОМ. – 1979. – N 5. – С. 125-128.
26. *Фистуль В.И.* Новые материалы. Состояние, проблемы, перспективы. – М.: МИСИС, 1995. – 142 с.
27. Тонкая техническая керамика /Под ред. Х. Янагида – М.: Металлургия, 1986. – 279 с.
28. *Марченков В.И.* Ювелирное дело. – М.: Высшая школа, 1992. – 256 с.
29. *Кипарисов С.С., Либенсон Г.А.* Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.
30. *Саттон У., Чорнс Дж.* Перспективы металлов, армированных волокнами оксидов // Волокнистые композиционные материалы /Под ред. С.З. Бокштейна. – М.: Мир, 1967. – С. 207-260.
31. Технология проектирования углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вогинов, А.А. Ташкинов и др. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.
32. *Тучинский Л.И.* Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
33. *Семенов Б.И., Романова В.С.* Алюмопенокомпозиты – перспективный класс новых материалов для машино- и приборостроения. // Материаловедение. – 1998. – №9. – С. 47-52.
34. *Жолудев Д.А., Романова В.С., Семенов Б.И.* Литые алюмопенокомпозиты – уникальный класс новых материалов для широкого применения // Технология металлов. – 1999. – №11. – С. 2-6.

35. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 176 с.
36. Довгяло В.А., Юркевич О.Р. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 256 с.
37. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах. – Киев: Наукова думка, 1972. – 196 с.
38. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир. – 1964. – 351 с.
39. Иванова В.С., Копьев И.М., Елкин Ф.М. Алюминиевые и магниевые сплавы, армированные волокнами. – М.: Наука, 1971. – 202 с.
40. Портной К.И., Бабич Б.Н., Светлов И.Л. Композиционные материалы на никелевой основе. – М.: Metallurgy, 1979. – 264 с.
41. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Metallurgy, 1977. – 648 с.
42. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
43. Дмитриев Л.Н., Кузнецов Е.В. и др. Биметаллы. – Пермь, 1991.
44. Атрощенко Э.С., Розен А.Е., Голованова Н.В. Разработка научных основ формирования структуры и свойств композиционных материалов // Материаловедение. – 1998. – №6. – С. 26-30.
45. Крутин А.В., Соловьев В.Я., Попов Г.С., Крестев М.Р. Обработка металлов взрывом. – М.: Metallurgy, 1991. – 496 с.
46. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Metallurgy. – 1986. – 312 с.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АПКМ – алюмопенокомпозиционный материал  
ГКМ – гибридный композиционный материал  
КМ – композиционный материал  
ККМ – керамический композиционный материал  
МКМ – металлический композиционный материал  
ПАН – полиакрилонитрильное волокно  
ПАС – пространственная армирующая структура  
ПКМ – полимерный композиционный материал  
СВ – стеклянное волокно  
СОЖ – смазывающе-охлаждающая жидкость  
ТКМ – термопластичный композиционный материал  
ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения  
УВ – углеродное волокно  
УУКМ – углерод-углеродный композиционный материал  
ЭФЭ – эластичный формирующий элемент  
 $\rho$  – плотность материала  
 $\sigma_B$  – предел прочности  
 $\sigma_1^+$  – предел прочности при растяжении  
 $E$  – модуль нормальной упругости (модуль Юнга)  
 $E_1^+$  – модуль упругости при растяжении  
 $G$  – модуль сдвига (модуль Гука)  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. КОМПОЗИТЫ КАК МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b> .....	9
1.1. Определение композиционных материалов .....	9
1.2. Классификация композиционных материалов .....	12
<b>2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕХАНИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	23
2.1. Модули упругости композиционных материалов .....	23
2.1.1. Модуль нормальной упругости однонаправленного композиционного материала в направлении оси армирования .....	25
2.1.2. Модуль нормальной упругости однонаправленного композиционного материала в направлении, перпендикулярном оси армирования .....	27
2.2. Прочность композиционных материалов при растяжении.....	29
2.2.1. Предел прочности однонаправленно армированных композиционных материалов .....	29
2.2.2. Влияние ориентации волокон на прочностные свойства композитов .....	31
2.2.3. Прочностные свойства композитов, армированных дискретными волокнами .....	33
2.2.4. Влияние объемной доли волокон на прочностные свойства композиционных материалов .....	35
2.3. Прочность композиционных материалов при сжатии.....	39
2.4. Особенности разрушения композиционных материалов .....	41

<b>3. КОМПОНЕНТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>50</b>
3.1. Матричные материалы.....	50
3.1.1. Металлические матрицы.....	50
3.1.2. Полимерные матрицы.....	53
3.1.3. Керамические матрицы.....	58
3.2. Армирующие элементы.....	66
3.2.1. Металлические волокна.....	68
3.2.2. Стеклянные, кварцевые волокна.....	77
3.2.3. Углеродные волокна.....	89
3.2.4. Борные волокна.....	98
3.2.5. Органические волокна.....	104
3.2.6. Керамические волокна.....	109
3.2.7. Нитевидные кристаллы (усы).....	112
3.3. Получение заготовок для полимерных композиционных материалов в виде препрегов.....	120
3.3.1. Получение препрегов методом пропитки арматуры в смолах.....	120
3.3.2. Получение препрегов с использованием порошковых дисперсных полимеров.....	123
3.4. Объединение упрочняющих элементов.....	128
<b>4. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>137</b>
4.1. Твердофазные способы производства металлических композиционных материалов.....	138
4.1.1. Получение металлических композиционных материалов методом прокатки.....	138
4.1.2. Получение металлических композиционных материалов методами прессования.....	142
4.1.3. Получение металлических композиционных материалов методом диффузионной сварки.....	147
4.1.4. Получение металлических композиционных материалов методом сварки взрывом.....	150
4.1.5. Сборка заготовок, используемых для получения металлических композитов обработкой давлением.....	157

4.2. Жидкофазные способы производства металлических композиционных материалов.....	161
4.2.1. Получение металлических композиционных материалов методом пропитки армирующих каркасов .....	161
4.2.1.1. Смачивание поверхности и пропитка пористых тел .....	162
4.2.1.2. Технологические процессы получения композиционных материалов, основанные на пропитке армирующих каркасов расплавленным металлом .....	165
4.2.1.2.1. Самопроизвольная пропитка.....	165
4.2.1.2.2. Непрерывная пропитка .....	168
4.2.1.2.3. Вакуумная пропитка .....	173
4.2.1.2.4. Пропитка под давлением .....	180
4.2.1.2.5. Вакуумно-компрессионная пропитка .....	182
4.2.1.2.6. Центробежная пропитка .....	184
4.2.1.2.7. Ультразвуковая пропитка .....	185
4.2.1.2.8. Особенности применения методов пропитки для получения некоторых типов металлических композиционных материалов .....	186
4.2.2. Металлические композиционные материалы, полученные методом направленной кристаллизации эвтектик.....	190
4.2.3. Алюмопенокомпозиаты .....	194
4.3. Газофазные методы изготовления деталей металлических композитивов .....	197
4.3.1. Газотермические методы напыления матричного материала .....	198
4.3.2. Осаждение матричного материала из газовой фазы .....	203
4.4. Получение металлических композиционных материалов методом электролитического осаждения .....	203
4.5. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы.....	204
4.5.1. Получение дисперсно-упрочненных композиционных материалов .....	204
4.5.2. Примеры дисперсно-упрочненных композиционных материалов .....	208
4.6. Взаимодействие упрочняющих волокон с матрицей в металлических композиционных материалах .....	210
4.7. Примеры производства металлических композиционных материалов .....	219

<b>5. ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ .....</b>	<b>225</b>
5.1. Контактное формование полимеров.....	227
5.1.1. Ручная выкладка.....	227
5.1.2. Автоматизированная выкладка.....	231
5.1.3. Напыление.....	232
5.2. Получение изделий из полимерных композиционных материалов по технологии формования с эластичной диафрагмой.....	239
5.2.1. Метод вакуумного формования .....	239
5.2.2. Вакуумно-автоклавное формование.....	242
5.2.3. Пресс-камерное (пневматическое) прессование .....	244
5.3. Получение изделий из полимерных композитов с использованием технологии формообразования давлением .....	245
5.3.1. Пропитка под давлением.....	245
5.3.2. Пропитка в вакууме.....	246
5.4. Прессование полимерных композитов в формах .....	247
5.4.1. Прямое прессование изделий из полимерных композитов .....	248
5.4.2. Литьевое прессование изделий из полимерных композитов .....	251
5.4.3. Термокомпрессионное прессование .....	253
5.5. Получение изделий из полимерных композитов по технологии формообразования намоткой .....	255
5.5.1. Пропитка армирующего материала связующим .....	258
5.5.2. Контактное давление формования при намотке арматуры .....	262
5.5.3. Отверждение полимерных композитов .....	265
5.5.4. Технологические схемы намотки арматуры на оправки .....	266
5.5.4.1. Прямая (окружная) намотка .....	268
5.5.4.2. Спирально-винтовая (кольцевая, тангенциальная) намотка..	269
5.5.4.3. Спирально-перекрестная намотка .....	270
5.5.4.4. Совмещенная спирально-кольцевая намотка .....	271
5.5.4.5. Продольно-поперечная намотка.....	272
5.5.4.6. Косослойная продольно-поперечная намотка.....	272
5.5.4.7. Плоскостная намотка (полосная, орбитальная, плоскостная намотка) арматуры при производстве полимерных композитов.....	273
5.5.4.8. Тетраноматика арматуры.....	275
5.5.4.9. Зональная намотка.....	277
5.5.5. Станки для намотки армирующего материала.....	277

5.5.6. Оправки для намотки арматуры .....	283
5.6. Формообразование изделий из полимерных композиционных материалов методом пултрузии .....	285
5.7. Предварительное формование заготовок, предназначенных для изготовления полимерных композиционных материалов .....	288
5.7.1. Метод откачки воздуха из сетчатой матрицы .....	288
5.7.2. Метод откачки жидкости из перфорированной формы .....	289
5.7.3. Метод распыления волокон и связующего .....	290
5.7.4. Метод центробежной фильтрации .....	292
5.7.5. Метод отлива пульпы и вакуумного обезвоживания .....	292
5.7.6. Изготовление полимерных композиционных материалов из матов и предварительно полученных заготовок .....	293
<b>6. УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ, КЕРМИЧЕСКИЕ И ГИБРИДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>295</b>
6.1. Углерод-углеродные композиционные материалы .....	295
6.2. Керамические композиционные материалы .....	314
6.3. Гибридные композиционные материалы .....	316
<b>7. ОБРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>319</b>
<b>8. КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>328</b>
8.1. Классификация соединений деталей из композиционных материалов .....	330
8.2. Клеевые соединения .....	330
8.3. Формовочные соединения .....	332
8.4. Сварные соединения .....	332
8.5. Резьбовые соединения .....	333
8.6. Клепаные соединения .....	336
8.7. Самозаклинивающиеся соединения .....	337
8.8. Сшивные и игольчатые соединения .....	339
8.9. Комбинированные соединения .....	339
<b>9. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>340</b>
9.1. Испытания композиционных материалов на растяжение .....	340
9.2. Испытания композиционных материалов на сжатие .....	344
9.3. Испытания композитов на сдвиг .....	345
9.4. Испытания на сжатие и растяжение образцов кольцевого типа .....	349



<b>10. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	352
10.1. Применение композитов в авиа- и ракетостроении .....	352
10.2. Применение композитов в судостроении .....	358
10.3. Применение композиционных материалов при изготовлении товаров массового потребления.....	362
10.4. Перспективы применения композиционных материалов.....	364
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	365
<b>ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ</b> .....	368
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	373
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	376

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Анатолий Андреевич Батаев,  
Владимир Андреевич Батаев**

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**Строение, получение, применение**

**Учебник**

Редактор *Н. В. Городник*  
Технический редактор *Г. Е. Телятникова*  
Художник-дизайн *А. В. Волошина*  
Компьютерная верстка *В. Ф. Нозрева*

Лицензия ИД № 04303 от 20.03.01.  
Подписано в печать 02.10.02.  
Формат 60×90 1/16. Бумага офсетная.  
Уч.-изд. л. 23,0. Печ. л. 24,0.  
Тираж 2000 экз. Заказ №

Издательство Новосибирского государственного  
технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.  
Тел. (383-2) 46-31-87  
e-mail: root@publish.nstu.ru

Отпечатано в ГУП РПО СО РАСХН, ротап rint  
630500, Новосибирская обл., пос. Краснообск