

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Ульяновский государственный технический университет

**Конструкционные и защитно-отделочные  
материалы в автомобилестроении.  
Композиционные материалы**

Лабораторный практикум

Составитель: Ю. А. Кузьмин

Ульяновск  
2008

УДК 629.114.2 (076)  
ББК 39.33 + 39.34я7  
К 89

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

Рецензент д-р техн. наук, профессор кафедры «Автомобили», УлГТУ  
А. Ш. Хусаинов.

**Кузьмин, Ю. А.**

К 89      Конструкционные и защитно-отделочные материалы в автомобилестроении. Композиционные материалы: лабораторный практикум / сост. Ю. А. Кузьмин. - Ульяновск: УлГТУ, 2008. - 41 с.

Лабораторный практикум по дисциплине «Конструкционные и защитно-отделочные материалы в автомобилестроении» раздел «Композиционные материалы» разработан в соответствии с требованиями общеобразовательного стандарта, учебного плана и рабочей программы курса.

Издание содержит основные сведения о структуре и свойствах композиционных материалов. Рассмотрены полиматричные и полиармированные, гибридные и другие композиционные материалы, их механические свойства и конструктивные особенности. Подробно изложены дисперсионно-упрочненные и волокнистые материалы, их структура и свойства.

Предназначено для студентов специальности 19020165 «Автомобиле- и тракторостроение».

**УДК 629.114.2 (076)**  
**ББК 39.33 + 39.34я7**

© Ю. А. Кузьмин, составление, 2008  
© Оформление. УлГТУ, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие сведения .....	4
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ. . . . .	5
1. Армирование композиционных материалов. Лабораторная работа № 1. . . . .	6
1.1. Структура и состав композиционных материалов .....	6
1.2. Гибридные композиционные материалы .....	9
2. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы. Лабораторная работа №2 .....	11
3. Волокнистые конструкционные материалы. Лабораторная работа № 3..	16
4. Упрочнители конструкционных материалов. Лабораторная работа № 4	22
5. Композиционные материалы на металлической основе. Лабораторная работа №5 .....	28
5.1. Общие сведения .....	28
5.2. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей.. . . . .	28
5.3. Композиционные материалы на магниевой основе .....	30
5.4. Композиционные материалы с титановой матрицей .....	31
5.5. Композиционные материалы с никелевой матрицей .....	32
6. Композиционные материалы на неметаллической основе. Лабораторная работа № 6 .....	33
6.1. Углерод-углеродные композиционные материалы .....	39

Учебное издание

**КУЗЬМИН** Юрий Александрович

**Конструкционные и защитно-отделочные материалы  
в автомобилестроении.  
Композиционные материалы: лабораторный практикум**

Редактор О. С. Бычкова

Подписано в печать 29.12.2008. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,38

Тираж 100 экз. Заказ

Ульяновский государственный технический университет

432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В общинженерной подготовке квалифицированных кадров по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» важную роль играет курс «Конструкционные и защитно-отделочные материалы в автомобилестроении». Он является переходным от общеобразовательного цикла дисциплин к специальному: студенты могут использовать знания, полученные при изучении общинженерных дисциплин, для решения важных практических задач по выбору, расчету и применению конструкционных и защитно-отделочных материалов в автомобилестроении.

Особенностью курса «Конструкционные и защитно-отделочные материалы в автомобилестроении» состоит в его комплексном характере: материалы изучаются с самых разных сторон - технологии производства, физико-химических свойств и механической прочности материалов.

Среди различных конструкционных материалов важное место занимают композитные материалы (КМ), которые могут иметь высокие механические свойства. Например, КМ с матрицей из механической АД1, упрочненный волокнами бора, в направлении волокон имеет предел прочности  $\sigma_b = 1000 \dots 1200$  МПа, а стекловолокно характеризуется сочетанием высоких прочностей ( $\sigma_b = 3000 \dots 5000$  МПа), теплостойкости, диэлектрических свойств, низкой теплопроводности и высокой коррозионной стойкости.

Некоторые упрочнители КМ сохраняют свои свойства при высокой температуре. Например, окисленное углеродное волокно в восстановительной и нейтральной среде сохраняет свои механические свойства до 2200 °С.

КМ применяют во многих отраслях промышленности. Благодаря высоким удельным характеристикам прочности и жесткости, их используют в автомобилестроении (кузова автомобилей и рефрижераторов, цистерны, бамперы, подшипники скольжения, корпуса и детали машин и двигателей). Кроме того, КМ используют при изготовлении лопастей винтов и контейнеров вертолетов, корпусов и камер сгорания реактивных двигателей и т. п. Использование КМ в конструкциях летательных аппаратов уменьшило их массу на 30—40 %, увеличило полезную нагрузку без снижения скорости и дальности полета.

В настоящее время КМ применяют в энергетическом машиностроении (рабочие и сопловые лопатки турбины), химической промышленности (емкости и т. д.), судостроении (корпуса лодок, катеров, гребные винты) и др.

Особые свойства ряда КМ позволяют использовать их в качестве электроизоляционных материалов, радиопрозрачных обтекателей и других деталей.

Поэтому КМ было уделено большое внимание.

Данный практикум составлен на основании опыта работы центральных вузов.

Второй способ получения углеро-углеродного КМ состоит в осаждении углерода из газовой среды, образующейся при термическом разложении углеродов (например, метана), на волокнах каркаса заготовки (изделия) и заполнения пор между ними. Углерод образует соединительные мостики между волокнами. Метод осаждения из газовой среды более дорог, но обеспечивает более прочное сцепление волокон с матрицей, более высокое содержание углерода в матрице и большую плотность КМ. Кроме того, он дает возможность создания гибридных КМ с различной структурой благодаря многослойному осаждению углерода и других материалов (например, Zn, Ta, Si), а также многонаправленному пространственному армированию (рис. 3.2). Этот метод позволяет получить КМ с различными свойствами, в том числе и с заданными.

Существуют также технологии, сочетающие эти два способа.

### Вопросы

1. Напишите достоинства и недостатки КМ с неметаллической матрицей.
2. Какими свойствами и структурой обладают углеволокниты, борволокниты?
3. Каким образом достигают увеличения прочности связи между борным волокном и матрицей?
4. Для чего вводят в матрицу ионы металлов?
5. Опишите достоинства и недостатки эпоксидных матриц.
6. Каковы свойства стекловолокнитов?
7. Укажите достоинства и недостатки углеволокнитов.
8. Какими свойствами обладают органоволокниты?
9. Перечислите достоинства и недостатки органоволокнитов.
10. Отметьте достоинства и недостатки керамических КМ.
11. Изложите технологию изготовления керамических КМ.
12. Что такое «керметы»?

### Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.

(от проводников до полупроводников); высокие прочность и жесткость. Уникальной особенностью углерод-углеродных КМ является увеличение прочности в 1,5-2,0 раза и модуля упругости при повышении температуры. К их недостаткам относят склонность к окислению при нагреве до температур выше 500 °С в окислительной среде. В инертной среде и вакууме изделия из углерод-углеродных КМ работают до 3000 °С.

Исходным материалом для матриц служат синтетические органические смолы с высоким коксовым остатком (феноло-формальдегидные, фурановые, эпоксидные и др.). Термоактивные смолы обладают хорошей пропитывающей способностью. Большинство из них отверждается при относительно низких температурах (до 200-250 °С) и содержат 50-56 % кокса. При перомезе они образуют стекловидный углерод, который не подвержен графитизации до 3000 °С.

Кроме того, в качестве матриц используют каменноугольные и нефтяные пропитывающие пекивязкие остатки перегонки дегтей, смол, образующихся при термической обработке твердых топлив (угля, торфа и др.) или при пиролизе нефти. Они представляют собой сложную смесь полуциклических ароматических углеводородов, характеризующихся невысокой стоимостью, доступностью, низкой температурой размягчения (80-100 °С), небольшой вязкостью и высоким содержанием кокса (62-95 % объема). К недостаткам пеков относится неоднородный химический состав, способствующий образованию пористости; термопластичность, вызывающая миграцию связующих и деформацию изделия; наличие концеровенных соединений, требующих дополнительных мер безопасности.

Наполнителями углерод-углеродных КМ служат углеграфитовые волокна, жгуты, нити, тканые материалы. Структура и свойства КМ в большей степени зависят от способа их получения. Наибольшее распространение получили следующие два способа.

Первый способ состоит из протяжки графитовых волокон смолой или пеками, намотки заготовки, ее отверждения и механической обработки на заданный размер, карбонизация (800-1500 °С) в неокислительной или нейтральной среде, упрочнение пиролитическим углеродом, графитизации при 2500-3000 °С и нанесении противоокислительных покрытий из карбидов кремния и циркония. Для получения материала высокой плотности цикл «пропитка-отверждение-карбонизация» многократно повторяют. Весь процесс повторяется около 75 часов. В зависимости от режимов проведения, плотность КМ, полученного этим методом, 1,3-2,0 т/м<sup>3</sup>. Свойства полученного при этом углерод-углеродного КМ зависят от многих факторов: вида исходного волокна и связующего, условий пропитки, степени напряжения матрицы, свойства кокса и прочности связи с волокном, режимов отверждения, карбонизации, графитизации, многократности цикла «пропитка-отверждение-карбонизация». Так, при пропитке феноло-формальдегидной смолой плотность КМ не превышает 1,65 т/м<sup>3</sup>, при пропитке фурановыми смолами она достигает до 1,85 т/м<sup>3</sup>, а при использовании пеков - составляет 2,1 т/м<sup>3</sup>. Нагрев карбонизированного материала до 2500-3000 °С вызывает его графитизацию.

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед началом выполнения работ студенты обязаны пройти инструктаж по правилам безопасной работы в лаборатории и расписаться в журнале по технике безопасности.

Оборудования, стенды и учебные наглядные пособия, не имеющие отношения к учебному процессу, руками трогать воспрещается.

Запрещается категорически включать и выключать действующее оборудование находящееся в помещении лаборатории.

Студенты обязаны соблюдать требования охраны труда для обеспечения защиты от воздействия опасных и вредных производственных факторов, связанных с характером работы:

травмирование попаданием предмета при неаккуратном его складировании;

- повышенная запыленность воздуха рабочей зоны;

- травмы при небрежном обращении с инвентарем, лабораторным оборудованием;

- травмирование рук при небрежном обращении с образцами;

- мокрый скользкий пол.

Студенты обязаны:

- выполнять только ту работу, по которой получен инструктаж и пройдена проверка знаний требований охраны труда;

- соблюдать режим труда и отдыха, правила внутреннего трудового распорядка, установленного в университете;

- выполнять правила личной гигиены (после окончания работы тщательно вымыть руки с мылом);

- знать место хранения медицинской аптечки и инструкции по применению содержимого аптечки первой помощи;

- уметь оказать первую доврачебную помощь при производственных травмах;

- соблюдать правила пожарной безопасности, знать место расположения первичных средств пожаротушения;

- немедленно извещать своего непосредственного руководителя о любой ситуации, угрожающей жизни и здоровью людей, о каждом несчастном случае, произошедшем в лаборатории или об ухудшении состояния своего здоровья, в том числе о появлении острого заболевания (отравления), вызвать медицинскую помощь по телефону 03.

В лаборатории запрещается пользоваться открытым огнем и курить.

# 1. АРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Цель работы: изучение структуры и состава армированных КМ.

Задание: изучить строение, виды и свойства армированных КМ.

## 1.1. Структура и состав композиционных материалов

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят отличающиеся по свойствам нерастворимые друг в друге компоненты. Основой композиционных материалов (КМ) является сравнительно пластичный материал, называемый матрицей. В матрице равномерно распределены более твердые и прочные вещества, называемые упрочнителями или наполнителями. Матрица может быть металлической, полимерной, углеродной и керамической. По форме упрочнителя КМ делятся на дисперсно-упрочненные (с нульмерными упрочнителями), волокнистые (с одномерными упрочнителями) и сложные (с двумерными упрочнителями).

Нульмерные упрочнители имеют очень малые размеры одного порядка во всех трех измерениях. Ими являются дисперсные частички карбидов, оксидов, нитридов и др. В дисперсно-упрочненных материалах несущим компонентом, воспринимающим нагрузки, является матрица. Дисперсные частицы препятствуют движению дислокаций при деформировании материала, за счет чего и происходит упрочнение. Поэтому дисперсно-упрочненные материалы имеют металлическую матрицу. Эти материалы характеризуются высокими показателями длительной прочности и сопротивления ползучести и применяются в качестве жаропрочных.

Одномерные упрочнители имеют малые размеры в двух измерениях и значительно превосходящий их размер в третьем измерении. Этими упрочнителями являются различные волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений, проволока. В волокнистых композиционных материалах несущим компонентом является упрочнитель, а матрица служит для соединения упрочнителя и передачи ему высоких нагрузок. Содержание упрочнителя в волокнистых материалах колеблется в широких пределах - от 15 до 75 % (по объему).

Двумерные упрочнители имеют малые размеры в одном измерении и значительные размеры в двух других измерениях. Такими упрочнителями служат ткани, фольга, листы и др., которые чередуются с матричным материалом. Компонентом, воспринимающим нагрузку в слоистых композиционных материалах, также является упрочнитель.

По схеме расположения упрочнителя различают КМ с одноосным (линейным), двухосным (плоскостным) и трехосным (объемным) расположением упрочнителя. При одноосном расположении могут использоваться нульмерные и одномерные упрочнители. Одномерные

обеспечивает высокую прочность связи между ними, что в сочетании со стойкостью к окислению при высоких температурах позволяет их использовать для ответственных тяжелонагруженных изделий (высокотемпературные подшипники уплотнений, направляющие и рабочие лопатки газотурбинных двигателей, носовые обтекатели ракет и т. д.)

## 6.1. Углерод-углеродные композиционные материалы

Углерод-углеродными называются КМ, представляющие собой углеродную матрицу, армированную углеродными волокнами или тканями. Одинаковая природа и близкие физико-химические свойства обеспечивают прочную связь волокон с матрицей и уникальные свойства этим КМ. Механические свойства упомянутых КМ в большей степени зависят от схемы армирования (<math>\sigma</math> может меняться от 100 до ЮООМПа). Наиболее предпочтительным является многоосное армирование, при котором армирующие волокна расположены в трех и более направлениях (рис. 6.5).

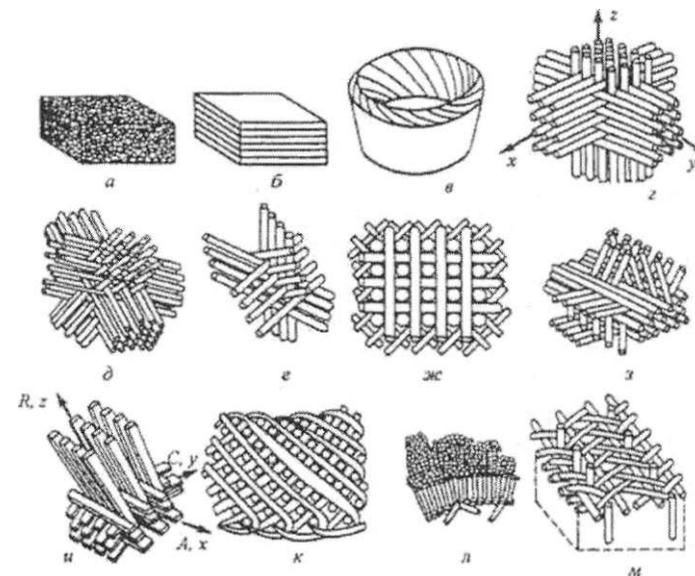


Рис. 6.5. Схемы армирования:

а - хаотическая; б - слоистая; в - розеточная; г - ортогональное;  
и - аксиально-радиально-окружная; к - аксиально-спиральная; л - радиально-спиральная;  
м - аксиально-радиально-спиральная

Достоинствами углерод-углеродных КМ являются малая плотность (1,3-2,1 т/м<sup>3</sup>); высокие теплоемкость, сопротивление тепловому удару, эрозии и облучению; низкие коэффициенты трения и линейного расширения; высокая коррозионная стойкость; широкий диапазон электрических свойств

наполнителем, имеют очень высокую ударную вязкость (0,6-0,7 Мдж/м<sup>3</sup>). Слабые межмолекулярные связи являются причиной низкой прочности и жесткости при сжатии. При этом предельная деформация при сжатии определяется не разрушением волокон, а их искривлением. Дополнительное армирование органоволокнистых волокнами, затрудняющими это искривление, например, углеродными и борными, повышает прочность при сжатии.

Существуют керамические КМ, в состав которых входит керамическая матрица и металлические и не металлические наполнители. Керамические КМ обладают высокой температурой плавления, стойкостью к окислению, термоударам и вибрации. Их получают порошковой технологией, гидростатическим, изостатическим и горячим прессованием, а также центробежным, геликерным и вакуумным литьем. В качестве матриц используют силикатные (SiO<sub>2</sub>), алюмосиликатные (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>), алюмоборосиликатные (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) и другие стекла, тугоплавкие оксиды (ThO<sub>2</sub>, BeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, и т. д.), нитрид Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, бориды (TiB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>) и карбиды (SiC, TiC).

Керамические КМ на основе карбидов и оксидов с добавками металлического порошка (< 50 % (об)) называют кирметами. Они не нашли широкого применения из-за высокой хрупкости. Помимо порошков для армирования керамических КМ используют металлическую проволоку из жаропрочной стали, вольфрама, молибдена, ниобия, а также неметаллические волокна (углеродные, керамические). Ориентация волокон в зависимости от условий нагружения может быть направленной или хаотичной.

Использование металлической проволоки из тугоплавких металлов и жаропрочных сталей имеет целью создать пластичный каркас, предохраняющий КМ от преждевременного разрушения при растрескивании керамической матрицы. Ударная вязкость и термостойкость керамических КМ повышаются при увеличении содержания волокна не более чем на 25 % объема, затем возрастающая пористость вызывает снижение прочности этих КМ. Недостатком керамических КМ, армированных металлическими волокнами, является низкая жаростойкость.

Перспективным наполнителем для керамических КМ является высокомодульное углеродное волокно. Для обеспечения максимальной прочности доля углеродного волокна должна составлять 50-60 % объема при оптимальном отношении модулей упругости матрицы и волокна, равном 0,1. Однако свойства и температура эксплуатации этих КМ в большей степени зависят от материала матрицы. Рабочие температуры для углеродкермических КМ со стеклянной матрицей, отличающихся высокой стабильностью механических свойств практически до температур размягчения (600-800 °С), не должны превышать эти температуры. КМ с матрицей из тугоплавких оксидов можно использовать до 1000 °С, из боридов и нитридов - до 2000 °С, из карбидов - свыше 2000 °С. Кроме того, свойства керамических КМ зависят от способа формования.

Преимуществом керамических КМ, армированных волокнами SiC, является химическое сродство матрицы и наполнителя в этих КМ, которое

располагаются параллельно друг другу, а нульмерные так, чтобы расстояние между ними по одной оси было значительно меньше, чем по двум другим.

При двухосном расположении могут использоваться любые формы упрочнителей, которые располагаются в параллельных плоскостях. При трехосном расположении используются нульмерные и одномерные упрочнители, которые распределены равномерно во всех трех направлениях (рис. 1.1, а-з).

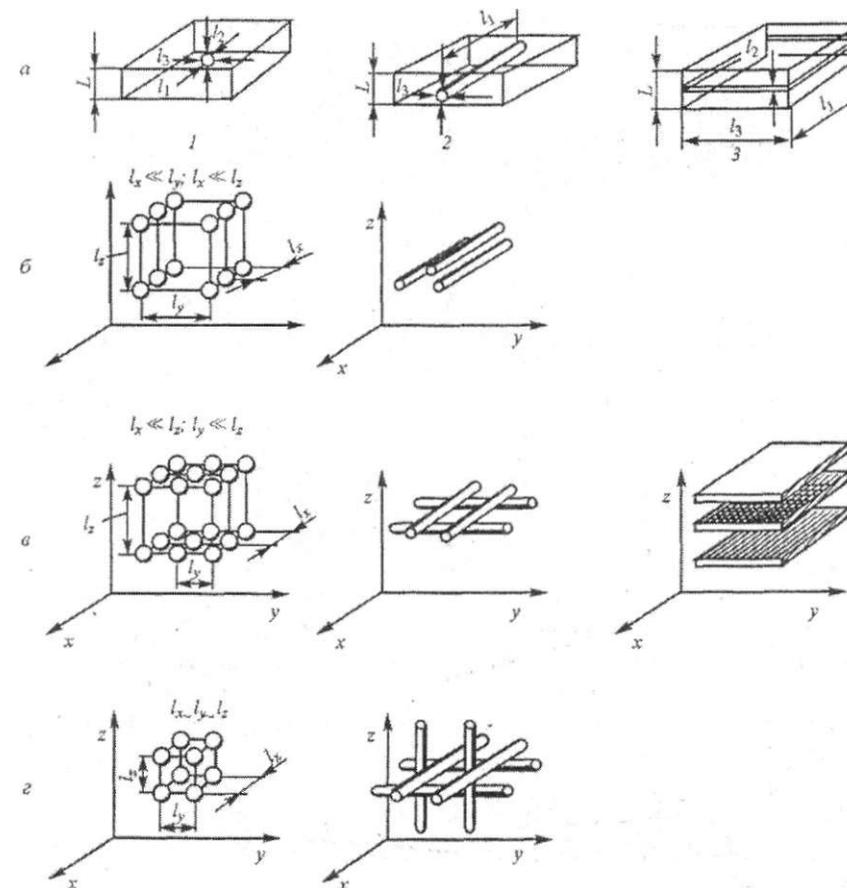


Рис. 1.1. Формы наполнителя (а) и схемы армирования (б-з) КМ

Существуют полиматричные и полиармированные композиционные материалы (рис. 1.2). Полиматричные материалы имеют комбинированные матрицы, состоящие из чередующихся слоев матриц с различным химическим

составом. Полиармированные материалы имеют одновременно упрочнители различной формы или одной формы, но разного химического состава. Например, полимерная матрица с нульмерным и одномерным упрочнителем или полимерная матрица, упрочненная одновременно двумя видами волокон.

Так, для повышения модуля упругости КМ с полимерной матрицей, армированной стеклянным волокном, дополнительно вводят волокно бора (рис. 1.3).

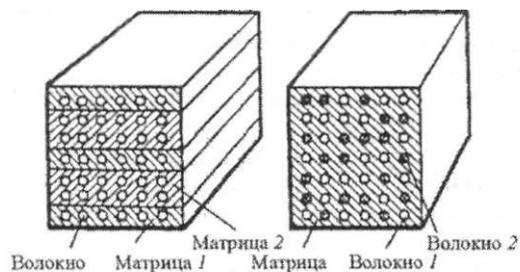


Рис. 1.2. Схема полиматричного и полиармированного КМ

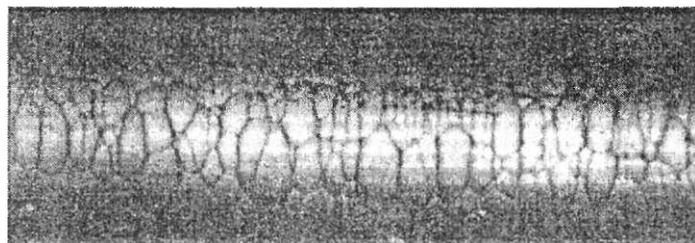


Рис. 1.3. Структура поверхности борного волокна. X100

Для расширения комплекса свойств или уяснения какого-либо свойства при армировании КМ одновременно используют наполнители различной формы (рис. 1.4). Например, для увеличения прочности связи между одномерными наполнителями (стеклянным или углеродным волокном) и полимерной матрицей в нее вводят нульмерный упрочнитель (частицы асбеста, карбида кремния и др.). С этой же целью применяют армирование наполнителями одной формы, но разного состава. Так для повышения модуля упругости КМ с полимерной матрицей, армированной стеклянным волокном, дополнительно вводят волокно бора. КМ, которые содержат два или более различных наполнителя, называют полиармированными. Если КМ состоят из трех или более компонентов, они называются гибридными.

Зависимости механических свойств бороволокнитов от объемного содержания волокон представлены на рис. 6.4.

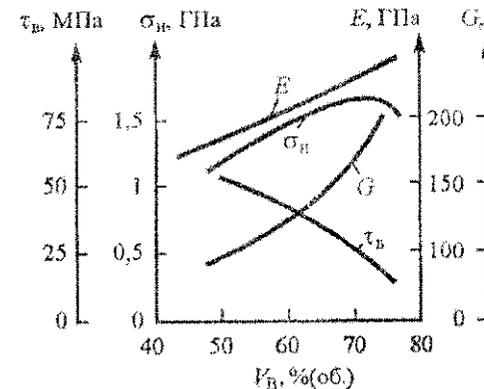


Рис. 6.4. Зависимость механических свойств бороволокнита КМБ-1 от объемного содержания борных волокон

Однако свойства бороволокнитов зависят не только от свойств волокон и их объемного содержания, но и в большей степени от их геометрии и диаметра. Так ячеистая структура волокна обеспечивает высокую прочность при сдвиге и срезе. Большой диаметр волокон и высокий модуль упругости придают устойчивость бороволокниту и способствуют повышению прочности при сжатии. Вместе с тем большой диаметр вызывает необходимость увеличения эффективной длины волокон, повышает чувствительность к разрушению отдельных волокон, уменьшает временное сопротивление по сравнению с тонковолокнистым материалом.

Органоволокниты обладают высокой удельной прочностью в сочетании с хорошими пластичностью и ударной вязкостью. Их характерной особенностью является единая полимерная природа матриц и адмирующих волокон. Матрица и наполнитель имеют близкие значения коэффициента линейного расширения, им свойственны химическое взаимодействие и прочная связь. Органоволокниты имеют бездефектную и практически безпористую структуру (пористость 1-3 %), хорошую стабильность механических свойств. Слабым местом при нагружении материала является не только граница раздела между волокном и матрицей, сколько межмолекулярные связи в самом волокне.

Структура орговолокна неоднородна. Большая степень ориентации фибрилл в направлении оси волокон обеспечивает им высокие прочность и жесткость при растяжении в этом направлении. Однако неоднородность структуры волокон обуславливает различные напряженные состояния в отдельных ее элементах. Между этими элементами возникают напряжения сдвига, которые приводят сначала к расщиплению волокна вдоль оси, а затем - к разрушению. Такой механизм разрыва волокон вызывает большую работу разрушения в целом. Это характеризует высокую прочность при статическом и динамическом нагружении. Органоволокниты, особенно с эластичным

Уменьшение диаметра непрерывных волокон, нанесение на них специальных покрытий, дополнительное введение в матрицу монокристаллов оксида алюминия способствует повышению временного сопротивления стекловолокон до 2000-2400 МПа. Они обладают хладостойкостью (до -196 °С) и хорошей теплостойкостью; способны длительное время работать в диапазоне температур 200-400 °С. Кроме того, благодаря демпфирующей способности их используют для работы в условиях вибрационных нагрузок.

Достоинствами стекловолокон являются недефицитность и низкая стоимость упрочнителя, недостатком - сравнительно низкий модуль упругости. Однако по удельной жесткости они превосходят легированные стали и сплавы алюминия, магния и титана (2500-2800 км).

Частичная замена стеклянных волокон на углеродные и увеличение доли последних вплоть до полной замены при общем постоянном содержании наполнителя вызывают повышение жесткости КМ (рис. 6.3). При полной замене модуль упругости увеличивается приблизительно в 3 раза и у углеволокон достигает 180 ГПа. Однако временное сопротивление и удельная прочность при любом содержании волокон не достигают уровня стекловолокон.

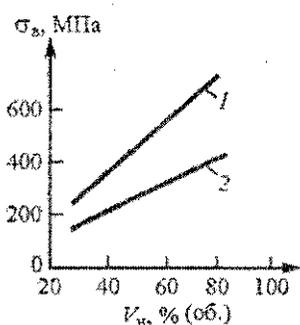


Рис. 6.2. Зависимость прочности стекловолокон от содержания и вида наполнителя:

1 - непрерывное ориентированное волокно; 2 - короткое неориентированное волокно

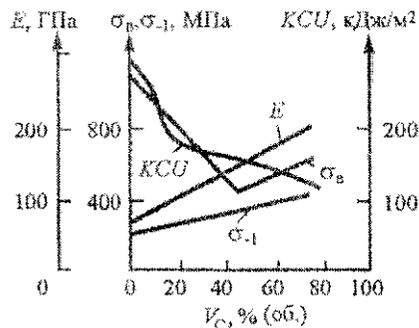


Рис. 6.3. Зависимость механических свойств волокна при разном соотношении армирующих стеклянных и углеродных волокон (общее содержание наполнителя 62 % (об.))

Углеволокониты обладают низкими теплопроводностью и электрической проводимостью, но все же их теплопроводность 1,5-2 раза выше, чем у стекловолоконитов. Они имеют малый и стабильный коэффициент трения и обладают хорошей износостойкостью. Температурный коэффициент линейного расширения углеволоконитов в интервале 20-120 °С близок к нулю.

К недостаткам углеволоконитов относят низкую прочность при сжатии и межслойном сдвиге. Специальная обработка поверхности волокон (окисление, травление, вискеризация) повышает эти характеристики.

Бороволокониты характеризуются высокими временным сопротивлением, пределами прочности при сжатии и сдвиге, твердостью и модулем упругости.

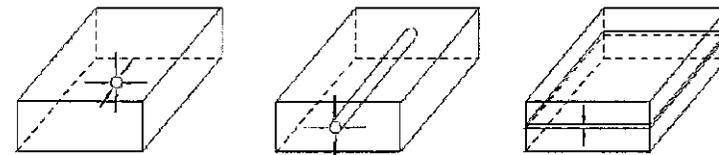


Рис. 1.4. Формы наполнителей  
Схемы армирования КМ: трехосная, двухосная и одноосная

## 1.2. Гибридные композиционные материалы

К классу гибридных КМ относятся полиматричные и полиармированные КМ. В зависимости от распределения компонентов гибридные КМ подразделяют на следующие виды:

- однородные - с равномерным распределением каждого компонента по объему КМ;
- с линейной неоднородностью - волокна одного или обоих армирующих компонентов объединены в жгуты, равномерно объединены по объему КМ;
- с плоскостной неоднородностью - волокна каждого компонента образуют чередующиеся слои.

Макронеоднородные - волокна различных компонентов образуют зоны, соизмеримые с размером изделия. К наиболее технологичным относятся гибридные КМ с плоскостной неоднородностью и макронеоднородные. Возникающие при их изготовлении термические напряжения можно устранить или свести к минимуму оптимальным подбором состава компонентов как матрицы, так и наполнителей, что приводит к значительному повышению технологических и эксплуатационных свойств гибридных КМ по сравнению с двухкомпонентными материалами. Например, коэффициент линейного расширения стекло- и углеволоконитов значительно изменяется с увеличением температуры, в то время как у стекловолоконитов и органоволоконитов он остается постоянным в широком интервале температур. Применение стеклянного и углеродных волокон в гибридных КМ позволяет повысить модуль упругости за счет увеличения объемного содержания углеродного наполнителя. К новому поколению гибридных КМ относятся алюмополимерные КМ, состоящие из чередующихся склеенных тонких листов (0,3-0,8 мм) алюминиевых деформированных сплавов и прослоек полимера (0,2-0,5 мм), армированных стеклянным или органическим волокном. Типичная структура алюмополимерного КМ состоит из двух слоев алюминиевого сплава и прослойки армированного полимера (2:1) или из трех слоев алюминиевого сплава, разделенных прослойками стекло- или органоволоконитов (3:2). При этом слои алюминиевого сплава всегда расположены на поверхности КМ.

По сравнению с обычными алюминиевыми сплавами эти материалы отличаются пониженной плотностью (на 15-20 %), повышенными прочностными и усталостными характеристиками. Скорость развития

усталостной трещины у них на порядок ниже, чем у соответствующих алюминиевых сплавов. Кроме того, они имеют высокие акустические и демпфирующие свойства.

### Вопросы

1. Что называем композиционными материалами (КМ) и какова его структура?
2. Какие существуют упрочнители для КМ?
3. Опишите об особенностях КМ с нульмерными упрочнителями.
4. Какие бывают формы наполнителя?
5. Нарисуйте схемы армирования.
6. Какие роли играют в КМ матрица и наполнитель?
7. Каковы структура и свойства КМ (одномерные, двумерные наполнители)?
8. Что знаете о полиармированных и полиматричных КМ?
9. Какие КМ называют гибридными?
10. Опишите структуру и свойства гибридных КМ.
11. Какие строения и свойства у гибридного алюмополимерного КМ?

### Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.

волокном, - более чем в 16 раз. Увеличение прочности КМ объясняется не столько повышением прочности самой матрицы (она изменяется мало), сколько увеличением жесткости и адгезионной прочности ее сцепления с волокнами.

Таблица 6.1  
Влияние добавок  $Ba^{2+}$  и  $Ni^{2+}$  на свойства одноосно-армированных КМ

Материал	$E_{\infty}$ , МПа			он МПа			т.ф., МПа		
	Без добавок	$Ba^{2+}$	$Ni^{2+}$	Без добавок	$Ba^{2+}$	$Ni^{2+}$	Без добавок	$Ba^{2+}$	$Ni^{2+}$
Полиметил-фенольная матрица	2060	2580	3100	81	87	90	-	-	-
То же + стеклянное волокно	44 500	45 000	45 600	89	1260	1330	1580	2160	2280
То же + углеродное волокно	106 000	107 000	108 000	87	1370	1520	-	-	-

Примечание. Значения модуля упругости и разрушающего напряжения определены при испытании на изгиб.

Механические свойства некоторых одноосно-армированных волокнистых КМ представлены в табл. 6.2. Самую высокую прочность и удельную прочность имеют стекловолокниты. Их временное сопротивление повышается приблизительно в три раза по мере увеличения объемного содержания наполнителя до 80 % и достигает 700 МПа при армировании непрерывными нитями (рис. 6.2).

Таблица 6.2  
Свойства одноосно-армированных композиционных материалов с полимерной матрицей

КМ	$\rho$ , МПа	$\sigma_{\infty}$ , МПа	$\sigma_v/(\rho g)$ , км	$\delta$ , %	$E$ , ГПа	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$ , км	$\sigma_{-1}$ , МПа (на базе $10^7$ циклов)
<b>Углевлокниты:</b>							
КМУ-1л	1,4	650	46	0,5	120	8,6	300
КМУ-1у	1,47	1020	70	0,6	180	12,2	500
КМУ-1в	1,55	1000	65	0,6	180	11,5	350
КМУ-2в	1,3	380	30	0,4	81	6,2	135
<b>Боровлокниты:</b>							
КМБ-1к	2	900	43	0,4	214	10,7	350
КМБ-2к	2	1000	50	0,3	260	13	400
КМБ-3к	2	1300	65	0,3	260	12,5	420
<b>Органовлокниты с упрочнителем:</b>							
эластичным	1,15–1,3	100–190	8–15	10–20	2,5–8,0	0,22–0,6	100
жестким	1,2–1,4	650–700	50	2–5	35	2,7	-
Стекловолокниты	2,2	2100	96	-	70	3,2	-

поверхностное натяжение составляет  $5,0 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>, тогда как для углеродных волокон оно находится в интервале  $(2,7 \dots 5,8) \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>, а для борных равно  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>. Поверхностную энергию волокон повышают различными методами обработки их поверхности: травлением, окислением, вискеризацией. Например, после травления борных волокон в азотной кислоте их критическое поверхностное натяжение достигает сотен джоулей на квадратный метр. На рис. 6.1 видно, что благодаря травлению поверхностное натяжение борного волокна увеличивается и параметр  $\tau_0 \xi$  резко возрастает. Это свидетельствует об увеличении прочности связи между волокнами и матрицей.

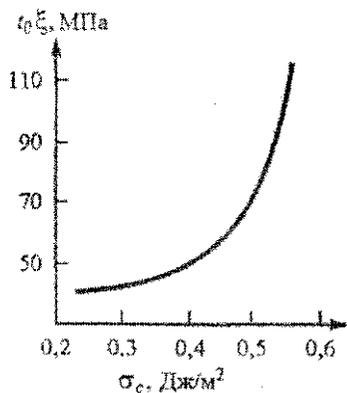


Рис. 6.1. Зависимость параметра  $\tau_0 \xi$  боропластика от критического натяжения борных волокон

По сравнению с другими полимерами, применяемыми в качестве матриц КМ, эпоксидные обладают более высокими механическими свойствами в интервале от -60 до 180 °С, что обеспечивает КМ более высокие механические характеристики при сжатии и сдвиге. Эпоксидные матрицы отверждаются при сравнительно невысоких температурах с небольшой усадкой, позволяющей изготавливать из КМ на их основе крупногабаритные детали. При этом не требуется больших давлений, что особенно важно при использовании для армирования высокопрочных хрупких волокон, так как уменьшается вероятность их повреждения.

Эпоксидные матрицы уступают феноло-формальдегидным и особенно полиамидным в теплостойкости.

Одним из способов улучшения свойств КМ является увеличение жесткости матрицы с помощью введения в их структуру ионов металлов, которые усиливают взаимосвязь между полимерными молекулами. Как видно из табл. 6.1, введение в матрицу 15 %  $Va^{2+}$  или  $Ni^{2+}$  повышает модуль упругости при изгибе полиметилфенольной матрицы соответственно на 25 и 50 %. При этом предел прочности при изгибе матрицы, армированной стеклянным волокном, возрастает более чем в 14 раз, а матрицы, армированной углеродным

## 2. ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Цель работы: изучение структуры и состава дисперсно-упрочненных КМ.

Задание: изучить строение, виды и свойства дисперсно-упрочненных КМ.

В дисперсно-упрочненных КМ наполнителями служат дисперсные частицы тугоплавких фаз-оксидов, баридов, карбидов ( $Al_2O_3, SiO_2, BN, SiC$  и др.). К достоинствам тугоплавких соединений относятся высокое значение модуля упругости, низкая плотность, пассивность к взаимодействию с материалами матриц, а таких как окислы алюминия и кремния - большая распространенность в природе и невысокая стоимость образующих их элементов.

Дисперсно-упрочненные КМ в основном получают порошковой технологией, но существуют и другие способы, например, метод непосредственного введения наполнителей в жидкий металл или сплав перед разливкой. В последнем случае для очистки от жировых и других загрязнений, улучшения смачиваемости частиц жидким металлом и равномерного распределения их в матрице применяют ультразвуковую обработку жидкого расплава.

В дисперсно-упрочненных КМ основную нагрузку воспринимает матрица, а дисперсные частицы упрочнителя оказывают сопротивление движению дислокаций при нагружении металла, мешают развитию пластической деформации. Чем больше это сопротивление, тем выше прочность. Прочность зависит также от дислокационной структуры, формирующейся в процессе пластической деформации при изготовлении изделий из КМ. Кроме того, дисперсные частицы наполнителя оказывают «косвенное» упрочняющее действие, способствующее образованию структуры с большей степенью неравномерности зерен (волоконистой). Такая структура формируется при сочетании пластической деформации и отжига. При этом дисперсное включение частично или полностью препятствует рекристаллизационным процессам.

Уровень прочности зависит от объемного содержания упрочняющей фазы, равномерности ее распределения, степени дисперсности и расстояния между частицами. Согласно формуле Орована, сопротивление сдвигу увеличивается с уменьшением расстояния между частицами:

$$\sigma = \frac{Gb}{l},$$

где  $G$  - модуль сдвига;  $b$  - межатомное расстояние;  $l$  - расстояние между частицами.

**6. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
НА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ.  
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6**

Большое упрочнение достигается при размере частиц 0,01-0,1 мкм и расстояния между ними 0,05-0,5 мкм. Объемное содержание частиц зависит от схемы армирования.

Преимущество дисперсно-упрочненных КМ по сравнению с волокнистыми - изотропность свойств.

К дисперсно-упрочненным КМ на алюминиевой основе, нашедшим промышленное применение, относится материал из спеченной алюминиевой пудры (САП). Материал САП характеризуется высокой прочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств.

САП состоит из алюминия и его оксида. Получают САП путем последовательного брикетирования, спекания и прессования окисленных с поверхности алюминиевой пудры. Исходным материалом при получении пудры служит порошок - пульверизат, который изготавливают распылением расплавленного алюминия А6 (ГОСТ 11069-74). Порошок размельчают в шаровых мельницах в атмосфере азота с добавлением 2-3 %  $O_2$  и 0,25-1,2 % стеариновой кислоты. Кислород используется для окисления вновь образованных поверхностей пудры, стеарин - для облегчения скольжения и препятствия свариванию частиц пудры. Частицы пудры имеют форму чешуек толщиной менее 1 мкм. Длина и ширина частиц одного порядка, толщина оксидной пленки составляет 0,01-0,1 мкм. Размер частиц зависит от длительности разлома: чем продолжительнее время разлома, тем мельче частицы пудры, больше их общая поверхность и, следовательно, выше содержание оксида алюминия. Например, пудра марки АПС-1 с размером частиц 30-50 мкм содержит 6-8 %  $Al_2O_3$ , а пудра АПС-2, имеющая размер частиц 10-15 мкм, уже 9-12 %  $Al_2O_3$ . В настоящее время освоена технология получения алюминиевой пудры четырех марок и соответствующих им марок САП (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Механические свойства САП

Материал	Содержание $Al_2O_3$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\frac{\sigma_b}{\rho d}$ , км	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$E$ , ГПа	$\frac{E}{\rho d} \cdot 10^{-3}$ , км
САП-1	6-8	300	11	220	7	67	2,1
САП-2	9-12	350	13	280	5	71	2,6
САП-3	13-17	400	15	320	3	76	2,8
САП-4	18-22	450	17	370	1,5	80	2,9

Структура САП представляет собой алюминиевую основу с равномерными дисперсными включениями  $Al_2O_3$ . С увеличением содержания  $Al_2O_3$  повышаются прочность (рис. 2.1). Высокая прочность САП объясняется большой дисперсностью оксидной фазы, малым расстоянием между ее частицами. Нерастворимость в алюминии и отсутствие склонности к

Цель работы: изучение структуры и механических свойств КМ на неметаллической основе.

Задание: изучить влияние различных комбинаций упрочнителей и неметаллических матриц на прочность КМ.

По сравнению с КМ на металлической основе эти материалы отличает хорошая технологичность, низкая плотность и в ряде случаев более высокие удельные прочность и жесткость. Кроме того, КМ на неметаллической основе имеют высокую коррозионную стойкость, хорошие теплозащитные и амортизационные свойства и т. д.

Для большинства КМ с неметаллической матрицей характерны следующие недостатки: низкая прочность связи волокна с матрицей, резкая потеря прочности при повышении температуры выше 100-200 °С, плохая свариваемость.

Среди неметаллических КМ наибольшее распространение получили композиции с полимерной матрицей: эпоксидной, феноло-формальдегидной и полиамидной.

В настоящее время для КМ особо высокой теплостойкости используют керамические и углеродные матрицы. В качестве упрочнителей применяют высокопрочные и высококомодульные углеродные и борные, стеклянные и органические волокна в виде нитей, жгутов, лент и нетканых материалов.

Группы КМ, армированные однотипными волокнами, имеют специальные названия, данные им по названию волокна. Композиции с углеродными волокнами называются углеволокнитами, с борными-бороволокнитами, стеклянными-стекловолокнитами, органическими-оргоноволокнитами. Для оргоноволокнитов используют эластичные (лавсан, капрон, нитрон) и жесткие (ароматический полиамид, виол) синтетические волокна.

Из-за быстрого отверждения и низкого коэффициента диффузии в неметаллической матрице (исключение составляют оргоноволокниты) в КМ нет переходного слоя между компонентами. Связь между волокнами и матрицей носит адгезионный характер, т. е. осуществляется путем молекулярного взаимодействия. Прочность связи, характеризующая параметром  $\tau$ ,  $\xi$  ( $m$ , - прочность сцепления,  $\xi$ , - коэффициент контакта), повышается с увеличением критического поверхностного натяжения волокна ( $a$ ). Для обеспечения высокой прочности связи между компонентами необходимо полное смачивание волокон (которая достигается, например, растеканием жидкого связующего по поверхности волокон); при этом поверхностная энергия волокон должна быть больше поверхностного натяжения жидкой матрицы. Однако для жидких смол, обладающих лучшей адгезией к наполнителям среди других полимеров,

### 5.5. Композиционные материалы с никелевой матрицей

Основная задача при создании КМ на никелевой основе заключается в повышении рабочих температур до 1000 °С и более. И одним из лучших металлических упрочнителей, способных обеспечить хорошие показатели прочности при столь высоких температурах, является вольфрамовая проволока. Введение вольфрамовой проволоки в количестве от 40 до 70 % объема в сплав никеля с хромом обеспечивает  $\sigma_{100}^{1000}$  в пределах 130-250 МПа, тогда как лучший неармированный никелевый сплав, предназначенный для работы в аналогичных условиях, имеет  $\sigma_{100}^{1000} = 75$  МПа. Использование для армирования проволоки из сплавов вольфрама с рением или гафнием увеличивает этот показатель на 30-50 %.

#### Вопросы

1. Какими преимуществами обладают металлические матрицы?
2. Назовите перспективные материалы для матриц КМ.
3. Что представляют собой КМ с алюминиевой матрицей?
4. Опишите структуру и свойства алюминиевых матриц с борными волокнами.
5. Укажите свойства КМ на алюминиевой основе с углеродными волокнами.
6. Приведите достоинства и недостатки КМ с магниевой матрицей.
7. Что знаете о КМ с армированной титановой основой?
8. Отметьте достоинства и недостатки КМ с титановой матрицей.
9. Что представляют КМ с никелевой матрицей?

#### Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.

коагуляции тонкодисперсных частиц  $Al_2O_3$ , обеспечивает стабильность структуры и высокую прочность при температуре до 500 °С.

САП хорошо деформируется в горячем состоянии, хуже - в холодном, легко обрабатывается резанием и удовлетворительно сваривается контактной и аргонодуговой сваркой. В настоящее время в основном применяют САП-1, САП-2 и САП-3, из них производят все виды полуфабрикатов: листы, профили, штамповые заготовки, трубы, фольгу. САП используют для деталей, работающих при 300-500 °С, от которых требуются высокая удельная прочность и коррозионная стойкость (поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопатки вентиляторов и турбин, конденсаторы, обмотки трансформаторов и т. д.)

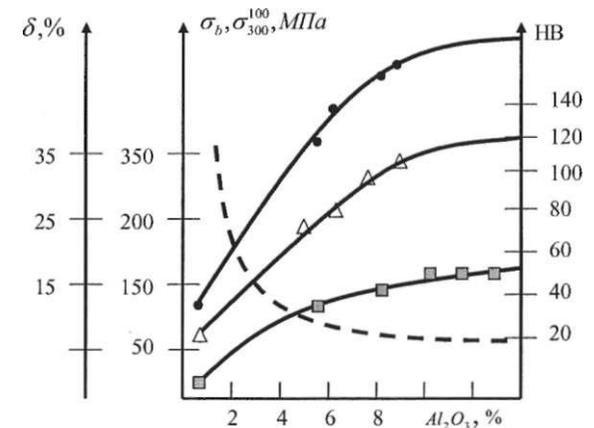


Рис. 2.1. Зависимость механических свойств САП от содержания  $Al_2O_3$ .

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) изготавливают в основном по той же технологии, что и САП - из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов.

Практическое значение имеют сплавы с низким температурным коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициенту линейного расширения стали, и высоким модулем упругости. Так, АСА, содержащий 25-30 %  $Si$ , 5-7 %  $Ni$ , остальное  $Al$ , имеет  $\alpha = (14,5-15,5) \times 10^{-6} K^{-1}$ ;  $E = 100 ГПа$ . Эти сплавы заменяют более тяжелые стали при изготовлении отдельных деталей. Механические свойства САС характеризуются достаточно высокой прочностью, твердостью ( $\sigma_b = 260 МПа, 120 НВ$ ) и низкой пластичностью ( $\delta = 1,5...1 \%$ ). Преимущества спекаемых алюминиевых сплавов по сравнению с обычными аналогичного состава - отсутствие линейных дефектов (ликвации, шлаковых включений и т. д.) и мелкозернистая структура с равномерным распределением фаз.

Высокими механическими свойствами при комнатной и повышенной температурах обладают КМ на основе алюминия и его сплавов, упрочненные частицами карбида алюминия  $Al_4C_3$ . Их получают методом механического легирования углеродом порошка алюминия с последующим компактированием, прессованием и прокаткой. В процессе нагрева алюминий образует с углеродом карбид  $Al_4C_3$ . КМ  $Al-Al_4C_3$  имеет  $\sigma_s = 450...500 МПа$ ,  $\sigma_{0,2} = 430...470 МПа$ ,  $\delta = 4\%$ . По длительной прочности ( $\sigma_{100}^{500} = 60 МПа$ ) он превосходит все стандартные алюминиевые сплавы.

К перспективным относятся КМ с малой плотностью на основе бериллия и магния:  $Be-BeO$ ,  $Be-Be_2C$  и  $Mg-MgO$ . Однако они не нашли большого применения из-за технологических сложностей и низкой коррозионной стойкости.

В качестве матриц жаропрочных КМ используют никель, кобальт и их сплавы. КМ с кобальтовой матрицей, обладая незначительным преимуществом перед никелевым КМ в жаропрочности, нашли ограниченное применение из-за высокой стоимости.

Существуют дисперсно-упрочненные КМ на никелевой основе. В качестве матрицы в этих материалах используют никель и его сплавы с хромом (-20 %) со структурой твердых растворов. Сплавы с хромоникелевой матрицей обладают более высокой жаростойкостью. Упрочнителями служат частицы оксидов тория, гафния и др. Временное сопротивление в зависимости от объемного содержания упрочняющей фазы изменяется по кривой с максимумом. Наибольшее упрочнение достигается при 3,5-4 %  $HfO_2$  ( $\sigma_s = 750...850 МПа$ ,  $\frac{\sigma_s}{\rho} = 9...10 км$ ,  $\delta = 8...12\%$ ). Легирование никелевой матрицы

$W$ ,  $Ti$ ,  $Al$ , обладающими переменной растворимостью в никеле, дополнительно упрочняет материалы в результате дисперсионного твердения матрицы, происходящего в процессе охлаждения с температур спекания. Методы получения этих материалов довольно сложны. Они сводятся к смешиванию порошков металлического хрома и легирующих элементов с заранее приготовленным (методом химического охлаждения) порошком никеля, содержащим дисперсный оксид гафния или другого элемента. После холодного прессования смеси порошков проводят горячую экструзию брикетов.

### Вопросы

1. Какие материалы служат наполнителями в ДУКМ?
2. Каким образом получают ДУКМ?
3. Каковы структуры и прочность ДУКМ?
4. Укажите достоинства и недостатки ДУКМ.
5. Что такое САП?
6. Каковы структура и свойства САП?
7. Что такое САС? Технология получения.
8. Свойства САС.
9. Как получают ДУКМ на никелевой основе?
10. Каковы свойства ДУКМ?

деталей при повышенных температурах. Удельная прочность этих материалов повышается благодаря применению в качестве матрицы сплавов, легированных легким литием, а также в результате использования более легкого углеродного волокна. Как уже отмечалось, введение углеродного волокна усложняет технологию производства сплавов. Как известно, магний и его сплавы обладают низкой технологической пластичностью, склонностью к образованию рыхлой оксидной пленки.

### 5.4. Композиционные материалы с титановой матрицей

При создании КМ на титановой основе встречаются трудности, вызванные необходимостью нагрева до высоких температур. При таких температурах титановая матрица становится очень активной; она приобретает способность к газопоглощению, взаимодействию с многими упрочнителями: бором, карбидом кремния, оксидом алюминия и др. В результате образуются реакционные зоны, снижается прочность как самих волокон, так и КМ в целом. Кроме того, высокие температуры приводят к рекристаллизации и разупрочнению многих армирующих материалов, что снижает эффект от армирования. Поэтому для упрочнения материалов с титановой матрицей используют проволоку из бериллия и керамических волокон тугоплавких оксидов ( $Al_2O_3$ ), карбидов ( $SiC$ ), а также тугоплавких металлов, обладающих оольшим модулем упругости и высокой температурой рекристаллизации ( $Mo$ ,  $W$ ). Причем целью армирования является в основном не повышение и без того высокой удельной прочности, а увеличение модуля упругости и рабочих температур. Механические свойства титанового сплава ВТ6 (6 %  $Al$ , 4 %  $V$ , остальное  $Ti$ ), армированного волокнами  $Mo$ ,  $Be$  и  $SiC$  представлены в табл. 5.2. Видно, что наиболее эффективно удельная жесткость повышается при армировании волокнами карбида кремния.

Таблица 5.2

Механические свойства КМ на основе сплава ВТ6						
Упрочнитель	Содержание упрочнителя, % (об)	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\sigma_s$ , МПа в скобках $\sigma_s$ упрочнителя	$\sigma_s/(\rho g)$ , км	$E$ , ГПа	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$ , км
Mo	30	6,25	1400 (2300)	22	200	3,2
Be	33	—	1050 (1050)	—	168	—
SiC	25	4,3	910 (2550)	23	210	5

Армирование сплава ВТ6 молибденовой проволокой способствует сохранению высоких значений модуля упругости до 800 °С. Его значение при этой температуре соответствует 124 ГПа, т. е. снижается на 33 %, тогда как временное сопротивление при этом уменьшается до 420 МПа, т. е. более чем в 3 раза.

высокопрочные В95, и сплавы, специально предназначенные для работы при высоких температурах (например, АК4-1). Наглядно это представлено на рис. 5.2. Высокая демпфирующая способность материала обеспечивает вибропрочность изготовленных из него конструкций. Плотность КМ ВК4-1 равна  $2,65 \text{ т/м}^3$ , а удельная прочность -  $45 \text{ км}$ . Это значительно выше, чем у высокопрочных сталей и титановых сплавов.

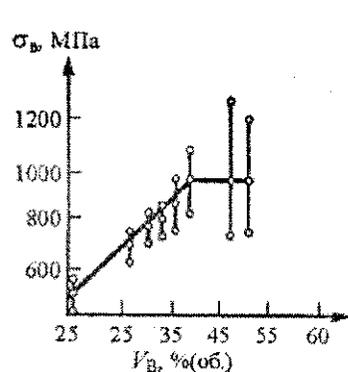


Рис. 5.1. Зависимость временного сопротивления борноалюминиевых листов от объемного содержания борных волокон

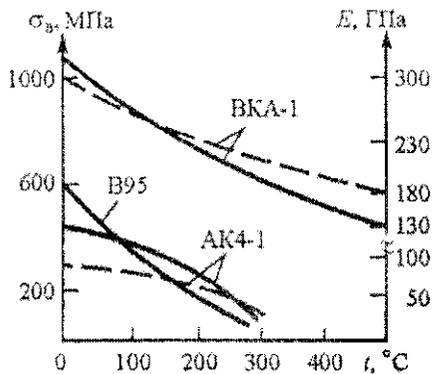


Рис. 5.2. Зависимость временного сопротивления (сплошные линии) и модуля упругости (штриховые линии)

Расчеты показали, что замена сплава В95 на титановый сплав при изготовлении лонжерона крыла самолета с подкрепляющими элементами из ВКА-1 увеличивает его жесткость на 45 % и дает экономию в массе около 42 %. КМ на алюминиевой основе, армированные углеродными волокнами (ВКУ), дешевле и легче, чем материалы с борными волокнами. И, хотя они уступают последним по прочности, их удельные прочности близки. Однако, изготовление КМ с углеродным упрочнителем связано с большими технологическими трудностями вследствие взаимодействия углерода с металлическими матрицами при нагреве, вызывающего снижение прочности материала. Для устранения этого недостатка применяют специальные покрытия углеродных волокон.

### 5.3. Композиционные материалы на магниевой основе

Материалы с магниевой матрицей характеризуются меньшей плотностью ( $1,8-2,2 \text{ т/м}^3$ ), чем с алюминиевой, при почти такой же высокой прочности (1000-1200 МПа) и поэтому более высокой удельной прочностью. Деформируемые магниевые сплавы (МА2 и др.), армированные борным волокном (50 % объема) имеют более высокую прочность. Хорошая совместимость магния и его сплавов с борным волокном, с одной стороны, позволяет изготовить детали методом пропитки практически без последующей механической обработки, с другой - обеспечивает большой ресурс работы

### Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.

### 3. ВОЛОКНИСТЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

**Цель работы:** изучение структуры и состава волокнистых КМ.

**Задание:** изучить строение, виды и свойства волокнистых КМ.

В волокнистых КМ упрочнителями служат волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (В, С,  $Al_2O_3$ , SiC и др.), а также проволока из металлов и сплавов (Мо, W, Ве, высокопрочная сталь и др.).

Для армирования КМ используют непрерывные дискретные волокна диаметром от долей до сотен микрометров.

При упрочнении волокнами конечной длины нагрузка на них передается через матрицу с помощью касательных напряжений. В условиях прочного (без проскальзывания) соединения волокна с матрицей нагрузка на волокна при растяжении равна  $\tau_{\text{кас}} \cdot d \cdot l$ , где  $\tau$  - касательное напряжение, возникающее в матрице в месте контакта с волокном;  $d$  - диаметр волокна;  $l$  - длина волокна. С увеличением длины волокна повышается возникающее в нем напряжение. При определенной длине, называемой критической, напряжение достигает максимального значения. Оно не меняется при дальнейшем увеличении длины волокна. Определяют  $l_{\text{кр}}$  из равенства усилий в матрице на границе с волокном и в волокне с учетом симметричного распределения в нем напряжений:

$$\tau \pi d l_{\text{кр}} / 2 = \sigma_a \pi d^2 / 4;$$

$$l_{\text{кр}} = \sigma_a d / (2\tau), \text{ или } l_{\text{кр}} / d = \sigma_a / (2\tau).$$

Теоретические расчеты, подтвержденные практикой, показывают, что чем тоньше и длиннее волокно, а точнее, чем больше отношение длины к диаметру, тем выше степень упрочнения ( $\sigma_{\text{в,КМ}} / \sigma_{\text{в,м}}$ ) КМ (рис. 3.1). В качестве матриц металлических КМ используют металлы: алюминий, магний и титан, жаропрочный никель и сплавы на их основе; для неметаллических КМ - полимерные, углеродистые, керамические материалы.

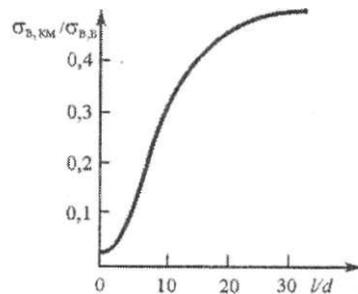


Рис. 3.1. Теоретическая зависимость эффективного упрочнения КМ от отношения  $l/d$  упрочнителя

Применение в качестве матрицы сплава (например, В95), упрочненного термообработкой (закалка и старение), дает дополнительный эффект упрочнения КМ. Механические свойства КМ алюминиевый сплав - 50 % объема борные волокна без термической обработки (числитель) и после нее (знаменатель) приведены ниже:

	Вдоль волокон	Поперек волокон
$\sigma$ , МПа	1580/1670	137/259
$E$ , ГПа	232/239	141/148

Примечание. Временное сопротивление матрицы (Al - 1 %, Mg - 0,6 %, Si - 0,2 % Cr) до термической обработки составляло 130 МПа, после - 320 МПа.

Видно, что в направлении оси волокон эффект упрочнения невелик, тогда как в поперечном направлении, где свойства определяются в основном свойствами матрицы, он достигает 50 %.

Наиболее дешевым, достаточно эффективным и доступным армирующим материалом является высокопрочная стальная проволока. Например, армирование технического алюминия проволокой из стали ВНС9 диаметром 0,15 мм ( $\sigma_a = 3600$  МПа) увеличивает его  $\sigma_a$  в 10-12 раз при содержании волокна 25 % объема, после чего  $\sigma_a$  достигает соответственно 1000-1200 и 1450 МПа. Если для армирования использовать проволоку меньшего диаметра, т. е. большей прочности ( $\sigma_a = 4200$  МПа)  $\sigma_a$  КМ увеличится до 1750 МПа. Таким образом, алюминий, армированный стальной проволокой (iS-41) % объема), по основным свойствам значительно превосходит даже высокопрочные алюминиевые сплавы и выходит на уровень соответствующих свойств титановых сплавов. При этом плотность композиций находится в пределах 3,9...4,8 т/м<sup>3</sup>.

Упрочнение алюминия и его сплавов более дорогими волокнами В, С,  $Al_2O_3$  повышает стоимость КМ, но при этом улучшаются некоторые его свойства. Например, при армировании борными волокнами модуль упругости увеличивается в 3-4 раза, углеводородные волокна способствуют снижению плотности. На рис. 5.1 показано влияние объемного содержания волокон бора  $V_a$  на прочность и жесткость композиции «алюминий-бор»

$V_a$ , % (объемн.)	0	10	20	30	40	50
$\sigma_a$ , МПа	70-140	300-380	500-650	700-900	900-1140	1100-1400
$E$ , ГПа	70	105	135	180	190-200	200-257

Бор мало разупрочняется с повышением температуры, поэтому КМ, армированные борными волокнами, сохраняют высокую прочность до 400-500 °С. Промышленное применение нашел материал ВКА-1, содержащий 50 % объема непрерывных высокопрочных и высокомодульных волокон бора. По модулю упругости и временному сопротивлению в интервале 20-500 °С он превосходит все стандартные алюминиевые сплавы, в том числе

## 5. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

**Цель работы:** изучение структуры и механических свойств КМ на металлической основе.

**Задание:** изучить воздействие упрочнителей на механические свойства КМ с различной металлической основой.

### 5.1. Общие сведения

Преимуществом КМ на металлической основе являются более высокие значения характеристик, зависящих от свойств матрицы. Это, прежде всего временное сопротивление и модуль упругости при растяжении в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон, прочность при сжатии и изгибе, пластичность, вязкость разрушения. Кроме того, КМ с металлической матрицей сохраняют свои прочностные характеристики до более высоких температур, чем многие материалы с неметаллической основой. Они более влагостойки, негорючи, обладают электрической проводимостью.

Наиболее перспективными материалами для матриц металлических КМ являются металлы, обладающие небольшой плотностью (Al, Mg, Ti), и сплавы на их основе, а также никель - широко применяемый в настоящее время в качестве основного компонента жаропрочных сплавов. Свойства некоторых КМ на металлической основе приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Механические свойства одноосно-армированных КМ с металлической матрицей									
КМ	Матрица	Наполнитель		$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	км	Я.ГПа	Elipg)- 10 <sup>3</sup> , км	$\sigma_m$ МПа (20°C)	$\sigma_{\perp}$ МПа (на базе 10 <sup>7</sup> циклов)
		Материал	Количество, % (об.)						
ВКА-1	Алюминий	Борное волокно	50	2,65	45	240	9	1200	600
ВКУ-1	»	Углеродное волокно	30-40	2,2-2,3	42	270	12	900-1000	200
КАС-1	»	Стальная проволока	40	4,8	33	120	2	1600	350
ВКМ-3	Магний	Борное волокно	45	2,2	57	200	9	1250	—

### 5.2. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей

Нашедшие промышленное применение КМ с алюминиевой матрицей в основном армируют стальной проволокой, борным и углеродными волокнами. В качестве матрицы используют как технический алюминий (например, АД1), так и сплавы (АМгб, В95, Д20 и др.).

Свойства волокнистых КМ в большей степени зависят от схемы армирования (рис. 3.2). Ввиду значительного различия в свойствах волокон и матрицы при одноосном армировании физическим и механическим свойствам КМ присуща анизотропия. При растяжении временное сопротивление и модуль упругости КМ достигают наибольших значений в направлении расположения волокон, наименьших - в поперечном направлении. Например КМ с матрицей из технического АД1, упрочненный волокнами бора, в направлении волокон имеет  $\sigma_b = 1000...1200$  МПа, а в поперечном направлении - всего 60...90 МПа. Анизотропия свойств не наблюдается при двухосном армировании с взаимно перпендикулярным расположением упрочняющих волокон (рис. 3.2). Однако по сравнению с одноосным армированием прочность вдоль оси волокон уменьшается почти в 3 раза - с 1000 до 350 МПа (рис. 3.3). Остаются низкими характеристики при сжатии и сдвиге. При растяжении материала вдоль волокон нагрузки в основном воспринимают высокопрочные волокна, а матрица служит средой для передачи усилий. Нагрузки, воспринимаемые волокнами ( $P_b$ ) и матрицей ( $P_M$ ) выражаются через возникающие в них напряжения  $\sigma_b$  и  $\sigma_M$  следующим образом

$$P_b / P_M = \sigma_b V_b / [\sigma_M (1 - V_b)],$$

где  $V_b$  - объем волокна.

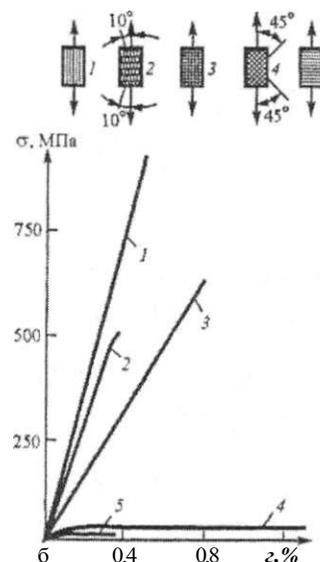


Рис. 3.2. Схемы армирования (1-5) КМ и их влияние на напряжения при растяжении эпоксидных углепластиков

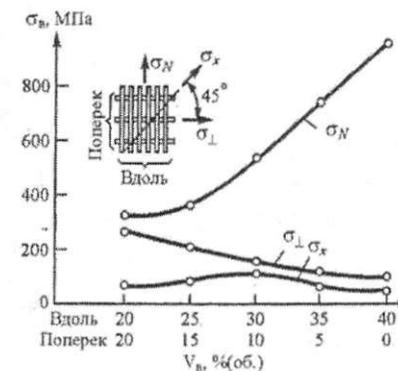


Рис. 3.3. Зависимость временного сопротивления КМ ВКА-1 от содержания и ориентации волокон

Согласно закону Гука, напряжения можно выразить через модули упругости. Тогда

$$P_s / P_M = E_s \varepsilon_s V_s / [E_M \varepsilon_M (1 - V_s)].$$

При условии прочного (без проскальзывания) соединения волокон с матрицей в момент приложения нагрузки в них возникает одинаковая деформация, т. е.  $\varepsilon_s = \varepsilon_M$ . Следовательно

$$P_s / P_M = E_s V_s / [E_M (1 - V_s)],$$

т. е. чем выше модуль упругости волокон  $E_s$  и больше их объем, тем в большей степени они воспринимают приложенную нагрузку.

Объемная доля упрочнителя колеблется в широких пределах - от нескольких единиц до 80-90 %. При этом КМ с ориентированными непрерывными волокнами содержат их, как правило, в количестве 60-70 %. Содержание хаотически расположенных дискретных волокон и нитевидных кристаллов ограничивается 20-30 %, поскольку различие в их длине и диаметре создает технологические трудности в получении плотноупакованных материалов.

Модуль упругости КМ сравнительно достоверно подсчитывают, исходя из свойств и объемного содержания волокон и матрицы

$$E_{KM} = E_s V_s + E_M (1 - V_s)$$

Например, модуль упругости упрочненных материалов с алюминиевой матрицей ( $E = 70$  МПа), упрочненного 50 % (об) волокон бора ( $E = 420$  МПа), равен  $70 \cdot 0,5 + 420 \cdot 0,5 = 245$  ГПа, что хорошо согласуется с модулем упругости реального КМ ВКА-1 ( $E = 240$  ГПа, табл. 3.1).

Таблица 3.1

Механические свойства одноосно-армированных КМ с металлической матрицей

КМ	Матрица	Наполнитель		$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\sigma_n(\rho g)$ , км	$E$ , ГПа	$E/(\rho g) \cdot 10^3$ , км	$\sigma_s$ , МПа (20°C)	$\sigma_{-1}$ , МПа (на базе $10^7$ циклов)
		Материал	Количество, %(об.)						
ВКА-1	Алюминий	Борное волокно	50	2,65	45	240	9	1200	600
ВКУ-1	»	Углеродное волокно	30-40	2,2-2,3	42	270	12	900-1000	200
КАС-1	»	Стальная проволока	40	4,8	33	120	2	1600	350
ВКМ-3	Магний	Борное волокно	45	2,2	57	200	9	1250	—

Временное сопротивление КМ изменяется в зависимости от объемного содержания наполнителя также по закону аддитивности (рис. 3.4). Исключение составляют материалы с очень малым (< 5 % (об)) или очень большим (> 80 % (об)) содержанием волокна. Временное сопротивление КМ подсчитывают по формуле

$$\sigma_{s, KM} = \sigma_{s, s} V_s + \sigma_{s, M} (1 - V_s),$$

где  $\sigma_{s, s}$  и  $\sigma_{s, M}$  – соответственно временное сопротивление волокна и матрицы.

## Вопросы

1. Что представляют собой упрочнители и из какого материала их изготавливают?
2. Каким образом получают КМ с алюминиевой матрицей?
3. Для чего наносят покрытия на упрочнители?
4. Что можете сказать о жаропрочных упрочнителях?
5. Как получают бериллиевую проволоку?
6. Какой структурой и свойствами обладают борные волокна?
7. Каковы прочность и свойства углеродных волокон, как их получают?
8. Объясните, что такое «микрофибрилл»?
9. Опишите достоинства и недостатки углеродных волокон?
10. Что знаете о керамических волокнах?
11. Что представляют собой «усы»?
12. Опишите свойства и прочность стекловолкна?

## Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.

3-100 мкм, длиной 20 км и более и штателное - диаметром 0,5-20 мкм, длиной 0,01-0,5 м. Штателные волокна применяют для изготовления конструкционных материалов КМ с однородными свойствами, а также теплоизоляционных КМ; непрерывные - в основном для высокопрочных КМ на неметаллической основе. Выпускаемые в настоящее время непрерывные профильные волокна с квадратной, прямоугольной, шестиугольной формой поперечного сечения повышают прочность и жесткость КМ благодаря более плотной упаковке в материале.

Таблица 4.1

Свойства волокон и нитевидных монокристаллов

Материал	Температура плавления или размягчения, °С	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_w(\rho g)$ , км	$E$ , ГПа	Средний диаметр волокна, мкм
<b>Волокна</b>						
Углерод или графит	3650	1,6–2	1687–3374	110–210	216–677	5,8–7,6
Бор на вольфрамовой проволоке	2300	2,63	2707–4060	110–160	373–402	102–142
Борсик на вольфрамовой проволоке	2300	2,77	2707–4060	100–160	373–412	104
Карбид кремния на вольфрамовой проволоке	2200	3,35–3,46	2236–3893	67–120	492–471	102
Оксид алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3,14	2030	66	169	3
Стекло	–	2,5	4482	183	89,3	–
Бериллий	1284	1,85	981–1100	38–54	295	125–130
Вольфрам	3410	19,3	1657–3207	9–17	420	51–1270
Сталь 18Х15Н5АМЗ	–	7,8	3500–3800	48	200	150
<b>Нитевидные монокристаллы</b>						
Сапфир, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040*	3,96	4021–23634	110–620	402–1010	0,51–11
Карбид кремния	2690*	3,22	13533–40600	440–1320	441–1010	0,51–11

Температура разложения.

Применение полых профильных волокон уменьшает пластичность, повышает жесткость при изгибе и прочность при сжатии КМ, улучшает их изоляционные свойства.

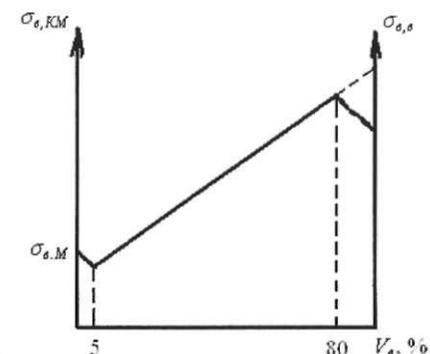


Рис. 3.4. Схема изменения прочности волоконного материала в зависимости от содержания упрочнителя

Малые значения прочности и жесткости КМ в направлении, перпендикулярном расположению волокон, при растяжении объясняются тем, что в этом случае, так же, как и при сжатии и сдвиге, они определяются свойствами матрицы. Большую роль играет матрица в сопротивлении КМ усталостному разрушению, которое начинается с матрицы. Гетерогенная структура поверхности раздела между волокном и матрицей затрудняют распространения трещины в направлении, перпендикулярном оси волокон. В связи с этим КМ характеризуются высокими значениями предела выносливости. Так, по пределу выносливости КМ на алюминиевой основе превосходит лучшие алюминиевые сплавы в 3-4 раза.

При изготовлении деталей из КМ волокна ориентируют так, чтобы с максимальной выгодой использовать их свойства с учетом действующих в конструкции нагрузок. Прочность КМ в большей степени зависит от прочности сцепления волокон с матрицей. Между матрицей и наполнителем в КМ возможны различные типы связи:

1. Механическая связь, возникающая благодаря зацеплению неровностей поверхностей матрицы и наполнителя, а также действию трения между ними. КМ с механическим типом связи (например, Cu-W) имеют низкую прочность при поперечном растяжении и продольном сжатии;
2. Связь, обеспечиваемая силами поверхностного натяжения при гшопитки волокон жидкой матрицей вследствие смачивания и небольшого растворения компонентов (например, Mg-B до 400 °С);
3. Реакционная связь, обусловленная химическим взаимодействием компонентов (Ti и B, Ti и SiC) на границе раздела, в результате чего образуются новые химические соединения (TiB<sub>2</sub>, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>);
4. Обменно-реакционная связь, возникающая при протекании двух и более стадийных химических реакций. Например, алюминий из твердого раствора матрицы титанового сплава образует с борным волокном AlB<sub>2</sub>, который затем вступает в реакцию с титаном, образуя TiB<sub>2</sub> и твердый раствор алюминия;

5. Оксидная связь, возникающая на границе раздела металлической матрицы и оксидного наполнителя (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) благодаря образованию сложных оксидов типа шпинели и др.;

6. Смешанная связь, реализуемая при разрушении оксидных пленок и возникновении химического и диффузионного взаимодействий компонентов (Al-B, Al-сталь).

Для качественного соединения волокон с матрицей необходимо прежде всего обеспечить хороший контакт (без загрязнений, газовых и других включений) по всей поверхности соединений. КМ относятся в основном к термодинамически неравновесным системам, что является главной причиной диффузионных процессов и химических реакций, происходящих на границе раздела между волокном и матрицей. Эти процессы протекают при использовании КМ и при их использовании. Некоторое взаимодействие между компонентами необходимо для обеспечения прочной связи между ними, передачи напряжений.

Для металлических КМ прочная связь между волокном и матрицей осуществляется благодаря их взаимодействию и образованию очень тонкого слоя (1-2 мкм) интерметаллидных фаз. Если между волокнами и матрицей нет взаимодействия, то на волокна наносят специальные покрытия для его обеспечения, но прослойки образующейся при этой фазе, должны быть очень тонкими.

Связь между компонентами в КМ на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии. Плохой адгезией к матрице обладают высокопрочные борные, углеродные, керамические волокна. Улучшение сцепления достигается травлением, поверхностной обработкой волокон, называемой вискеризацией. Вискеризация - это выращивание монокристаллов карбида кремния на поверхности углеродных, борных и других волокон перпендикулярно их длине. Полученные таким образом «мохнатые» волокна бора называют «борсик». Вискеризация способствует повышению сдвиговых характеристик, модуля упругости и прочности при сжатии без снижения свойств вдоль оси волокна. Так, увеличение объемного содержания нитевидных кристаллов до 4-8 % повышает сдвиговую прочность в 1,5-2 раза, модуль упругости и прочность при сжатии на 40-50 %.

На поверхности соединения компонентов не должно происходить химических реакций, приводящих к повреждению волокон, ухудшению их свойств и свойств КМ. При сильном взаимодействии компонентов временное сопротивление волокон и КМ в целом значительно снижается. Например, временное сопротивление волокон карбида кремния в КМ с титановой матрицей в результате такого взаимодействия снизилось с 320 до 210 МПа, что вызвало снижение временного сопротивления КМ на 30 %. Для уменьшения взаимодействия применяют легирование как матриц, так и волокон, защитные покрытия волокон, низкотемпературные и высокоскоростные способы изготовления КМ.

Кроме того, прочность сцепления между компонентами зависит от механической совместимости, на которую влияет разница в пластических

Структура и свойства углеродных волокон в большей степени зависят также от температуры термической обработки синтетических волокон (рис 4.3). Кроме того, прочность углеродных волокон сильно зависит от наличия таких дефектов, как пустоты, трещины. Она значительно снижается, если размеры дефектов превышают 0,05 мкм. При нагреве выше 450 °С на воздухе углеродные волокна окисляются, в восстановительной и нейтральной среде сохраняют свои механические свойства до 2200 °С.

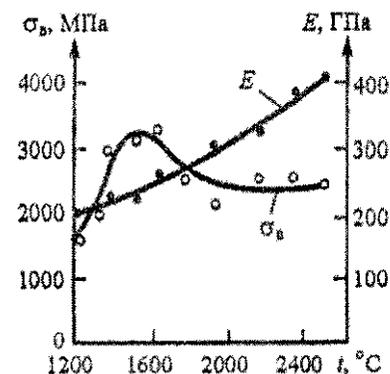


Рис. 4.3. Влияние температуры графитизации на свойства углеродного волокна

К другим достоинствам углеродных волокон относятся высокая теплопроводность, электрическая проводимость, коррозионная стойкость, стойкость к тепловым ударам, низкие коэффициенты трения и линейного расширения; к недостаткам относятся плохая смачиваемость расплавленными материалами, используемыми в качестве матриц. Для улучшения смачиваемости и уменьшения химического взаимодействия с матрицей на углеродные волокна наносят покрытия. Хорошие результаты в контакте с алюминиевой матрицей показывают покрытия из боридов титана и циркония.

Керамические волокна оксидов, нитридов, карбидов характеризуются высокими твердостью, прочностью, модулем упругости, относительно небольшой плотностью и высокой термической стабильностью.

Из табл. 4.1 видно, что особо высокие прочность и жесткость присущи нитевидным монокристаллам («усам»). Высокая прочность объясняется совершенством их структуры, для которой характерна очень малая плотность дислокаций. Доказано, что скручивание усов в процессе образования монокристаллов  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  вызвано наличием в них единственной винтовой дислокации, расположенной вдоль оси роста кристаллов.

Стекловолокно характеризуется сочетанием высокой прочности ( $\sigma_v = 3000...5000$  МПа), теплостойкости, диэлектрических свойств, низкой теплопроводности, высокой коррозионной стойкости. Стекловолокно получают продавливанием стекломассы через специальные фильтры или вытягиванием из расплава. Изготавливаются два вида стекловолокон: непрерывное - диаметром

размеры фибрилл лежат в широких пределах. Каждое углеродное волокно состоит из тысяч фибрилл. Структура углеродного волокна, в частности, взаимное расположение фибрилл и степень их ориентации зависят от исходного сырья: состава макромолекул, степени вытяжки волокон, технологии их получения и др. В связи с этим углеродные волокна, полученные из разных синтетических волокон, имеют различные свойства и даже различный характер соотношения между прочностью и жесткостью (рис. 4.2).

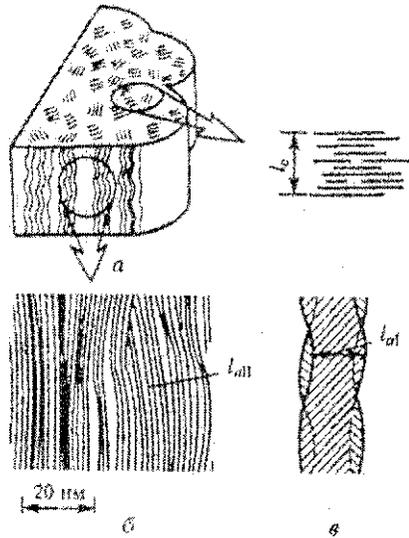


Рис. 4.1. Строение углеродных волокон (схема):  
 а — общий вид; б — продольное сечение фибриллы; в — поперечное сечение микрофибриллы;  
 $l_a$  и  $l_c$  — поперечные размеры микрофибрилл

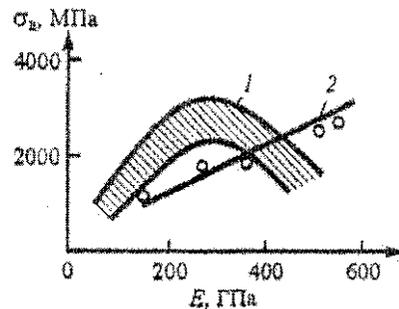


Рис. 4.2. Связь между временным сопротивлением и модулем упругости углеродных волокон при различном исходном сырье:  
 1 - ПАН; 2 - вискоза

свойствах, в коэффициентах Пуассона и линейного расширения, модулей упругости. Механическая несовместимость приводит к возникновению остаточных напряжений на границе раздела компонентов, которые при достижении определенного значения вызывают нарушение связи между компонентами.

### Вопросы

1. Какими волокнами армируют КМ?
2. Какие напряжения возникают в матрице в месте контакта с волокном?
3. Как изменяется степень упрочнения при изменении отношения длины к диаметру?
4. Из каких материалов изготавливают матрицы для волоконных КМ?
5. Как понимаете слово «анизотропия»? Приведите пример.
6. Как влияет объемное содержание волокон на модуль упругости  $E$ , волокон КМ на приложенную нагрузку?
7. Какова роль матрицы КМ при усталостных нагрузках?
8. Чем вызваны высокие значения предела выносливости КМ?
9. Что такое «вискеризация» и какова ее роль?
10. Какие бывают связи между волокном и матрицей?
11. Возможны ли химические реакции на поверхности волокон?

### Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.
2. Изучить изложенный материал.
3. Ответить на вопросы в письменном виде в форме отчета по лабораторной работе.
4. Отчет представляет собой ответы на вопросы, подкрепленные рисунками и графиками.
5. Отчет готовится отдельно каждым студентом и является допуском для защиты. Успешная защита отчета является основанием для зачета по каждой лабораторной работе.

#### 4. УПРОЧНИТЕЛИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Цель работы: изучение различных упрочнителей.

Задание: изучить виды и свойства упрочнителей. Их возможные композиции с различными матрицами.

Из металлических упрочнителей широко применяют стальную проволоку, которая является наиболее дешевым и технологичным упрочнителем. В настоящее время в основном используют проволоку из коррозионноустойчивых сталей аустенитного, аустенитно-мартенситного и мартенситного классов. Высокая степень пластической деформации при получении проволоки обуславливает большую пластичность структурных дефектов и высокие прочностные характеристики. Например, проволока из стали 18x15H5AM3 диаметром 0,16-0,3 мм. имеет  $\sigma_n = 3500...4000$  МПа. Высокая температура рекристаллизации обеспечивает стальной проволоке сохранение прочности при высокой температуре (до 500 °С), особенно из сталей аустенитного класса.

При изготовлении КМ с алюминиевой матрицей, армированной стальной проволокой, температура не должна превышать 550 °С во избежание активного взаимодействия между компонентами. КМ получают сваркой, взрывом, прокаткой в вакууме, диффузионным спеканием. Для надежного сцепления компонентов при использовании твердофазных методов необходимо обновление контактных поверхностей, разрушение оксидных пленок.

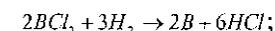
Более высокой жаропрочностью обладает проволока из тугоплавких металлов (Mo, W, Ta). Высокие прочностные свойства такой проволоки сохраняются до 1200-1500 °С и поэтому ее применяют для армирования жаропрочных матриц.

Для повышения длительной прочности на поверхность проволоки наносят методом напыления тонкие (4-12 мкм) барьерные покрытия, например, из карбидов титана и гафния, оксидов алюминия и гафния. Это увеличивает рабочие температуры и срок службы жаропрочных сплавов. Недостатком напылителя является их высокая плотность.

Малой плотностью и большой удельной прочностью обладает проволока из бериллия. Механические свойства проволоки высоко зависят от качества ее поверхности. Бериллиевую проволоку получают выдавливанием из литой или порошковой заготовки, заключенной в оболочку. Лучшим материалом оболочки является никель. После волочения оболочку с проволоки удаляют и для улучшения поверхности проволоку подвергают электрохимическому полированию. При волочении проволоки, предназначенной для получения КМ в качестве оболочки используют материал матрицы, и в этом случае отпадают операции правки и полирования. Ценным свойством сильнодеформируемой бериллиевой проволоки является высокая температура рекристаллизации (700 °С). Бериллиевую проволоку целесообразно применять для армирования

матриц, обладающих малой плотностью, т. е. на алюминиевой, титановой или магниевой основах.

Для армирования металлических и полимерных матриц широко используют борные волокна. Они характеризуются высокой прочностью, твердостью, малой склонностью к разрушению при повышении температуры. Борные волокна получают разложением хлорида и бромида бора в среде водорода по реакции



с последующим осаждением бора из газовой среды на горячей вольфрамовой нити ( $d = 12$  мкм). В результате взаимодействия бора с вольфрамом сердцевина борных волокон состоит из боридов вольфрама различного состава: WB, W<sub>2</sub>B<sub>3</sub>, WB<sub>2</sub>. При продолжительном нагреве сохраняется в основном WB<sub>2</sub>. Волокна бора имеют ромбическую кристаллическую решетку и диаметр  $d = 70...200$  мкм.

Прочность сердцевин значительно ниже прочности волокна в целом. В сердцевине возникают напряжения растяжения. Это приводит к появлению остаточных напряжений и возникновению радиальных трещин. При небольшой плотности волокна бора обладают высокой прочностью и жесткостью. Высокая прочность борных волокон объясняется мелкокристаллической структурой. Большое влияние на прочность оказывает и структура их поверхности. Поверхность имеет ячеистое строение, напоминающее по внешнему виду початок кукурузы (см. рис. 1.3). Наличие крупных зерен на поверхности, а также включений, трещин, пустот снижают прочность борных волокон. При температуре выше 400 °С борные волокна окисляются, а выше 500 °С вступают в химическое взаимодействие с алюминиевой матрицей. Для повышения жаростойкости и предохранения от взаимодействия с матрицей на борные волокна наносят покрытия из карбида кремния, карбида и нитрида бора толщиной 3-5 мкм.

В настоящее время наряду с чисто борными волокнами выпускают волокна бора, оплетенные стекловолокном. Такие комбинированные волокна обладают более высокой устойчивостью. Основным недостатком борных волокон - высокая стоимость, которую можно снизить путем увеличения диаметра, а также заменой вольфрамовой основы на углеродную.

Высокими прочностью, удельной прочностью и термической стабильностью механических свойств отличаются высокомолекулярные углеродные волокна. Их получают путем высокотемпературной термической обработки в инертной среде из синтетических и органических волокон. В зависимости от вида исходного продукта углеродные волокна могут быть в виде нитей, жгута, тканых материалов, лент, войлока. Наиболее широко для производства углеродных волокон используют вискозу, полиакрилатрия (ПАН).

При нагреве синтетическое волокно разлагается с образованием лентообразных слоев углерода с гексагональной структурой, называемых микрофибриллами (рис. 4.1, а-в). Группы одинаково ориентированных микрофибрилл, разделенных узкими порами, образуют фибриллы. Поперечные