

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра машиностроения и транспорта**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ Е.И. Луковникова

« \_\_\_\_\_ » декабря 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
ТЕХНОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Б1.В.ДВ.05.01**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ  
Технология машиностроения**

Программа прикладного бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

<b>СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ</b>		<b>Стр.</b>
<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>		3
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>		3
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....		4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....		4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....		5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....		6
4.3 Лабораторные работы.....		42
4.4 Практические занятия.....		42
4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....		42
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		43
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....</b>		44
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		44
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		45
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		45
9.1 Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных и практических работ.....		46
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата .....		52
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>		53
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>		53
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>		54
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>		58
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>		59
<b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>		60

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является – формирование у обучающихся фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов и покрытий для разработки эффективных технологических процессов производства полуфабрикатов, заготовок и изделий из порошковых и композиционных материалов для машиностроения.

Задачами изучения дисциплины является:

- теоретическое и практическое освоение закономерной связи между строением, свойствами и факторами технологических процессов производства изделий из композиционных материалов;
- изучение основных технологических процессов получения заготовок и деталей из композитов различного назначения и их проектирования.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
ПК-16	способность осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств, участвовать в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий, выполнять мероприятия по выбору и эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств диагностики, автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов для их реализации.	<b>знать:</b> – технологии, системы и средства производства композиционных материалов; <b>уметь:</b> – проектировать свойства композиционных материалов для их эффективного использования; <b>владеть:</b> – навыками определения свойств и структуры композиционных материалов.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.05.01 «Технология композиционных материалов» является дисциплиной по выбору вариативной части.

Дисциплина «Технология композиционных материалов» базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как:

- «Материаловедение».
- «Процессы и операции формообразования»;
- «Технологические процессы в машиностроении»;

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, «Технология композиционных материалов» представляет основу для изучения дисциплин:

- «Физические методы исследования металлов и сплавов»;
- «Микроконтактные процессы при резании металлов»;
- «Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки».

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
<b>Очная</b>	3	6	180	85	34	34	17	68	-	экзамен
<b>Заочная</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Заочная (ускоренное обучение)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Очно-заочная</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			6
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	<b>85</b>	<b>34</b>	<b>85</b>
Лекции (Лк)	34	34	34
Лабораторные работы (ЛР)	34	-	34
Практические занятия (ПЗ)	17	-	17
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	<b>68</b>	<b>-</b>	<b>68</b>
Подготовка к лабораторным работам	34	-	34
Подготовка к практическим занятиям	17	-	17
Подготовка к экзамену в течение семестра	17	-	17
<b>III. Промежуточная аттестация экзамен</b>	<b>27</b>	<b>-</b>	<b>27</b>
Общая трудоемкость дисциплины ..... час.	<b>180</b>	<b>-</b>	<b>180</b>
зач. ед.	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>5</b>

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоёмкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоёмкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
<b>1.</b>	<b>Классификация композиционных материалов</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	-	-	<b>1</b>
1.1.	Понятие, признаки и классификация КМ	5	4	-	-	1
<b>2.</b>	<b>Композиционные материалы с нульмерными наполнителями</b>	<b>65</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>7</b>	<b>26</b>
2.1.	Химические, физические и технологические свойства порошков	6	2	2	-	2
2.2.	Технологические методы получения порошков	10	2	6	-	4
2.3.	Твердые сплавы	14	2	-	5	6
2.4.	Керамические КМ	2	1	-	-	1
2.5.	Сверхтвердые материалы	2	1	-	-	1
2.6.	Прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов	16	2	6	2	8
2.7.	Технология спекания порошковых материалов	10	2	6	-	4
<b>3.</b>	<b>Композиционные материалы с одномерными наполнителями</b>	<b>40</b>	<b>10</b>	-	<b>10</b>	<b>20</b>
3.1.	Упрочнение волокнами	3	2	-	-	1
3.2.	Армирующие вещества и их свойства	3	2	-	-	1
3.3.	Методы получения металлических КМ, армированных волокнами	4	2	-	-	2
3.4.	Свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей	11	2	-	5	4
3.5.	Методы получения полимерных одномерноармированных КМ	19	2	-	5	12
<b>4.</b>	<b>Двумерные композиционные материалы</b>	<b>35</b>	<b>4</b>	<b>14</b>	-	<b>17</b>
4.1.	Ткани, применяемые для армирования пластиков	2	1	-	-	1
4.2.	Свойства стеклянных волокон для производства тканей	2	1	-	-	1
4.3.	Производство тканей из стеклянных волокон	29	1	14	-	14
4.4.	Маркировка стеклотканей	2	1	-	-	1
<b>5.</b>	<b>Эвтектические композиционные материалы</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	-	-	<b>2</b>
5.1.	Эвтектические КМ на основе алюминия	2	1	-	-	1
5.2.	Эвтектические КМ на основе никеля	2	1	-	-	1
<b>6.</b>	<b>Композиционные наноматериалы</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	-	-	<b>2</b>
6.1.	Классификация наноматериалов	2	1	-	-	1
6.2.	Основные области применения наноматериалов	2	1	-	-	1
<b>ИТОГО</b>		<b>153</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>17</b>	<b>68</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### Раздел 1. Классификация композиционных материалов

#### Тема 1.1. Понятие, признаки и классификация КМ (Дискуссия – 4 ч.)

Композиционными называют гетерофазные системы, состоящие из двух компонентов и более, объединенных различными способами в монолит и сохраняющих при этом индивидуальные особенности.

Для композиционных материалов характерна следующая совокупность признаков:

- материалы состоят из разных по химическому составу компонентов, обязательно имеющих границу раздела;
- состав и форма компонентов определяются заранее;
- материал обладает свойствами, отличными от свойств компонентов, взятых в отдельности;
- компоненты находятся в количестве, необходимом для обеспечения заданных свойств;
- материал является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе.

Композиционный материал состоит из матрицы и армирующего (упрочняющего) компонента, или арматуры.

Матрица – компонент, обладающий непрерывностью по всему объему композиционного материала, а армирующий компонент, наоборот, – прерывный, разделенный.

В качестве матриц в композиционных материалах используются:

- металлы и их сплавы;
- органические и неорганические полимеры;
- керамические материалы (оксиды, карбиды);
- углеродные и другие материалы.

В качестве армирующих компонентов применяются:

- тонкодисперсные порошки;
- волокнистые материалы;
- слоистые материалы.

Армирующие компоненты равномерно распределены в матрице и, как правило, превосходят ее по таким показателям, как прочность, твердость, модуль упругости.

Вместо понятия «армирующий компонент» часто используется термин «наполнитель». Данные понятия являются тождественными, однако наполнитель в матрице влияет не только на ее прочность, но и на такие характеристики композиционного материала, как цвет, плотность, пористость и др.

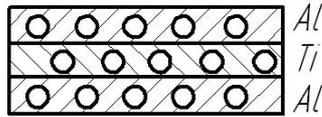
Композиционные материалы (КМ) можно классифицировать по нескольким основаниям:

1. В зависимости от размеров армирующего компонента КМ могут быть:

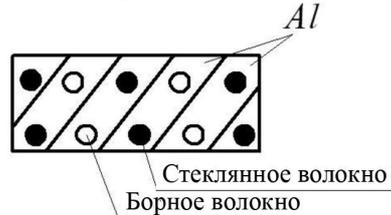
- с нульмерными армирующими компонентами, частицы которых имеют одинаковые размеры в трех измерениях (например, порошки);
- с одномерными армирующими компонентами, один из размеров которых значительно превосходит два других (проволока, волокна и т.д.);
- с двумерными армирующими компонентами, два размера которых значительно превосходят третий (листы, ленты, ткани и т.д.).

2. В зависимости от количества материалов матрицы, ее арматуры и их химического состава КМ бывают:

- полиматричные



- полиарматурные

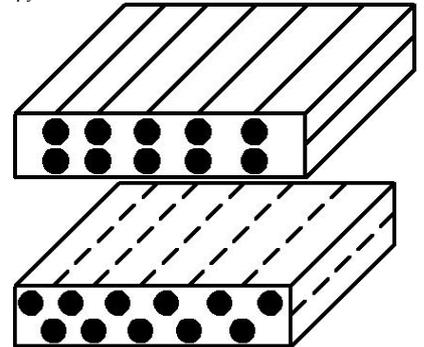


3. По природе компонентов КМ делят на четыре группы:

- содержащие компонент с полимерной матрицей, например, эпоксидной, полиэфирной, фенольной и др. (ПКМ);
- содержащие компонент из металлов и сплавов, т.е. с металлической матрицей (МКМ);
- содержащие компонент из неметаллических элементов, например, из углерода различных модификаций (УУКМ);
- содержащие компонент из неорганических соединений: оксидов, карбидов, нитридов, т.е. с керамической матрицей (ККМ).

4. По схеме расположения наполнителей (конструктивный признак) выделяют несколько групп КМ:

– одномерноармированные с линейным расположением наполнителя в виде непрерывных волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;



– одномерноармированные с такой же схемой расположения наполнителя, как в первом случае, но с короткими армирующими элементами;

– двумерноармированные с линейным расположением наполнителя в виде непрерывных волокон;

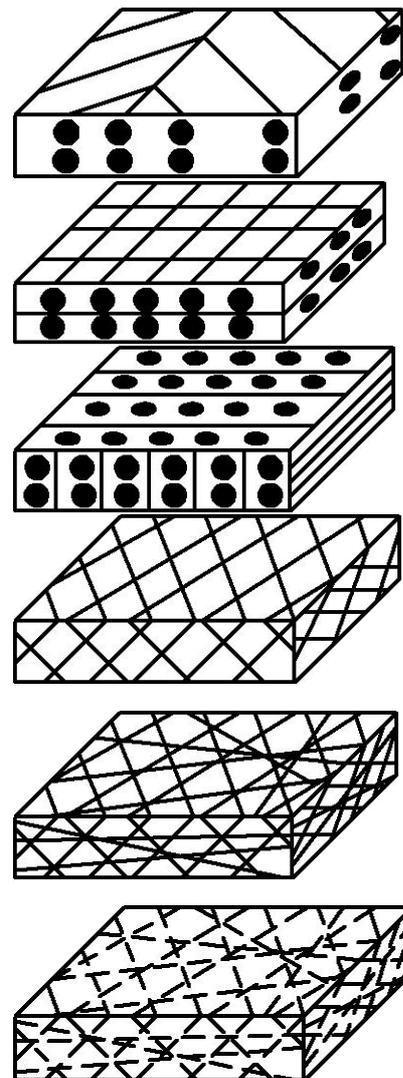
– двумерноармированные с такой же схемой расположения наполнителя, как и в третьем случае, но с перпендикулярным направлением волокон (например, ткани);

– с пространственной схемой расположения наполнителя с перпендикулярно расположенными волокнами трех семейств;

– с пространственной схемой расположения наполнителя с перпендикулярным расположением волокон  $n$ -семейств;

– с хаотично армированной схемой расположения наполнителя с непрерывными волокнами, нитями;

– с хаотично армированной схемой расположения наполнителя с короткими волокнами.



5. В зависимости от назначения КМ классифицируются следующим образом:

- антифрикционные, т.е. материалы с малым коэффициентом трения;
  - фрикционные – с большим коэффициентом трения;
  - конструкционные самого различного применения;
  - высокопористые;
  - электроизоляционные;
  - магнитные;
  - металлокерамические, используемые для изготовления режущих инструментов.
- Композиционные материалы обладают рядом преимуществ и недостатков.

*Преимущества КМ:*

- возможность создания материалов с заранее заданными свойствами;
- ярко выраженная анизотропия свойств КМ, т.е. различие свойств в разных направлениях в зависимости от ориентации наполнителя;
- регулируемая анизотропия свойств дает возможность направлять КМ под определенную конструкцию (деталь) в соответствии с нагрузками и эксплуатационными требованиями, а также позволяет снижать металлоемкость изделий;
- свойства КМ зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связей между ними, что позволяет увеличить стойкость к циклическим нагрузкам;
- по сравнению с современными конструкционными материалами КМ обладают более высокой удельной жесткостью и удельной прочностью (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Удельная жесткость и удельная прочность некоторых материалов

Материал	Удельная жесткость, км	Удельная прочность, км
Алюминий	2700...3300	10...20
КМ стали и титана	2600...3300	25...35
Стеклопластики	3000...3800	50...80
Бериллий	22000...24000	45...50
$Al_2O_3-Ni$	4000...5000	10...80
$Al_2O_3-Al$	7500...10000	75...190
$Be-Al$	14000...16000	35...50
$B-Ni$	7500...9500	10...35
$B_4C-Al$	12000...16000	70...300
$B-Al$	15000...19000	45...90
Боропластики	19000...21000	52...110
Углепластики	30000...42000	75...150

*Недостатки КМ:*

- свойства конструкций из КМ во многом зависят от точности технологического процесса: чем больше параметров технологического процесса, тем сложнее его выполнять;
- затруднительный расчет многослойных систем;
- низкая прочность и жесткость при сдвиге;
- нестабильность свойств КМ при некоторых условиях эксплуатации (повышенные температура и давление, высокая влажность и др.) [16, 17].

## **Раздел 2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями**

### **Тема 2.1. Химические, физические и технологические свойства порошков (дискуссия – 2 ч.)**

Различают химические, физические и технологические свойства порошковых материалов.

Химический состав порошка определяется содержанием основных компонентов, различных примесей и газов.

Физические свойства характеризуются формой и размерами частиц, удельной поверхностью, пикнометрической плотностью.

К технологическим свойствам относятся насыпная масса (масса единицы объема сыпучего тела), текучесть порошка и его прессуемость.

#### ***Химические свойства порошков***

Химический состав порошков определяют при помощи химических, спектральных и других методов химического и физико-химического анализа.

Согласно ГОСТу и ТУ порошки должны содержать 98...99 % основного компонента. Примеси в порошках могут быть в виде твердых растворов или химических соединений, входящих в структуру металла, а механические загрязнения – в виде окислов и частиц от дробильных и размольных агрегатов, износа рабочих механизмов этого оборудования.

Все порошки содержат значительное количество газов. Например, в одном килограмме электролитического порошка железа может содержаться 8...10 л газа. Выделение газа при спекании может приводить к короблению или разрушению деталей.

Некоторые материалы обладают таким химическим свойством, как **пирофорность**, т.е. способностью к самовозгоранию при соприкосновении с кислородом воздуха.

Пирофорность зависит от химической природы материала, степени дисперсности и формы его частиц, состояния их поверхности. Например, порошки меди, свинца, вольфрама не обладают пирофорностью, а мельчайшие порошки железа и кобальта легко возгораются при соприкосновении с кислородом воздуха.

**Токсичность** – другая химическая особенность некоторых порошков. Например, высокой токсичностью обладают порошки бериллия и никеля.

#### ***Физические свойства порошков***

**Размер частиц и распределение их по фракциям** являются важнейшими характеристиками порошков. От размера частиц зависит насыпная масса, удельное давление при прессовании, усадка прессовок при спекании и механические свойства готовых изделий.

В зависимости от размера частиц порошки классифицируются следующим образом:

- ультратонкие (с размером частиц менее 0,5 мкм);
- очень тонкие (0,5...10 мкм);
- тонкие (10...40 мкм);
- средней тонкости (40...150 мкм);
- крупные (грубые, 150...500 мкм).

Для определения процентного содержания в порошке частиц разной крупности применяют ситовой или микроскопический анализ.

Ситовой анализ заключается в просеве порошка через набор сит с квадратными ячейками разного размера. Сита устанавливают одно над другим в порядке уменьшения размеров ячейки. На верхнее сито насыпают навеску порошка и все сита встряхивают при помощи вибрационного механизма. По окончании отсева остаток на каждом сите и поддоне, которым заканчивается набор сит, взвешивают и выражают в процентах по отношению к общей массе пробы. Для обозначения фракций, задержавшихся между двумя соседними ситами, вводится специальная запись. Например, если верхнее сито имеет номер сетки 0125, под ним расположено сито с номером 0080, то фракция порошка, прошедшая через сито 0125 и оставшаяся на сите 0080, обозначается следующим образом: –0125+0080 (фракция минус 0125 плюс 0080) и записывается в виде дроби 125/80.

**Удельная поверхность частиц порошка** – это поверхность всех частиц порошка на единицу объема или массы. Величина удельной поверхности зависит от формы и размеров частиц и может достигать нескольких квадратных метров на 1 г порошка.

**Пикнометрическая плотность** – плотность частиц порошка, которая, как правило, меньше плотности материала, из которого он сделан. Это объясняется наличием внутренних пор и загрязнением в виде оксидов и других примесей.

#### ***Технологические свойства порошков***

Основными технологическими свойствами порошков являются насыпная масса, текучесть и прессуемость.

**Насыпная масса порошка** ( $\gamma_{\text{нас}}$ ) – масса единицы объема свободно насыпанного порошка.

**Насыпной объем порошка** ( $V_{\text{нас}}$ ) – характеристика, обратная насыпной массе:

$$V_{\text{нас}} = \frac{1}{\gamma_{\text{нас}}}$$

Насыпная масса порошка характеризует его прессуемость: чем больше насыпная масса, тем лучше прессуемость порошка, тем выше становится его пористость. Пористость  $\Pi$  выражается в процентах:

$$\Pi = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{нас}}} \cdot 100 \%$$

где  $V_{\text{пор}}$  – объем, занимаемый порами.

**Текучесть порошков** – скорость прохождения частиц порошка через отверстие заданного диаметра. Чем больше текучесть, тем быстрее происходит заполнение пресс-формы порошком, равномернее распределяется плотность по высоте заготовки при прессовании, больше его производительность. Текучесть зависит от плотности материала порошка, размеров и формы его частиц.

Коэффициент текучести можно определить по выражению:

$$K = \frac{t \cdot r^n}{p}$$

где  $t$  – время вытекания, с;  $r$  – радиус отверстия, мм;  $p$  – навеска порошка, г;  $n$  – коэффициент, равный 2,58 [16].

**Прессуемость** – способность порошков приобретать под действием внешних усилий форму и размеры, соответствующие внутренней поверхности пресс-формы.

Оценкой прессуемости служит минимальное давление прессования, которое необходимо для получения брикета, способного сохранять свою форму и размеры после извлечения его из пресс-формы.

Прессуемость зависит от формы и размера частиц, а также от комбинации их набора. Мелкозернистые порошки уплотняются плохо,

но прочность брикетов из них более высокая, чем из крупнозернистых порошков.

Порошки, состоящие из разных по величине частиц, обладают большей насыпной плотностью  $\gamma_{нас}$  и дают большую прочность.

Прессуемость также зависит от твердости частиц порошков. Чем они тверже, тем большее давление требуется для прессования. Поэтому порошки твердых металлов перед прессованием отжигают.

## Тема 2.2. Технологические методы получения порошков (дискуссия – 2 ч.)

Для получения порошков используются разные технологические методы: химические, физические и механические (табл. 2.1).

Порошки карбидов вольфрама, тантала, титана получают:

– сплавлением металла с углеродом в печах при температуре  $t = 2500 \dots 4000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

– науглероживанием порошков оксидов металлов по уравнению:

$$MeO + C \xrightarrow{\text{сажа}} MeC + CO$$

– карбидизацией порошков металлов по схемам:  $Me + CO \rightarrow MeC + CO_2$

Таблица 2.1

Характеристика основных методов получения металлических порошков

Наименование метода	Сущность метода	Исходное сырье	Основные виды порошков	Полученные формы частиц
<b>Химические методы</b>				
Восстановление углеродом	На технические или химически чистые окислы воздействуют углеродом (кокс, сажа, древесный уголь, антифриз) при $900 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Реакция протекает по схеме: $Me_xO_y + C \rightarrow Me + CO$	Окалины (для железа) или химически чистые окислы	Fe, N	Осколочные
Восстановление водородом, при котором водород является основным компонентом (природный газ, диссоциированный аммиак и др.)	$Me_xO_y + H_2 \rightarrow Me + H_2O$	То же	Fe, Ni, Co, W, Mo, Cu	
Термическая диссоциация	Разложение (диссоциация) карбонитов, т.е. химических соединений металла с карбонильной группой (CO), их нагревания путем $Me_x(CO)_y \rightarrow XMe + YCO$	Карбониты, химические соединения типа $Me_x(CO)_y$	Fe, Ni, Co	Сферические
Электролиз водных растворов и расплавленных солей	Восстановление металлов на катоде по схеме: $Me^{n+} + n\bar{e} \rightarrow Me$	Растворы и расплавы солей различных металлов	Порошки Ta, Ti, Zr из расплавов Zn, Cu и других растворов солей	
<b>Физические методы</b>				
Распыление водой	Расплавленный металл распыляется под воздействием струи воды под давлением $5 \dots 15$ атм.	Чугун (в случае получения Fe-порошка) или другой расплавленный металл	Железо, ферросплавы, порошки цветных металлов	Сферические или осколочные
Распыление газом	Расплавленный металл распыляется под воздействием струи газа (аргона, азота, воздуха, водяного пара) под давлением $5 \dots 15$ атм.	Чугун (для получения Fe-порошка), металлы с температурой плавления до $1700 \text{ }^\circ\text{C}$	Железо, нержавеющие стали, ферросплавы, порошки жаропрочных сплавов	
<b>Механические методы</b>				
Вихревой размол	Измельчение исходного материала в результате взаимных соударений его частиц под воздействием вихревых потоков защитного газа (азота и др.)	Стружка, проволока	Железо, сталь, бронза, различные сплавы	Блочнообразные
Дробление в шаровых мельницах	Измельчение осуществляется под воздействием стальных шаров или шаров из твердых сплавов	Стружка, грубодисперсные порошки	Сталь, чугун, бронза, электролитический хром	Осколочные
Дробление в вибрационных мельницах				

## 2.3. Твердые сплавы (дискуссия – 2 ч.)

Твердые сплавы представляют собой композиционный материал, состоящий из порошков карбидов титана, тантала, карбонитрида титана, карбидов вольфрама и связующей фазы (матрицы), в качестве которой используется кобальт, никель, молибден.

Все изделия из твердых сплавов изготавливают по технологии порошковой металлургии, включающей следующие этапы:

- 1) изготовление порошков;
- 2) просеивание, взвешивание порошков;
- 3) прессование;
- 4) спекание;
- 5) отделочные операции (калибровка, термообработка, механическая и (или) другая обработка для получения необходимой точности и шероховатости).

Твердые сплавы обладают высокими прочностью при сжатии и твердостью (HRC, 82-92), которая сохраняется при  $700 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , обеспечивая высокие режущие свойства. Однако из-за невысокой прочности при изгибе и ударной вязкости твердые сплавы являются

хрупкими. Существенно увеличить их прочность на изгиб может армирование волокнами.

*Основные свойства и разновидности твердых сплавов*

Применение твердых сплавов в машиностроении значительно повышает производительность труда. Их используют в качестве инструментов при резании металлических и неметаллических материалов и их бесстружечной обработке.

Основными свойствами твердых сплавов, определяющими области их применения, являются твердость, прочность, пластичность, красностойкость и другие. Кроме того, важное значение имеют такие их свойства, как теплопроводность, коэффициент линейного расширения, износостойкость и режущая способность.

**Твердость** – свойство твердого тела сопротивляться проникновению в него другого тела. Это одно из главных свойств твердого сплава, так как от твердости зависит его износостойкость. Главное влияние на твердость оказывает количество карбидной фазы и величина ее зерна. С увеличением содержания карбидной фазы или уменьшением величины зерна твердость возрастает.

Титанотанталовольфрамовые сплавы отличаются более высокой твердостью, чем вольфрамовые, так как у карбида титана твердость выше, чем у карбида вольфрама. Твердость образца твердого сплава определяется на приборе Роквелла по шкале А.

**Пластичность** – свойство тел при воздействии на них нагрузок сохранять остаточную деформацию после снятия действующих сил. Большой недостаток металлокерамических твердых сплавов – их малая пластичность. Она понижается с уменьшением содержания цементирующей фазы в сплаве, т.е. зависит в основном от химического состава сплава. Из-за малой пластичности твердые сплавы относятся к хрупким и плохо переносят удары при прерывистом точении, вибрации и при неравномерной толщине срезаемого слоя.

С изменением температуры меняется пластичность сплавов. Титанотанталовольфрамовые сплавы с увеличением температуры имеют повышенную величину ударной вязкости (КВС) по сравнению с вольфрамовыми и сохраняют ее при высокой температуре. Поэтому при низких скоростях резания титанотанталовольфрамовые сплавы работают хуже, чем при высоких.

**Износостойкость** – особый вид остаточной деформации поверхностей металлических изделий и деталей, обусловленной трением о сопряженные детали. Изнашивание металлов при взаимном трении происходит в результате абразивного, адгезионного, диффузионного и химического взаимодействия.

Износостойкость твердого сплава зависит от химического состава сплава, величины зерен карбидной фазы и условий работы инструментов (деталей).

В пределах одной группы сплавов износостойкость повышается с увеличением содержания карбидной фазы и повышением дисперсности структуры сплава. Титанотанталовольфрамовые сплавы, содержащие малый процент упрочняющего металла, изнашиваются в большинстве случаев в результате хрупкого разрушения. Сплавы вольфрамовой группы с высоким содержанием упрочняющего металла изнашиваются в основном вследствие пластической деформации связки. Отрицательное действие на твердые сплавы оказывает такое явление, как наростообразование, в результате которого режущие поверхности и кромка инструмента получают с большими неровностями, что приводит к резкому износу твердого сплава. Титанотанталовольфрамовые сплавы обладают большей износостойкостью при обработке стали, чем вольфрамовые, так как обладают меньшим наростообразованием и физико-химическим взаимодействием контактирующих поверхностей.

**Прочность** – свойство твердого тела сопротивляться воздействию внешних сил ( $\sigma_v, \sigma_{сж}, \sigma_{изг}, \sigma_{круч}$ ). Твердые сплавы при резании изделия подвергаются воздействию изгибающих нагрузок (моментов). Прочность при изгибе ( $\sigma_{изг}$ ) является основной характеристикой твердых сплавов и зависит от их химических составов, величины зерен карбидов и связки (кобальта).

Титанотанталовольфрамовые сплавы менее прочны при изгибе, т.к. карбид титана более хрупок, чем карбид вольфрама.

**Теплопроводность** – оказывает большое влияние на обработку резанием металлов и сплавов, дающих сливную стружку. Если твердый сплав имеет малую теплопроводность, то выделяющееся тепло сосредотачивается на режущей кромке инструмента и стружки. В этом случае стружка размягчается и мало изнашивает сплав, но режущая кромка инструмента нагревается и быстро изнашивается. Поэтому теплопроводность должна иметь определенное оптимальное значение, обеспечивая наилучшие режущие свойства сплава. В пределах одной группы сплавов теплопроводность зависит от количества карбидного компонента, связки и пористости.

С уменьшением карбидной фазы и пористости теплопроводность возрастает. Вольфрамовые сплавы более теплопроводны, чем титанотанталовольфрамовые.

**Теплостойкость** – свойство твердого сплава сохранять твердость, износостойкость и другие качества, необходимые для резания. Теплостойкость важна для твердого сплава, так как с ее ростом можно увеличивать режимы резания и повышать производительность процесса механической обработки.

Теплостойкость определяется прочностью твердого сплава при высоких температурах. Связка кобальта в твердых сплавах имеет меньшую прочность при высоких температурах, чем карбиды тугоплавких металлов вольфрама и титана. Отсюда следует, что теплостойкость металлокерамических сплавов зависит от соотношения цементирующего металла и карбидов. Теплостойкость титанотанталовольфрамовых сплавов выше, чем вольфрамовых, благодаря присутствию карбида титана. Теплостойкость твердых сплавов лежит в пределах 850...1100 °С.

**Коэффициент линейного расширения** – величина, характеризующая удлинение тела при нагреве и определяемая по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_1} \cdot \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta l}{l_1 \cdot \Delta t}$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – длина стержня до нагрева и после него соответственно;  $t_1$  и  $t_2$  – начальная и конечная температура.

Коэффициент линейного расширения (КЛР) твердых сплавов может меняться в широких пределах. Он возрастает с увеличением кобальта в твердом сплаве и уменьшением количества карбидной фазы. Это объясняется тем, что КЛР кобальта в несколько раз больше, чем у карбидов вольфрама, титана и тантала.

Твердые сплавы очень чувствительны к условиям охлаждения, которые всегда следует учитывать при пайке пластин, шлифовании и затачивании изделий из твердого сплава. Поэтому при обработке инструментов из твердого сплава следует сохранять медленный нагрев и обильное охлаждение.

По составу и области применения твердые сплавы делятся на четыре группы (их сравнительные характеристики представлены в табл. 2.2):

- вольфрамовые (WC-Co);
- титановольфрамовые (WC-TiC-Co);
- титанотанталовольфрамовые (WC-TiC-TaC-Co);
- безвольфрамовые (TiC-Ni, Mo; TiCN-Ni, Mo).

Таблица 2.2

*Свойства твердых сплавов*

Свойства	ВК	ТК	ТТК	ТНТ-КНТ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	12 900... 15 300	10 100... 13 600	12 000... 13 800	5500... 9500
$\sigma_{изг}$ , МПа	1180... 2450	1170... 1770	1250... 1700	900...1750
Микротвердость, МПа	8,8...16,2	11,3...21,6	13,9...14,4	12...20
Температура эксплуатации, °С	700...850	900...1000	800...900	800...950

**Вольфрамкобальтовые сплавы** группы ВК состоят из карбида вольфрама и связки (кобальта) в количестве от 2 до 30 %. Наименьшим количеством кобальта ВК2, ВК3 и ВК3М, поэтому их применяют на чистовых операциях. Сплавы, содержащие наибольшее количество кобальта, обладают наибольшей вязкостью. Их применяют на черновых операциях. На износостойкость сплавов ВК оказывают влияние содержание карбида вольфрама, размер карбидного зерна и содержание связки. При уменьшении размеров зерен возрастает износостойкость, но несколько снижается прочность (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Основные свойства и химический состав некоторых сплавов группы ВК

Марка сплава	WC, %	Co, %	$\sigma_{изг}$ , МПа	HRA	$\frac{\gamma}{\gamma_s}$ , $\frac{г}{см^3}$	$\sigma_{скз}$ , МПа	Область применения
ВК2	98	2	1100	92,0	15,2	3800	Чистовое, получистовое точение и фрезерование неметаллических материалов, цветных металлов и их сплавов
ВК3	97	3	1100	91,0	16,2	4200	
ВК3М	97	3	—	91,0	—	4700	
ВК6	94	6	1350	88,0	14,8	4200	Точение, фрезерование, сверление чугунов, закаленных сталей, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов
ВК6М	94	6	1400	87,0	14,8	4900	Получистовое и чистовое точение сталей и чугунов
ВК8	92	8	1500	88,0	—	3910	Чистовое, получистовое точение, фрезерование, строгание неметаллических материалов, цветных металлов и их сплавов, чугунов
ВК10	90	10	1700	86,0	14,8	3750	
ВК25	75	25	2000	83,5	13,0	2800	Точение, строгание, фрезерование, сверление, резка древесных материалов

Применение твердосплавных резцов для точения упрощено можно представить в виде цепочки, направленной в сторону роста прочности обрабатываемого материала:

ВК10-ОМ → ВК8 → ВК6М → ВК6-ОМ → ВК3М → ВК3ОМ → ВК2.

В обозначении марки сплавов с мелким зерном добавляется буква М.

Порошки в твердых сплавах могут быть:

- особомелкозернистые ОМ (< 1 мкм);
- мелкозернистые М (1...3 мкм);
- крупнозернистые (3...5 мкм).

На рис. 2.1 и 2.2 представлены графики зависимостей твердости твердых сплавов групп ВК и ТК от процентного содержания кобальта.

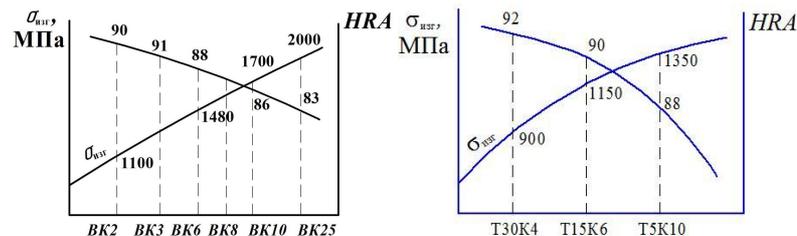


Рис. 2.1. График зависимости твердости (HRA) и прочности на изгиб ( $\sigma_{изг}$ , МПа) некоторых твердых сплавов группы ВК от процентного содержания кобальта

Рис. 2.2. График зависимости твердости (HRA) и прочности на изгиб ( $\sigma_{изг}$ , МПа) некоторых твердых сплавов группы ТК от процентного содержания кобальта

**Титановольфрамные сплавы** группы ТК по сравнению со сплавами ВК обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии и окислению, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью. Поэтому инструменты из них применяют при обработке конструкционных сталей на средних и высоких скоростях резания.

**Титанотанталовольфрамные сплавы** – состоят из зерен WC, зерен двойных и тройных карбидов (Ti, Ta) и связки (кобальта) (табл. 2.4). Сплавы отличаются меньшей хрупкостью, большей прочностью удержания карбидной фазы, лучшей сопротивляемостью высокотемпературной текучести и большим пределом прочности при циклическом характере нагружения. Поэтому использование инструмента, оснащенного пластинами из ТТК, особенно эффективно в процессах прерывистого резания. Группа сплавов ТТК применяется при обработке труднообрабатываемых сталей аустенитного класса.

**Безвольфрамные твердые сплавы** не содержат в своем составе дефицитного и дорогостоящего вольфрама, поэтому изделия из них более экономичны.

Таблица 2.4

Основные свойства и химический состав некоторых сплавов групп ТК и ТТК

Марка сплава	WC, %	TiC, %	TaC, %	Co, %	$\sigma_{изг}$ , МПа	HRA	$\frac{\gamma}{\gamma_s}$ , $\frac{г}{см^3}$	$\sigma_{скз}$ , МПа	Область применения
Т30К4	66	30	—	4	900	92	9,7	—	Чистовая обработка точением и сверлением сталей
Т15К6	79	15	—	6	1159	90	11,3	3900	Получистовое и чистовое точение, сверление, фрезерование сталей с повышенными скоростями резания
Т5К10	85	5	—	10	1385	88	13,0	4000	Черновое точение, фрезерование, строгание сталей и ковкого чугуна при средних скоростях резания
ТТ7К12	81	4	3	12	1600	87	13,0	—	Черновое точение, строгание и нарезка сталей при низких скоростях резания
ТТ10К8Б	82	3	7	8	1400	89	13,6	—	Получистовое точение и фрезерование сталей и ковкого чугуна при средних скоростях резания

Безвольфрамные твердые сплавы групп ТНТ-КНТ предназначены взамен традиционных твердых сплавов групп ТК и ВК, которые близки по своим свойствам, поэтому одинаково используются для токарной и фрезерной обработки.

#### Тема 2.4. Керамические КМ (дискуссия – 1 ч.)

Керамические композиционные материалы (ККМ) имеют матрицу, состоящую из химических соединений (оксидов, карбидов, нитридов и др.), армированную металлическими и неметаллическими наполнителями.

Свойства ККМ:

- высокая температура плавления;
- высокая прочность на сжатие, даже при высоких температурах;
- высокая теплостойкость;
- возможность эксплуатации при высоких температурах.

Таблица 2.5

Основные способы получения ККМ, армированных металлическими волокнами

Волокно	Матрица	Способ изготовления
Mo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , LiO	Горячее прессование
Nb	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30% Cr	То же
W, Mo, Th	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Шликерное литье
W	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Z <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Прессование со спеканием
Mo	MgO, SiO <sub>2</sub>	Горячее прессование

**Керметы.** Наряду с тугоплавкостью от керамики требуются высокие прочность при растяжении и ударная вязкость, стойкость к вибрациям и термоудару. Такими свойствами обладают, например, некоторые металлы. Сопоставление свойств керамики и металлов привело к созданию керметов – материалов, в которых керамическая матрица сочетается с металлическими включениями в виде порошка.

В настоящее время керметом считают материал, содержащий более 50% тугоплавкой неметаллической фазы. Созданы керметы на основе карбида титана и оксида алюминия, никеля, системы оксид алюминия-вольфрам-хром и многие другие. Однако керметы обладают одним существенным недостатком – хрупкостью, поэтому их применение во многих случаях ограничено.

Для получения армированных ККМ используют преимущественно методы порошковой металлургии, а также гидростатическое, изостатическое и горячее прессование, центробежное и вакуумное литье (табл. 2.5).

В ККМ нагрузка переносится с малопрочной матрицы на более прочную арматуру. Однако эффект увеличения предела прочности при растяжении наблюдается у ККМ не всегда. В некоторых случаях композиция получается менее прочной, чем неармированная матрица. Объяснить это можно сочетанием в ККМ малой пластичности с высоким модулем упругости при растяжении. Из-за этого удлинение матрицы при нагружении ее до разрушения оказывается недостаточным для того, чтобы передать значительную часть нагрузки армирующим элементам. Достигнуть этого можно либо за счет подбора материала арматуры с более высоким, чем у матрицы, модулем упругости, либо за счет предварительного напряжения арматуры при условии достаточно прочной связи ее с матрицей.

Важен и вопрос ориентации армирующих волокон в керамике. Они могут располагаться в матрице как направленно, так и хаотично. Схема ориентации волокон в матрице определяется условиями нагружения детали при эксплуатации.

**ККМ с металлическими волокнами** чаще армируют волокнами вольфрама, молибдена, стали, ниобия. Основная цель введения в керамику металлических волокон – образование пластической сетки, способной обеспечить целостность керамики после ее растрескивания и уменьшить вероятность преждевременного разрушения. Изготавливают такие ККМ в основном методами горячего прессования, поскольку металлические волокна не взаимодействуют с оксидной керамикой вплоть до температур 1800...2500°C. Удельная вязкость и термостойкость ККМ непрерывно повышается по мере увеличения объема армирующих волокон в композите. Однако при содержании волокон более 25 % растет пористость материала, что приводит к его разупрочнению. Применение металлических волокон для армирования керамики ограничивается их низкой стойкостью к окислению при высоких температурах.

**ККМ с углеродными волокнами.** Взаимодействие углерода с оксидами, карбидами и силицидами происходит при более высоких температурах, чем с металлами, поэтому использование керамики в качестве матриц высокотемпературных КМ с углеродными волокнами перспективно.

В тех случаях, когда предполагаемая температура эксплуатации деталей из ККМ превышает 2273 К, целесообразно использовать керамическую матрицу на основе карбидов; выше 1273 К – на основе боридов и нитридов; при более низких температурах – оксидную матрицу.

Важным условием эффективного использования прочности углеродистых волокон в ККМ является оптимальное соотношение модулей упругости волокон и матрицы. При объемной доле углеродных волокон 50...60 % их прочность максимально используется при отношении модулей упругости матрицы и волокна, приближающемся к 0,1. Поэтому для армирования керамики следует применять высококомпульные волокна.

Из углекерамических КМ наиболее широко исследованы композиты со стеклянной матрицей (боросиликатные, алюмосиликатные, литиевосиликатные и др.). Для указанных материалов характерна стабильность исходных физико-механических свойств даже при высоких температурах. Например, для ККМ боросиликатное стекло-углеволокно (объемная доля волокна 60 %) предел прочности при изгибе составляет при 293 К 1025 МПа и не изменяется до температуры 870 К.

Следует отметить, что большое влияние на физико-химические свойства ККМ с углеродными волокнами оказывают способы их формирования.

**ККМ с волокнами карбида кремния** при практически равной прочности имеют преимущества перед материалами с углеродными волокнами, так как имеют повышенную стойкость к окислению при высоких температурах и значительно меньшую анизотропию коэффициента термического расширения.

В качестве матричного материала используют порошки боросиликатного, алюмоборосиликатного, литиевосиликатного стекла или смеси стекол в различных соотношениях. Волокна карбида кремния применяют в виде моноволокна со средним диаметром отдельных волокон 10...12 мкм.

ККМ, армированные моноволокном, получают горячим прессованием в среде аргона слоев из лент волокна и стеклянного порошка. С точки зрения изготовления деталей сложных форм более удобны материалы, армированные непрерывной пряжей. По своим свойствам они превосходят ККМ, армированные моноволокном.

**Резающая керамика.** В настоящее время выпускаются следующие виды керамических инструментальных материалов:

- белая оксидная керамика, состоящая на 90 % из оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и легирующих добавок (MgO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> и др.), например, ЦМ-332 (оксидная);
- черная оксидно-карбидная керамика, изготавливаемая из смеси Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 60 %), TiC (20...40 %), ZrO<sub>2</sub> и других карбидов с легирующими добавками, например, ВЗ, ВОК-60, ВОК-63;
- керамика на основе нитридов кремния (SiN<sub>4</sub>), легированная оксидами иттрия, циркония и аммония, например, силинит Р (нитридная керамика).

Минералокерамика представляет собой композиционный материал, полученный методами порошковой металлургии. Керамические материалы не имеют связующей металлической фазы, поэтому сохраняют свои физико-механические свойства при нагреве, что делает возможным их применение при высоких скоростях резания.

Если предельная скорость резания для твердосплавного инструмента составляет 500...600 м/мин, то для керамического инструмента она увеличивается до 900...1000 м/мин. Недостатками керамических материалов являются их низкая прочность на изгиб (0,3...0,35 ГПа), повышенная хрупкость и низкая теплопроводность.

## Тема 2.5. Сверхтвердые материалы (дискуссия – 1ч.)

К сверхтвердым материалам (СТМ), используемым в качестве инструментальных при механической обработке, относятся материалы, твердость и износостойкость которых выше, чем у твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Это природные и синтетические алмазы.

**Природные алмазы.** Алмаз представляет кристаллическую модификацию углерода. Кубическая кристаллическая решетка содержит

15 атомов, каждый из которых в решетке связан общими электронами с четырьмя атомами.

В природе алмазы встречаются в виде отдельных монокристаллов и их обломков или в виде сросшихся кристалликов-агрегатов. Наиболее часто кристаллы имеют форму октаэдра, куба или ромбододекаэдра, а также их комбинаций. Масса алмазов, встречающихся в природе, колеблется от сотых долей до нескольких сот карат (1 карат равен 0,2 г). Из природных агрегатов наиболее широко в промышленности используются:

- балласы – шаровидные агрегаты мелкозернистого строения;
- карбонадо – тонкозернистые, плотные и несколько пористые агрегаты.

**Физико-механические свойства алмаза.** Атомы углерода в алмазе обладают чрезвычайно прочными ковалентными связями, что объясняет его высокую твердость. Алмаз самый твердый из природных минералов. Модуль упругости его также самый высокий из всех известных в природе твердых веществ. Он в 1,5 раза выше, чем у твердых сплавов, в 2,5 раза выше, чем у карбида кремния. Наряду с высокой твердостью алмаз обладает значительной хрупкостью из-за наличия кристаллографических плоскостей и небольшого сопротивления изгибу. Теплопроводность алмаза на порядок выше теплопроводности других абразивных и инструментальных материалов, а коэффициент линейного расширения в 5...10 раз меньше. Алмаз обладает чрезвычайной износостойкостью. Твердость и прочность кристаллов алмаза в различных направлениях различны (кристалл является анизотропным). Условно различают «твердые» и «мягкие» направления в кристаллах. По «мягким» обработка ведется легче, однако инструмент сильнее изнашивается. При изготовлении инструментов алмаз необходимо обрабатывать по «мягким» направлениям, а в процессе работы инструмента ориентировать кристалл так, чтобы износ происходил в «твердом» направлении. Для этого существуют различные методы, соответствующие приборы и оборудование.

**Химические свойства алмазов.** Алмаз весьма устойчив к воздействию различных кислот. Он не растворяется в плавиковой, серной, азотной, соляной и других кислотах. При определенных условиях он может растворяться в расплавленных щелочах, натриевой и калиевой селитре, а также в соде.

Алмаз на воздухе окисляется при температуре 850...1200 °С, в струе чистого кислорода – при 700...800 °С.

**Адгезивно-диффузионная способность.** Алмаз предрасположен к адгезии с другими материалами. Энергия адгезии зависит от температуры в контакте. При увеличении температуры до 900 °С энергия адгезии увеличивается, а при дальнейшем увеличении температуры уменьшается. При высокой температуре алмазы способны к активному диффузионному взаимодействию с некоторыми металлами, в особенности с железом и сталями.

**Синтетические алмазы.** Кристаллические порошки синтетических алмазов получают синтезом из графита. Процессы ведутся при высоких температурах (1400...2500 °С) и давлениях (5...9 ГПа) с применением металлов-катализаторов, создающих условия роста нужных кристаллов. Скорость роста кристаллов составляют 40...200 мкм/ч, а выход из сырья качественных алмазов достигает 50...90 %. Обычно получают кристаллические порошки размером зерна 0,1...1 мм.

Получаемый порошок поликристаллов алмаза используется в механической обработке как самостоятельный инструмент (обработка свободным зерном в незакрепленном состоянии в виде доводочных суспензий), а также для изготовления из него компактных инструментов (шлифовальные круги, бруски, диски, хоны, шеверы) посредством методов порошковой металлургии (прессование, спекание).

Методом склеивания поликристаллов алмазов получают надфили, притиры, напильники, шлифовальные ленты, шкурки и другие лезвийные инструменты. Изготавливают также заготовки многих инструментов для пластического деформирования металлов: иглы, ролики, волокна, наконечники, выглаживатели и др.

В зависимости от размеров зерен порошки из синтетических алмазов делят на четыре группы:

- шлифовальные зерна;
- шлифпорошки;
- микропорошки;
- субмикропорошки.

Шлифпорошки зернистостью от 50/40 до 630/500 получают путем отсева на ситах. Микропорошки от 60/40 до 1/0 получают путем осаждения в жидкость с контролем зернового состава микроскопическим методом.

Алмазные порошки выпускают из синтетических алмазов марок АС2, АС4, АС6 и др. (АСО, АСПК, АСВ, АСК и АСС). Зернистость определяют размером основной фракции порошков и обозначают дробью, числитель которой соответствует наибольшему, а знаменатель – наименьшему размеру зерен. Например, 125/100; 100/80; 80/63 и др.

Цифровому обозначению предшествует буквенный индекс, который указывает на природу поликристаллического материала. Природным алмазам присвоен индекс А, а синтетическим – АС. Добавочный буквенный индекс может обозначать, например, тип поликристалла (Б – баллас, К – карбонадо или особенности абразивного воздействия, Н – повышенная абразивная способность). Наиболее известны поликристаллические алмазы марок АСВ (баллас) и АСПК (карбонадо).

#### **Кубический нитрид бора**

**Кубический нитрид бора (КНБ)** синтезирован из природного нитрида бора – вещества, похожего на графит. Нитрид бора кристаллизуется в гексагональную решетку, во многом похожую на решетку графита. Кубический нитрид бора получают синтезом из нитрида бора примерно при тех же условиях, что и синтетические алмазы. Преимуществом КНБ перед АС является его высокая теплостойкость и диффузионная устойчивость к железоуглеродистым материалам (сталям).

Кубический нитрид бора выпускают двух модификаций – эльбор и кубонит. Эльбор-Л1 предназначен для получения порошков, идущих на изготовление абразивных инструментов, а эльбор-Р – для изготовления пластин резцов, фрез и другого лезвийного инструмента.

**Поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ)** – представляет собой сросшиеся кристаллы КНБ.

**Гексанит-Р** – поликристаллический материал неправильной тетраэдрической конфигурации на основе бора и азота. Гексанит-Р обладает высокой твердостью (4000...6000 кгс/мм<sup>2</sup>) и пониженной хрупкостью. Из него можно вырезать пластинки для лезвийных инструментов. Его ударная вязкость выше, чем у эльбора-Р, поэтому гексанит-Р можно использовать при ударных нагрузках.

Нитрид бора химически инертен к многим металлам и их сплавам, поэтому КНБ и ПКНБ не теряют режущих свойств даже при температурах 1100...1300 °С.

Инструменты из сверхтвердых материалов выпускают на трех видах связки:

- металлических (М1, МТ2, МВ1, М10, МО4, МО13, МО13Э, МО16) – для использования на операциях при съеме значительных припусков, в том числе при комбинированных электрофизических методах шлифования;
- органических (Б1, Б156, ТО2, БП2, Б2, Б3, КП) – для использования на полустивых, чистовых и доводочных работах различных закаленных материалов и затачивании режущих инструментов;
- керамических (К1 и К5) – для предварительной и чистовой обработки оснастки, инструментов, деталей из твердого сплава, шлифования резьбы и других операциях.

Шлифовальные круги на металлической связке обеспечивают интенсивность съема 500...700 мм<sup>3</sup>/мин, а на керамической и органической связках – 200...500 мм<sup>3</sup>/мин. Шероховатость поверхности на металлической связке  $R_a = 0,04...1,25$  мкм, на керамической –  $R_a = 0,08...0,63$  мкм, а на органической связке –  $R_a = 0,02...0,32$  мкм.

При неправильном выборе шлифовального круга может наблюдаться разрушение алмазов и нитридов бора, что приводит к повышенному износу сверхтвердых материалов. Одним из методов снижения удельного расхода является нанесение металлических или неметаллических покрытий на абразивные зерна, что позволяет повысить их прочность и износостойкость. Для этого используются следующие способы: гальванический (наиболее распространенный); осаждение из газовой фазы; пропитка из расплава; металлизация путем электронно-плазменного испарения; конденсация в вакууме; агрегирование групп зерен в расплавах.

Основные физико-механические свойства сверхтвердых материалов в сопоставлении со свойствами других инструментальных материалов

Материалы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	Предел прочности		Модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Коэффициент теплопроводности, кал/(см·с·°C)
			на изгиб, МПа	на сжатие, МПа			
Алмаз	3,49...3,54	10 000	300	2000	90 000	0,9...1,45	0,35
Кубический нитрид бора	3,44...3,49	9250	700...1000	2900...3750	72 000	2,1...4,0	0,1
Карбид кремния	3,2	3300...3600	50...150	1500	36 500	6,5	0,037
T15K6	11,0...11,7	2800...3000	1100...1150	3900	52 000	6,0	0,065
ВК8	14,4...14,8	1550...1690	1300...1600	4000...5000	54 000	5,0	0,141
Минералокерамика ЦМ-332	3,93	2000...2300	300...450	900...1500	400	7,9...8,3	0,01
Сталь P18 (закаленная)	8,5...8,7	1300...1400	3700	3600	22 000	11,0	0,058

Наибольшая технико-экономическая эффективность достигается при эксплуатации инструментов из сверхтвердых материалов при комбинированных электрофизических методах обработки. Основные физико-механические свойства сверхтвердых материалов в сопоставлении со свойствами других материалов представлены в табл. 2.6.

### Тема 2.6. Прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов (дискуссия – 2 ч.)

Основная задача прессования – получение детали (прессовки) заданной формы и равномерной плотности с размерами и точностью, соответствующими чертежу детали.

#### Свойства спрессованных деталей

Качество спрессованных изделий оцениваются по двум основным характеристикам: плотности и прочности.

Плотность прессовки зависит от:

- формы и размеров детали;
- давления прессования;
- свойств и ситового анализа порошка;
- состояния стенок пресс-формы;
- наличия смазки;
- схемы прессования;
- времени выдержки под давлением и др.

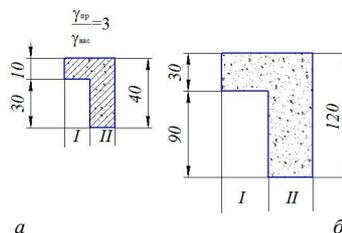


Рис. 2.3. Расчет перемещения пуансонов для получения прессовки:  
а – деталь после прессования; б – форма с порошком до прессования

Большое влияние на равномерное распределение плотности в спрессованной детали имеет ее форма. Чем она сложнее, тем труднее получить одинаковую плотность, тем более, что порошки перемещаются не в направлении, перпендикулярном направлению давления прессования, а вдоль оси, параллельно давлению прессования. Если деталь имеет разные высоты вдоль оси, слой порошка в данной части изделия должен быть пропорционален высоте детали:

$$\frac{H}{h} = \frac{\gamma_{пр}}{\gamma_{нас}}$$

где  $\gamma_{пр}$  – плотность прессовки, г/см<sup>3</sup>;  $\gamma_{нас}$  – насыпная масса порошка, г/см<sup>3</sup>.

Поэтому каждую часть детали должны прессовать разные пуансоны. Рассмотрим это на примере (рис. 2.3).

I-й пуансон перемещается на 30 – 10 = 20 мм;

II-й пуансон перемещается на 120 – 40 = 80 мм.

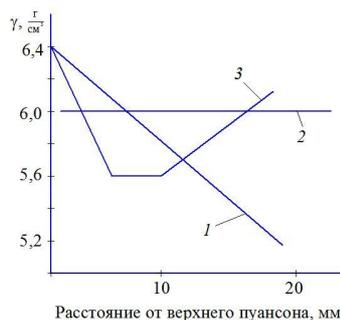


Рис. 2.4. Зависимость плотности прессовок от расстояния между верхним и нижним пуансоном для дисперсно-упрочненной меди:  
1 – Si; 2 – Si + 4 % графита; 3 – Si (для двухстороннего прессования)

Поэтому расстояния между пуансонами в начале прессования

120 – 30 = 90 мм, в конце – 120 – 90 = 30 мм, т.е. движение пуансонов должно быть независимым.

При одностороннем прессовании максимальную плотность имеет слой, к которому приложено давление. При двухстороннем – максимальная плотность у верхнего и нижнего слоя, которые соприкасаются с пуансонами (рис. 2.4).

Процесс прессования можно представить в виде трех этапов:

– при увеличении давления происходит более плотная укладка зерен порошка, но они не деформируются вследствие распределения мелких частиц среди более крупных;

– при дальнейшем увеличении давления прессования плотно упакованные зерна оказывают сопротивление сжатию;

– на третьем этапе нагрузка превышает сопротивление зерен и они перераспределяются, прессовка продолжает сжиматься.

Зерна твердых сплавов WC, TiC деформируются мало, и уплотнение происходит за счет хрупкого разрушения зерен.

Известны исследования зависимости относительной плотности спрессованного брикета от давления прессования  $P_{пр}$  (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Экспериментальные данные по определению давления прессования (на примере свинца, олова, меди и железа)

Металл	$\gamma_{нас}$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость		Давление прессования при относительной плотности	
		НВ	Условная	80	90
Pb	3,9	3,5	1,0	1,0	1,00
Sn	3,5	5,0	1,5	2,0	6,05
Cu	3,5	49,0	14,5	9,0	1,00
Fe	2,7	70,0	20,0	11,5	1,90

В виде формул это можно представить следующим образом:

$$P_{пр} = A_{\sigma} \cdot \lg \frac{\gamma}{\gamma_0},$$

где  $A_{\sigma}$  – коэффициент, зависящий от предела текучести материала порошка;

$$\gamma = \frac{\gamma_{пр}}{\gamma_k}; \quad \gamma_0 = \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k},$$

где  $\gamma_k$  – плотность компактного материала, г/см<sup>3</sup>;

$$\lg P = \lg A + \lg(\lg \gamma - \lg \gamma_0),$$

$$A = 4,6\sigma_T,$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала, МПа.

Плотность прессовок можно определить, рассмотрев три случая:

– прессование однокомпонентной шихты;

– прессование многокомпонентной шихты;

– прессование многокомпонентной шихты, которая в дальнейшем будет пропитываться жидким металлом.

Для 1-го и 2-го случая

$$\gamma_{пр} = \gamma_k \left(1 - \frac{\Pi}{100}\right) k \left(1 - \frac{\Delta V}{100}\right),$$

где  $\gamma_k$  – плотность компактного материала данного химического соединения, г/см<sup>3</sup>;  $\Pi$  – пористость прессовки, %;  $k$  – коэффициент потери веса за счет выгорания;  $\Delta V$  – величина объемной усадки при спекании, %.

Соотношение характеристик порошка, прессовки и компактного материала представлено на рис. 2.5.

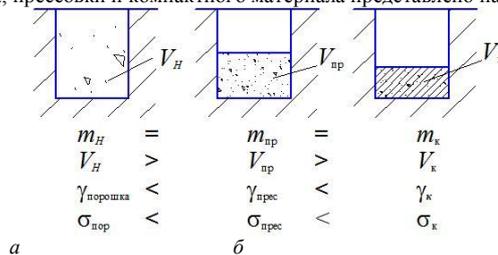


Рис. 2.5. Соотношения характеристик порошка (а), прессовки (б) и компактного материала с нулевой пористостью (в)

Одной из характеристик прессовки является остаточная пористость, определяемая по формуле:

$$\Pi = 1 - \frac{\gamma_{пр}}{\gamma_k}$$

После прессования у брикетов образуются поры двух видов: закрытые и открытые, т.е. соединяющиеся между собой.

Для антифрикционных деталей наличие открытых пор дает положительный эффект, т.к. они могут подвергаться пропитке антифрикционными материалами (медь, серебро, латунь, масла), служащими смазкой трущейся пары, а для конструкционных деталей присутствие открытых пор нежелательно, т.к. при получении гальванических покрытий в них может попасть электролит, который вызывает внутреннюю коррозию.

Для определения открытой пористости  $\Pi_{откр}$  применяют метод масловпитывания:

$$\Pi_{откр} = \frac{m_2 - m_1}{V \cdot \gamma_{масла}} \cdot 100 \%$$

где  $m_2$  и  $m_1$  – масса детали после вакуумной пропитки маслом и до нее, г;  $\gamma_m$  – плотность масла, г/мм<sup>3</sup>;  $V$  – объем детали, мм<sup>3</sup>.

Закрытая пористость определяется по формуле

$$\Pi_{\text{закр}} = \Pi_{\text{общ}} - \Pi_{\text{откр}}$$

На плотность прессовок большое влияние оказывает выдержка под давлением. Например, для порошка железа при 60 МПа плотность зависит от выдержки под давлением так:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0 \quad \gamma_{\text{пр}} &= 5,15 \text{ г/см}^3; \\ t = 0,5 \text{ мин} \quad \gamma_{\text{пр}} &= 5,75 \text{ г/см}^3; \\ t = 3 \text{ мин} \quad \gamma_{\text{пр}} &= 6,14 \text{ г/см}^3. \end{aligned}$$

Это можно объяснить тем, что при выдержке заканчивается процесс пластической деформации частиц и их перемещение. Но при больших выдержках значительно уменьшается производительность.

Прочность прессовок зависит от усилия (давления) прессования, материала прессовок, насыпной массы, состояния поверхности, формы и размера частиц, наличия смазки.

Свойство прочности объясняется механическим зацеплением и переплетением поверхностных выступов и неровностей частиц порошка. Меньшую роль при этом имеет схватывание, т.е. укрупнение частиц порошка за счет разрушения связей между ними не происходит. Изделия из крупнозернистых смесей имеют более низкую прочность, чем из мелкозернистых при других равных условиях.

Значительное влияние на прочность оказывает давление прессования. Как правило, прочность прямопропорциональна усилию прессования: с увеличением  $P_{\text{пр}}$  увеличивается и  $\sigma_{\text{пр}}$ .

На уровень прочности КМ влияют также объемное содержание частиц упрочнителя, степень дисперсности и расстояние между частицами. Прочность увеличивается с уменьшением расстояния между частицами согласно формуле Орована:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{G \cdot b}{l}$$

где  $G$  – модуль сдвига материала матрицы, ГПа;  $b$  – межатомное расстояние, м;  $l$  – расстояние между частицами упрочнителя, м.

Отрицательное влияние на прочность КМ оказывают примеси и загрязнения порошков, т.к. они увеличивают твердость поверхностного слоя частиц при одновременном уменьшении их пластичности. На прочность влияют и сами составляющие КМ.

#### Методы прессования порошковых материалов

Основными методами прессования заготовок из порошковых материалов являются:

- холодное прессование в закрытых пресс-формах;
- холодное прессование в открытых пресс-формах (мундштучное; прессование скошенным пуансоном);
- горячее прессование в закрытых пресс-формах;
- всестороннее прессование (изостатическое, гидростатическое, прессование взрывом);
- прокатка порошковых материалов.

#### Холодное прессование в закрытых пресс-формах

Технологический процесс холодного прессования состоит из следующих операций:

- дозировка шихты;
- засыпка шихты в пресс-форму;
- прессование;
- выдержка под давлением;
- выталкивание готовых прессовок.

Холодное прессование в закрытых пресс-формах проводится по двум схемам:

- 1) одностороннее прессование, при котором давление прикладывается к верхнему слою (рис. 2.6). Порошок перемещается под действием давления  $P$  на расстояние  $H-h$ , а противоположный слой не перемещается ( $H$  – высота слоя порошка;  $h$  – высота изделия);
- 2) двухстороннее прессование (рис. 2.7), когда давление прикладывается в двух направлениях (сверху и снизу). Оба слоя сдвигаются навстречу друг другу, при этом средний слой не перемещается.

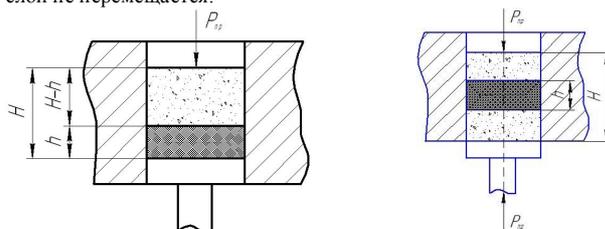


Рис. 2.6. Схема одностороннего прессования Рис. 2.7. Схема двухстороннего прессования

#### Холодное прессование в открытых пресс-формах

Сущность процесса холодного прессования в открытых пресс-формах – непрерывное формообразование труб, стержней, полос и других деталей, длина которых значительно превышает площадь поперечного сечения.

Разновидности данной технологии:

- прессование скошенным пуансоном, применяемое для изготовления брусков толщиной 25...50 мм для деталей из меди, железа, свинца, молибдена, вольфрама;
- мундштучное прессование (рис. 2.8), при котором шихта с 10 % пластификатора (парафин, крахмал) пропускается под давлением через конус и цилиндрическую часть матрицы (мундштук), где в результате обжатия смеси происходит ее уплотнение (степень обжатия должна составлять не менее 90 %).

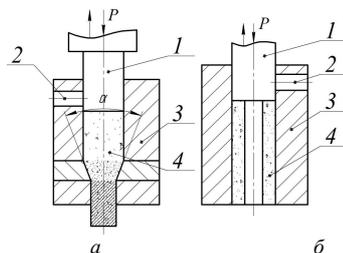


Рис. 2.8. Схемы мундштучного прессования: а – для получения прутков; б – для получения трубчатой заготовки: 1 – пуансон; 2 – окно подачи порошкового материала; 3 – матрица; 4 – навеска порошка

### Всестороннее прессование

Всестороннее прессование имеет несколько разновидностей:

1. *Изостатическое прессование* (рис. 2.9) производится в металлических пресс-формах с помощью резинового или другого эластичного резервуара, вставленного в пресс-форму.

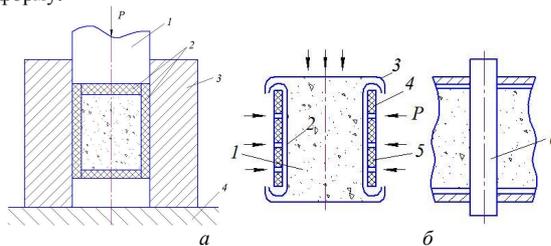


Рис. 2.9. Схема изостатического прессования: 1 – пуансон пресса; 2 – эластичная оболочка; 3 – металлическая пресс-форма; 4 – стол пресса

Рис. 2.10. Схема гидростатического прессования: а – для деталей без отверстий: 1 – порошок; 2 – труба из эластичного материала; 3 – резиновый коллак; 4 – резиновый манжет; 5 – металлическая перфорированная гильза; б – для деталей с отверстием: б – стержень

2. *Прессование взрывом* заключается в том, что порошки помещают в тонкостенный металлический контейнер, например, из свинца, обматывают детонирующим шнуром и помещают в воду. При взрыве создается давление, обжимающее контейнер и порошок.

3. *Гидростатическое прессование* (рис. 2.10) – прерывистый способ формообразования, при котором порошок, заключенный в эластичную резиновую или металлическую оболочку, равномерно и всесторонне обжимается жидкостью с максимальным давлением.

Преимущества всестороннего прессования:

- максимальная высота деталей определяется только высотой камеры;
- отсутствует трение порошка о стенки пресс-формы и перемещение частиц вдоль оболочки, поэтому плотность детали распределяется равномерно;
- спрессованные заготовки имеют форму оболочки, поэтому можно получать детали сложной формы;
- возможность получать биметаллические трубы;
- высокая плотность заготовок при сравнительно низких давлениях прессования.

### Прокатка порошковых материалов

Технология прокатки порошковых материалов представляет собой обжатие порошка между горизонтально вращающимися вальками (рис. 2.11). Данный метод применяется для получения пористых и компактных лент, полос листа из железа, никеля, никрома, нержавеющей стали, титана и других металлов и сплавов.

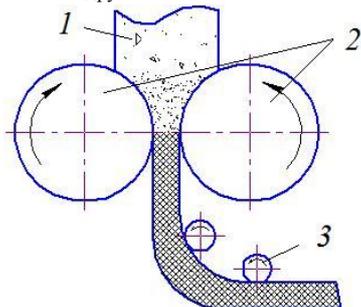


Рис. 2.11. Схема прессования порошковых материалов прокаткой: 1 – емкость для порошка; 2 – вращающиеся вальки; 3 – вальки для изменения направления движения прокатанной заготовки

### Горячее прессование в закрытых пресс-формах

Горячее прессование – прерывистый метод формирования деталей, происходящий в закрытых пресс-формах при постепенно увеличивающихся до максимальных значений температуре и давлении. Данный метод позволяет совмещать в одной операции прессование и спекание (табл. 2.8). Процесс формирования идет при температурах ниже температуры плавления основного элемента. Режимы горячего прессования тугоплавких материалов показаны в табл. 2.9.

Преимуществом горячего прессования является значительная экономия электроэнергии, а недостатком – невысокая точность пресс-форм за счет взаимодействия с ней

композиционного материала.

Таблица 2.8

Основные технологические параметры прессования Fe-порошка

Холодное прессование	Горячее прессование
одна и та же деталь	
$P = 600 \text{ МПа}$	$P = 50 \text{ МПа}$
$t_{\text{спекания}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{формования}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$
$\tau = 1 \text{ ч}$	$\tau = 30 \text{ мин}$
$P_{\text{допрессовки}} = 600 \text{ МПа}$	–
Вторичное спекание:	–
$t = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$	–
$\tau = 2 \text{ ч}$	–
Расход электроэнергии на одну деталь 0,31 кВт · ч	Расход электроэнергии на одну деталь 0,053 кВт · ч

Таблица 2.9

Режимы горячего прессования из тугоплавких соединений

Сплавы	$t_{\text{пл}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Давление прессования $P_{\text{пр}}, \text{ МПа}$	Время спекания, мин	Остаточная пористость П, %
WC	2330	12	5	0
TiC	2500	12	2	0,4...1,0
TaC	2350	12	5	5,0...6,0
FeSi <sub>2</sub>	1170	25	10	7,0...8,0

### Выталкивание прессовок из пресс-формы

Одной из ответственных операций при изготовлении деталей из КМ является выталкивание прессовок из пресс-формы, т.к. деталь после прессования оказывается плотно зажатой в пресс-форме. Проблема заключается в том, что:

- силы, действующие в направлении основания детали, уравновешиваются внутренними упругими силами;
- силы, действующие перпендикулярно направлению действия внешнего давления, уравновешиваются реакцией боковых стенок;
- при снятии давления упругие силы освобождаются и деталь стремится к всестороннему расширению (*упругое последствие*);
- после снятия давления продольному расширению препятствует трение о стенки пресс-формы, а поперечному – давление стенок, которое значительно больше трения о стенки, поэтому прессовки увеличиваются по высоте.

Усилие выталкивания можно определить по уравнению:

$$P_{\text{выт}} > N_{\text{тр}} = \mu \cdot \varepsilon \cdot P_{\text{пр}} \cdot S$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $S$  – площадь поверхности трения, мм<sup>2</sup>;  $P_{\text{пр}}$  – давление прессования, кг/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – коэффициент Пуассона

на, равный

$$\varepsilon = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Обычно усилие выталкивания составляет 20...30 % от усилия прессования.

Упругое последствие – важная характеристика прессования в порошковой металлургии, благодаря которой возможно свободное извлечение пуансона из детали.

Линейная величина упругого последствия равна:

$$\delta_l = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \%$$

где  $l_1$  – размер детали после извлечения ее из пресс-формы, мм;

$l_0$  – соответствующий размер полости пресс-формы или диаметр стержня, мм.

Например, для Fe-порошка в осевом направлении  $\delta_l = 0,6 \%$ , а в поперечном –  $\delta_l \approx 0,2 \%$ .

### Тема 2.7. Технология спекания порошковых материалов (дискуссия – 2 ч.)

Спекание – одна из заключительных технологических операций при изготовлении порошковых деталей, при которой осуществляется нагревание изделий до  $(0,8...0,9)t_{пл}$  связки, их выдержка при этой же температуре, а затем охлаждение.

При этом происходят следующие процессы:

- повышение подвижности атомов, их перемещение и диффузия;
- изменение контактной поверхности между частицами;
- снятие остаточных напряжений;
- рекристаллизация (рост зерен частиц);
- изменение механических свойств детали.

Таким образом, спекание можно определить как качественное и количественное изменение взаимного контакта между частицами, вызванное температурной подвижностью атомов.

Процессы спекания можно разделить на два основных вида:

- в твердой фазе;
- с образованием жидкой фазы.

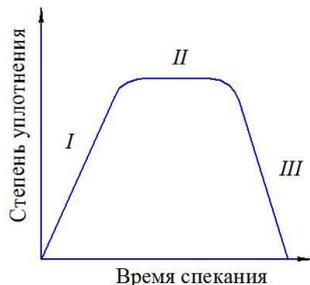
В первом случае спекание происходит за счет взаимодействия частиц в твердом состоянии, причем их химический состав не меняется (например, спекание порошков чистых металлов железа, никеля, меди и других металлов, а также их сплавов).

Спекание второго вида относится к системам, которые состоят из частиц разного химического состава. В этом случае при спекании возможно взаимодействие частиц либо в твердой фазе (например, спекание сплава медь + олово + графит), либо с образованием жидкой фазы, например, твердый сплав WC + Co.

В процессе спекания можно различать три основных стадии (рис. 2.12.). На первой стадии идет активное уплотнение и наращивание прочности материала, на второй – малоактивная усадка,

а на третьей стадии – резкое затухание процесса за счет внутреннего давления газов, находящихся в замкнутых порах.

Рис. 2.12. Кинематика процесса спекания: I, II, III – стадии процесса



Процесс спекания можно искусственно активизировать, т.е. получить необходимую плотность материала за меньшее время. Способы активизации процесса спекания:

- спекание с предварительным окислением: на первой стадии происходит поверхностное окисление частиц в увлажненном водороде; на второй – окончательное спекание при более высокой температуре в атмосфере сухого водорода; на третьей стадии происходит восстановление поверхностных окислов и обнажение активной металлической поверхности;
- спекание в парах галогенидов ( $NH_4Cl$ ): спекание проходит в присутствии легко диссоциирующихся галогенидов, образующийся при диссоциации хлор способствует очистке поверхности частиц;
- спекание под воздействием ультразвука, осуществляемое наложением на спекаемое тело

ультразвуковых колебаний с частотой 18...20 Гц.

Термодинамическое условие спекания частиц выглядит следующим образом:

$$\sigma_{AB} < \sigma_A + \sigma_B,$$

где  $\sigma_{AB}$  – поверхностная энергия межфазной границы, образовавшейся при спекании;  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$  – поверхностная энергия компонентов сплава.

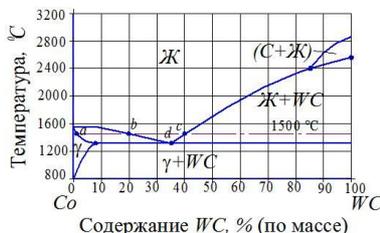


Рис. 2.13. Диаграмма состояния системы Co-WC

Технологические процессы, происходящие при спекании твердых сплавов типа WC-Co с образованием жидкой фазы, можно описать в следующем порядке:

1. При 200...400 °C удаляются пластифицирующие вещества.
2. При 400...700 °C восстанавливаются окислы кобальта, железа и вольфрама.
3. В интервале температур 800...1000 °C свариваются отдельные карбидные зерна в местах их соприкосновения, при этом происходит некоторое упрочнение деталей.
4. При 1150...1300 °C образуются твердые растворы на основе кобальта. Этот процесс сопровождается довольно сильной усадкой.

На диаграмме состояния системы Co-WC (рис. 2.13) окончанию диффузионного растворения соответствует точка *a*, после чего появляется жидкая фаза, количество которой со временем увеличивается, и приблизительно при 20 % WC в растворе (точка *b*) весь кобальт переходит в состав жидкой фазы.

5. При достижении температуры плавления эвтектики (точка *d*), состоящей из кобальта с растворенным в нем WC и углеродом, вступают в действие силы поверхностного натяжения. Это приводит к перемещению их частиц, так называемому «жидкому» трению. Процесс происходит примерно в интервале температур 1300...1400 °C и заканчивается почти полным уплотнением спекаемого изделия.

6. По мере повышения температуры от 1400 до 1500 °C зерна WC продолжают растворяться в жидком кобальте, пока их содержание в нем не достигнет 38 % (точка *c*). Расплав заполняет все промежутки и поры между карбидными зернами.

7. После выдержки при максимальной температуре сплав охлаждается. При охлаждении до 1300 °C растворенный в жидкой фазе WC выпадает на имеющиеся зерна WC, что приводит к их увеличению и усилению контактов между ними.

8. При дальнейшем понижении температуры выделяется углерод, растворенный в кобальте. Охлаждение сплава до комнатной температуры существенно не влияет на деформирование структуры.

Состав твердого сплава WC-Co после охлаждения может быть трехфазным или четырехфазным с появлением η-фазы  
 $Co + WC(Co_3W_3C)$ :

- WC;
- γ-твердый раствор WC в кобальте;
- свободный углерод в количестве 0,5...1,0 %;
- η-фаза –  $Co + WC(Co_3W_3C)$ , которая образуется, как правило, при дефиците углерода.

После спекания изделий при необходимости проводится их дополнительная обработка: электрохимическая (алмазное шлифование) или электрофизическая (электроискровая), пропитка смазочными материалами, термообработка, калибрование, разрезание [5, 11, 13, 14, 16, 17, 20, 25, 26, 28, 29, 58, 59, 61].

Более подробно проектирование изделий из порошковых материалов рассмотрено в приложении на примере получения пластин из твердого сплава.

### Раздел 3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями

В композиционных материалах с одномерными наполнителями присутствуют элементы в форме нитевидных кристаллов, волокон (например, проволока), которые скрепляются матрицей в единый монолит. Матрица защищает упрочняющие волокна от повреждений, передает нагрузку на них и перераспределяет ее в случае разрыва отдельных волокон. Важно, чтобы прочные волокна были равномерно распределены в пластичной матрице.

На свойства волокнистой композиции помимо высокой прочности армирующих волокон и жесткости пластичной матрицы оказывает влияние прочность связи на границе матрица – волокно.

Для армирования КМ с одномерными наполнителями используют непрерывные дискретные волокна с размерами в поперечном сечении от долей до сотен микрометров.

#### Тема 3.1. Упрочнение волокнами (дискуссия – 2 ч.)

Волокно, находящееся в матрице, должно иметь более высокие значения модуля упругости, чем матрица ( $E^B > E^M$ ), что является одним из условий получения КМ с высокими механическими свойствами.

Теоретические знания о КМ предполагают равномерное распределение волокон по объему матрицы, их одинаковую направленность и отсутствие проскальзывания на поверхности раздела матрица–волокно вплоть до разрушения композиции. Таким образом, нагрузка распределяется между волокнами и матрицей, а деформации композиций  $\xi^K$ , матрицы  $\xi^M$  и волокна  $\xi^B$  будут одинаковы ( $\xi^K = \xi^M = \xi^B$ ).

Прочность композиции  $\sigma^K$  в таком случае изменяется в зависимости от объемного содержания упрочняющих волокон  $V^B$  (рис. 3.1).

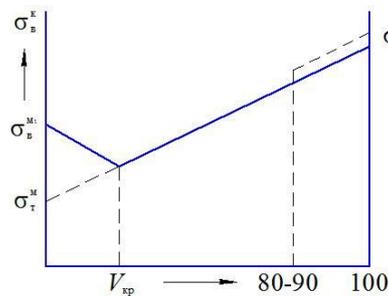


Рис. 3.1. Изменение прочности волокнистого материала в зависимости от содержания упрочнителя

Малая объемная доля волокна в матрице ( $V^B < V_{кр}$ , где  $V_{кр}$  – критический объем волокон) снижает прочность КМ. Волокна, быстро нагружаясь до предельных напряжений, разрушаются, и нагрузку принимает только матрица, которая и определяет прочность композиции. Разупрочняющее действие волокон отмечается вплоть до  $V_{кр}$ , когда в начале происходит разрушение матрицы, а затем дробление волокон.

При увеличении объемного содержания доли волокон ( $V^B > V_{кр}$ ) вся нагрузка перераспределяется на них и прочность КМ определяется прочностью волокон. Их разрушение под действием приложенной нагрузки приводит к быстрому разрушению матрицы.

Таким образом, прочность композиции  $\sigma^K$  складывается из суммарной прочности волокон и матрицы:

$$\sigma^K = \sigma^B V^B + \sigma^M (1 - V^B), \quad (3.1)$$

где  $\sigma^B$  – прочность волокна, МПа;  $V^B$  – объемная доля волокна;  $\sigma^M$  – прочность матрицы, МПа.

Аналогичным образом изменяется и модуль упругости композиции:

$$E^K = E^B V^B + E^M (1 - V^B), \quad (3.2)$$

где  $E^B$  – модуль упругости волокна, ГПа;  $E^M$  – модуль упругости матрицы, ГПа.

Прочность композиции растет до значений объемной доли волокна  $V^B \approx 0,8...0,9$ , поскольку при больших значениях  $V^B$  сложно заполнить пространство между волокнами материалом матрицы, ухудшается их сцепление с матрицей и между ними возможно проскальзывание. Кроме того, в этом случае волокна близко расположены друг к другу, что способствует распространению трещин между ними.

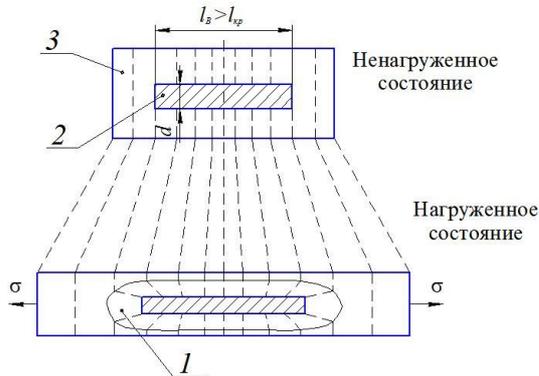
Критический объем упрочняющих волокон в матрице определяют по уравнению

$$V_{кр} = \frac{\sigma^M - \tau_T^M}{\sigma^B - \tau_T^M}, \quad (3.3)$$

где  $\tau_T^M$  – средний предел текучести матрицы в момент разрушения волокон.

Из уравнения (3.3) следует, что увеличение разницы в прочностных характеристиках волокон и матрицы уменьшает критическую объемную долю  $V_{кр}$ , которая может изменяться от 1 до 50 %.

При упрочнении композиции дискретными однонаправленными волокнами матрица передает им нагрузку путем пластической деформации, прямо пропорциональной приложенному напряжению. Волокно, имея более высокий модуль упругости, чем матрица



( $E^B > E^M$ ), ограничивает ее свободное удлинение, что приводит к искажению поля деформации. В зоне, прилегающей к волокну, удлинение матрицы равно его упругому удлинению (рис. 3.2).

Рис. 3.2. Схема совместной деформации дискретного волокна и матрицы: 1 – искаженное поле деформации; 2 – армирующее волокно; 3 – матрица

При увеличении нагрузки максимальные значения напряжений сдвига ограничиваются пределом текучести матрицы  $\tau_T^M$ . Такого значения танген-

циального напряжения достигает на расстоянии  $\frac{l_{кр}}{2}$  от конца волокна. Полное использование упрочняющего действия волокна наблюдается в том слу-

чае, если напряжения в нем не достигнут предела прочности  $\sigma_B^B$ . Критическое значение длины волокна определяют из уравнения равновесия его элементов и элементов матрицы:

$$\frac{1}{4\pi d^2 \sigma_B^B} = \frac{1}{2\pi d l_{кр} \tau_T^M}, \quad (3.4)$$

откуда

$$\frac{l_{кр}}{d} = \frac{\sigma_B^B}{2\tau_T^M}, \quad (3.5)$$

где  $d$  – диаметр армирующего волокна, мм;  $l_{кр}$  – критическая длина волокна, мм.

Таким образом, критическая длина волокна  $l_{кр}$  прямо пропорциональна напряжению его разрушения  $\sigma_B^B$ . Деформация КМ под нагрузкой, приложенной вдоль упрочняющих волокон, проходит в несколько стадий (рис. 3.3).

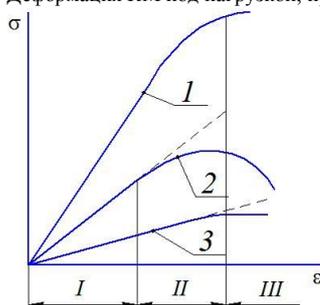


Рис. 3.3. Диаграмма растяжения волокон (1), матрицы (2) и композиции с однонаправленными волокнами (3)

На I-й стадии матрица и волокно деформируются упруго. Механические характеристики  $\sigma_B^B$  и  $E^K$  определяются по формулам (3.1) и (3.2).

На II-й стадии матрица переходит в упругопластичное состояние, а волокна деформируются упруго. Модуль упругости в этом случае определяется по формуле

$$E^K = E^B V^B + \left( \frac{d\sigma^M}{d\varepsilon^M} \right) V^M, \quad (3.6)$$

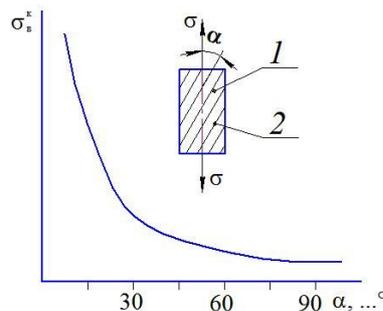
где  $\frac{d\sigma^M}{d\varepsilon^M}$  – скорость деформационного упрочнения матрицы, МПа.

На III-й стадии прочность композиции резко снижается в связи с разрушением хрупких волокон и матрицы.

Волокнистые КМ обладают ярко выраженными анизотропными свойствами, которые существенным образом зависят от угла ориентации волокон относительно действующей нагрузки (рис. 3.4). Этот недостаток устраняется выбором для детали материала с пространственным армированием или конструированием ее из КМ таким образом, чтобы нагрузки действовали вдоль упрочняющего волокна.

Свойства границы раздела матрица–волокно, прежде всего, их адгезионное взаимодействие, определяют свойства композиции и их стабильность в процессе эксплуатации. Поэтому граница, обеспечивающая передачу нагрузки от матрицы на волокно, также отличается постоянством физико-механических свойств. Адгезионная связь при этом сохраняется независимо от напряжений, вызванных различиями в температурных коэффициентах линейного расширения матрицы и волокна.

Рис. 3.4. Зависимость прочности однонаправленной композиции от угла ориентации волокон относительно действующей нагрузки: 1 – матрица; 2 – волокно



При этом сопротивление распространению трещин оказывают силы трения между волокном и матрицей, а при разрушении границ происходит разрыв связей между ними. Энергетические затраты на вытягивание волокон, на разрыв связей между ними и матрицей существенно повышают сопротивление разрушению волокнистых КМ по сравнению с традиционными материалами.

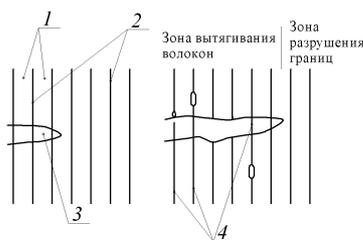
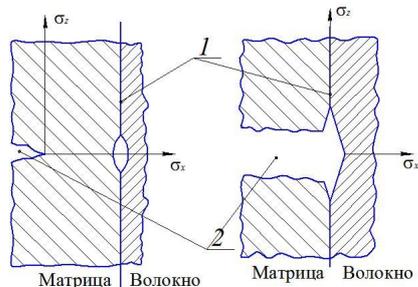


Рис. 3.5. Схематическое изображение трещины в матрице, распространяющейся в композиции перпендикулярно волокнам:  
1 – матрица; 2 – волокна; 3 – трещина в матрице;  
4 – волокна, вытянутые из матрицы

В композиции, состоящей из хрупкой матрицы и хрупкого волокна, вязкость разрушения обеспечивается за счет вытягивания волокон, причем их длина должна соответствовать  $l_b \sim l_{кр}$ , а диаметр  $d_{кр} = d_b$  (см. рис. 3.2). В КМ с хрупкой матрицей и эластичными волокнами вязкость разрушения повышают за счет увеличения диаметра непрерывных волокон, их прочности и объемного содержания. В таких материалах важен не только процесс вытягивания волокон, но и процесс их разрушения. При высокопрочной границе раздела волокна разрушаются при достижении предельной деформации, определяемой раскрытием трещины. Сопротивление разрушению можно повысить снижением прочности связи между волокнами и матрицей. В этом случае прочность композиции на сдвиг и растяжение в перпендикулярном волокнам направлении снижается.



На рис. 3.6 показано, что при возникновении трещины действуют как растягивающие ( $\sigma_z$ ), так и поперечные ( $\sigma_x$ ) напряжения.

Рис. 3.6. Схема расслоения границы матрица-волокно в композиционном материале: 1 – граница раздела; 2 – трещина

При определенном соотношении между ними под действием напряжения  $\sigma_x$  возможно расслоение или разрушение границы волокна с матрицей. Трещина в этом случае распространяется не через волокно, а отводится в направлении, перпендикулярном его оси. Таким образом, рост трещины, способной разрушить материал, в главном направлении тормозится, и она преобразуется во множество мелких ответвленных трещин. Структурные особенности КМ и связанный с этим прерывистый характер распространения в них трещин определяют существенные различия в характерах усталостного разрушения волокнистых КМ от металлов и сплавов. В КМ критическая длина дефекта (трещины) больше, чем в металлах и сплавах, в связи с периодическими остановками ее на расслоениях по границе волокна с матрицей, особенностями разрушения матрицы, дроблением волокон.

При одинаковых условиях испытаний время и число циклов до разрушения у КМ больше, чем у металлов и сплавов.

### Тема 3.2. Армирующие вещества и их свойства (дискуссия – 2 ч.)

Для упрочнения КМ используют высокопрочную проволоку из стали, молибдена, вольфрама и других металлов и сплавов; волокна из бора, углерода, стекла, а также монокристаллы из оксидов, нитридов алюминия, кремния и других соединений (табл. 3.1).

Проволока – наиболее экономичный и доступный армирующий материал. Стальные и бериллиевые проволоки используют в КМ, эксплуатируемых при низких и умеренных температурах, а вольфрамовые и молибденовые – при умеренных и высоких.

Из стальных проволок для армирования применяют проволоки из сталей:

- аустенитного класса (X18H9, X1810T и др.);
- мартенситного класса (30X13, X17H2, 13XMH3Ф3);
- аустенитно-мартенситного класса (20X15H5AM3).

Волочение проволок аустенитного класса проводят с обжатием более 92 %, что резко увеличивает их прочность и значительно снижает пластичность. При получении проволок с мартенситной структурой величина единичных обжатий обычно ниже и определяется температурой в зоне деформации. Их прочность превышает прочность проволоки с аустенитной структурой на 40...50 %. Из сталей мартенситного класса получают высокопрочные проволоки с закалкой в воде или масле с отпуском с температур 950...1000 °С. Так, проволока из стали 30X13 после закалки и отпуска при 200 °С имеет прочность 2000 МПа.

Таблица 3.1

Свойства армирующих веществ, используемых в КМ

Армирующий материал	Температура плавления, °С	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, МПа×10 <sup>-3</sup>	Предел прочности, МПа×10 <sup>-3</sup>	Удельная	
					Прочность, км	Жесткость, км×10 <sup>-3</sup>
<b>Волокно</b> борное углеродное оксид Al	2040	2,63	380...420	2,5...3,5	95...133	14,4...15,4
	3000	1,70	196...296	1,96...2,96	117...176	11,7...17,4
	2054	3,96	500	2,1...2,6	52...65	12,6
<b>Проволока</b> бериллиевая вольфрамовая стальная	1280	1,80	290	1,0...1,3	55...65	15,76
	3400	19,30	400	4,2	21	2,07
	1300	1,80	200	3,6...4,0	45...51	2,56
<b>Нитевидные кристаллы:</b> нитрид Al карбид кремния нитрид кремния	2400	3,30	388	15,0	455	11,5
	2650	3,21	580	37,0	1150	18,0
	1900	3,18	495	15,0	472	15,6

Стали аустенитно-мартенситного класса сохраняют свойства до 480...500 °С. После обработки холодным волочением с суммарным обжатием 80 % и промежуточными отжигами при 450 °С проволока 20X15H5AM3 имеет прочность до 3200 МПа.

Прочность проволок зависит также от диаметра и возрастает с его уменьшением в силу происходящего при волочении упрочнения.

**Проволока из вольфрама и молибдена.** Высокопрочные проволоки из вольфрама, молибдена и их сплавов изготавливают в основном методами порошковой металлургии с последующим волочением.

Волочению подвергают штабики диаметром 2,75 мм, полученные прессованием в пресс-формах при давлении 4...6 тс/см<sup>2</sup> на гидравлических прессах и последующим спеканием при температурах до 3000 °С. Температура волочения составляет 1000 °С на начальных стадиях деформирования и постепенно снижается до 400...600 °С на заключительных. Промежуточные отжиги проводят при 600...750 °С с одновременным волочением проволоки через фильеры диаметром 0,3; 0,12 и 0,05 мм.

Для обеспечения требуемого уровня прочностных свойств при производстве W-проволок используют оксиды ThO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. (табл. 3.2).

Проволока из W-Re сплава до 1100 °С имеет высокую длительную прочность, которая однако уже при 1200 °С становится меньше длительной прочности проволоки, содержащей добавку ThO<sub>2</sub>. Диоксид тория стабилизирует структуру вольфрама и повышает температуру

рекристаллизации.

Высокие прочностные свойства проволок из вольфрама, молибдена, тантала сохраняются до 1200...1500 °С. Молибденовую проволоку получают по той же технологии, что и вольфрамовую. Молибден, отличающийся от вольфрама повышенной пластичностью, обрабатывают при волочении с более низкой температурой (на 100...200 °С ниже, чем вольфрам). Так, без присадок он может деформироваться с диаметра 0,3 мм до 0,02 мм без нагрева.

Чистый молибден подвержен заметному окислению, даже при низких температурах. Отличается малой стойкостью против газовой коррозии при высоких температурах, что объясняется большой летучестью оксида молибдена при температуре выше 773 °С.

Например, молибденовый лист толщиной 1 мм окисляется при 1273 °С и улетучивается за 1 час. Но в атмосфере инертного газа, как и вольфрам, может эксплуатироваться длительное время.

Таблица 3.2

Свойства вольфрамовых проволок диаметром 0,5 мм с различными присадками

Марка проволоки	Температура, °С	Прочность, МПа	Длительная прочность 100 ч, МПа	Предел ползучести, МПа
ВА (W с присадками SiO <sub>2</sub> и Al)	900	1320	630	760
	1000	1130	480	630
	1100	—	350	470
	1200	740	330	380
BT15 (с присадками 2% ThO <sub>2</sub> )	900	—	—	—
	1000	1200	660	830
	1100	1090	440	600
	1200	850	410	520
BP-20 (сплав W с 20% Re)	900	2670	1170	1950
	1000	2140	1060	1300
	1100	1490	420	690
	1200	1390	240	350

Бериллиевая проволока. Бериллий обладает малой плотностью (1800 кг/м<sup>3</sup>) и в сочетании с большой прочностью и модулем упругости Юнга обеспечивает наиболее высокие значения удельных характеристик – прочности и жесткости. Волочение Be-проволок осуществляют с подогревом 400...480 °С. При этих температурах их плотность практически такая же, как у малоуглеродистых сталей. Волочение проводят в металлических оболочках из пластичного металла, например, никеля. После этого оболочку удаляют травлением покрытия и выполняют сглаживание поверхности проволоки электрохимической полировкой. В качестве оболочки может использоваться и материал матрицы композиции, что исключает электрохимическое травление и полирование. Бериллиевая проволока диаметром 1,8 мм при растяжении

$\sigma_B = 1129$  МПа имеет модуль упругости  $E = 320 \times 10^3$  МПа, что соответствует удельной прочности 60 км и жесткости 17 300 км. К недостаткам, препятствующим использованию

Be-проволоки в КМ, относят низкую пластичность бериллия ( $\delta = 1...2\%$ ) и высокую токсичность. Бериллиевая проволока чаще используется для упрочнения матриц с малой плотностью – алюминиевой, магниевой и титановой.

Углеродные волокна получают из полиакрилонитрильного (ПАН) гидроцеллюлозного волокна или из волокон на основе нефтяных смол или пеков.

Технология получения углеродных волокон основана на термическом разложении органических исходных волокон в контролируемых атмосферах.

Процесс производства углеродного волокна из ПАН сводится к последовательному проведению операции окисления, карбонизации и графитизации. Окисление ПАН-волокон осуществляется при 200...300 °С, и на этой стадии переработки создаются условия для формирования оптимальной структуры углерода. Карбонизация проходит при температурах выше 900 °С в атмосфере водорода, при этом исходному материалу придается огнестойкость. При температуре обработки выше 2500 °С происходит графитизация и формируются углеродные волокна. Конечная температура существенно влияет на свойства углеродных волокон. Изменяя температуру графитизации, можно управлять их свойствами.

Структура углеродного волокна представляет собой систему лентообразных слоев конденсированного углерода с гексагональной структурой, называемую микрофибриллами. Группы одинаковых микрофибрилл образуют фибриллы. Размеры поперечного сечения фибрилл колеблются в широких пределах: от сотен до тысяч ангстрем.

В настоящее время освоено производство нескольких типов углеродных волокон, отличающихся уровнем механических свойств. К ним относятся:

– высокопрочные волокна

$$\sigma_B = 2500...3200 \text{ МПа}, \quad E = (180...220) \times 10^3 \text{ МПа};$$

– высокомодульные волокна

$$\sigma_B = 1400...2200 \text{ МПа}, \quad E = (350...500) \times 10^3 \text{ МПа}.$$

Промышленно выпускаются углеродные волокна в виде крученых или некрученых жгутов с диаметром волокон ~ 7 мкм и их числом от 1000 до 160 000 в жгуте. Из углеродных волокон делают ленты различной ширины.

К недостаткам углеродных волокон относятся:

- склонность к окислению на воздухе;
- химическая активность при взаимодействии с металлическими матрицами;
- слабая адгезия с полимерными матрицами.

Данные недостатки устраняются путем нанесения на углеродные волокна металлических и керамических покрытий.

Борные волокна получают осаждением бора из газовой фазы  $BCl_2 + H_2 \rightarrow B + 2HCl$  при 1100...1200 °С на предварительно нагретую и очищенную вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм. В результате осаждения образуется сердцевина из боридов вольфрама (WB; W<sub>2</sub>B<sub>3</sub>; WB<sub>4</sub>) диаметром 15...17 мкм, вокруг которой располагается слой поликристалла бора. Диаметр полученных таким образом частиц бора составляет от 70 до 200 мкм.

Прочность борных волокон зависит от наличия поверхностных и объемных дефектов, а также дефектов на границе раздела сердцевина–оболочка. Поверхностные дефекты устраняются травлением, что приводит к увеличению прочности волокна. Объемные дефекты – это включения крупных кристаллов бора, образующиеся при повышенных температурах (1200...1300 °С) в зоне осаждения или других примесей.

Борное волокно обладает ценным сочетанием свойств, низкой плотностью (2000 кг/м<sup>3</sup>), достаточно высокой прочностью

( $\sigma_B = 3500$  МПа) и температурой плавления 2300 °С. Однако уже при 400 °С оно начинает окисляться на воздухе, а при температуре выше 500 °С происходит его интенсивное взаимодействие с алюминиевой матрицей. Для предотвращения этого на борное волокно наносят покрытие из карбида кремния толщиной 3...5 мкм.

Борные волокна выпускаются промышленностью в виде моноволокон на катушках, а также полуфабрикатов – лент полотняного пле-

тения шириной от 5 до 50 см. Основу полотен образуют борные волокна, а в качестве наполнителей – полиамидные или другие волокна. Волокна бора применяют в производстве композитов на основе полимерной и алюминиевой матриц.

Волокна карбида кремния производят по технологии, похожей на технологию получения волокон бора.

Карбидокремниевые волокна, полученные на углеродной подложке, более дешевые и характеризуются повышенной чувствительностью к поверхностным дефектам с пониженными характеристиками прочности.

Волокна карбида кремния применяют для армированных металлорежущих матриц, предназначенных для эксплуатации при высоких температурах.

Стекланные волокна получают путем пропускания расплавленного стекла при 1200...1400 °С через фильеры диаметром 0,8...3,0 мм и быстрым его вытягиванием до диаметра в несколько микрометров.

Непрерывные волокна диаметром 3...100 мкм, соединяясь в пряжи, наматываются на вращающиеся барабаны и могут иметь длину до 20 км. Они выпускаются с треугольной, квадратной, прямоугольной, шестиугольной и круглой формой поперечного сечения, что позволяет получить более плотную упаковку их в композиции и, таким образом, повысить ее прочность и жесткость. Основой стекланных волокон

является диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ .

В зависимости от природы стеклообразующего вещества стекла делятся на:

- силикатные ( $\text{SiO}_2$ );
- алюмосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ );
- алюмоборосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ) и др.

Щелочные стекла, содержащие добавки  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , имеют пониженную температуру плавления и химическую стойкость вследствие разрыва прочности связи  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ .

Широко используемое для армирования пластиков Е-стекло содержит 54,4 %  $\text{SiO}_2$ , 14,4 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 17,3 %  $\text{CaO}$ , 4,5 %  $\text{MgO}$ , 5 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 0,5 % ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), 0,4 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 0,3 %  $\text{TiO}_2$ . Стекло размягчается при 846 °С, его плотность 2540 кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга –  $73,5 \times 10^3$  МПа.

Высокопрочное S-стекло состава 65 %  $\text{SiO}_2$ , 25 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10 %  $\text{MgO}$  при комнатной температуре имеет прочность  $4,5 \times 10^3$  МПа, а модуль упругости –  $87 \times 10^3$  Па. Прочность стекланных волокон уменьшается при увеличении их диаметра (рис. 3.7).

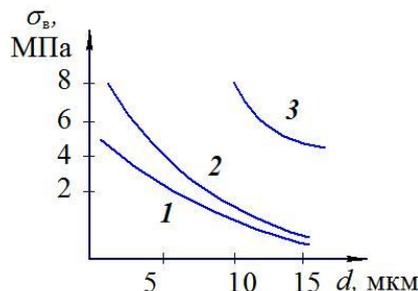


Рис. 3.7. Зависимость прочности волокон из щелочного (1), бесщелочного (2) и алюмоборосиликатного (3) стекол от его диаметра.

Более тонкие волокна содержат меньше дефектов (пор, трещин), но для армирования пластиков они не используются, т.к. многие из них разрушаются (обрываются). Оптимальные значения диаметров волокон для армирования пластиков 5...15 мкм. Для армирования композитов стекловолокна применяют в виде жгутов, нитей, лент, тканей различного плетения, матов.

Нитевидные кристаллы (усы) карбидов и нитридов кремния, оксидов и нитридов алюминия и других тугоплавких соединений получают осаждением из газовой фазы с использованием транспортных реакций, реакций пиролиза, восстановления летучих соединений по методу пар–жидкость–твердая фаза (ПЖТ).

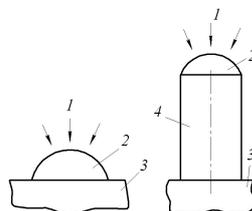


Рис. 3.8. Схема роста кристалла кремния по механизму пар–жидкость–кристалл:

1 – пар; 2 – капля расплава  $\text{Au} - \text{Si}$ ;

3 – кремниевая подложка; 4 – кристалл кремния

Рост кристаллита карбида кремния (по схеме ПЖТ) происходит аналогично выращиванию кристалла кремния (рис. 3.8).

На поверхности кремниевой подложки 3 находится частица золота при температуре, близкой к температуре плавления. В этих условиях золото растворяет кремний и превращается в капельку 2 расплава золото–кремний. Пары кремния, конденсируясь в капельке расплава, пересыщают ее атомами кремния. Это ведет к выделению кремния на границе раздела жидкость–подложка и росту нитевидного кристалла 4, поперечные размеры которого определяются диаметром капли расплава, а скорость роста уса – скоростью кристаллизации поступающего к поверхности капли кремния.

При получении нитевидных кристаллов карбида кремния их выращивание ведут из хлорсиланов и углеводородов по реакциям



В качестве жидкой фазы используют тройные расплавы железо–углерод–кремний, а подложкой служит графит. Процесс проходит при 1250...1350 °С.

Диаметр кристаллита кремния в зависимости от условий получения изменяется от долей до десятков микрон, а его длина достигает

60...80 мкм. В условиях производства для получения нитевидных кристаллов используют периодические, полунепрерывные и непрерывные процессы. В первых двух рост кристаллов происходит на массивных стационарных подложках, а при непрерывном процессе роль подложки выполняют взвешенные в объеме газового потока микроскопические центры кристаллизации.

Непрерывные процессы получения нитевидных кристаллов более производительны, но в этом случае длина кристаллитов меньше, чем у полученных периодическими и полунепрерывными методами.

Промышленные методы производства усов и других соединений (нитридов кремния, алюминия, бора, оксидов алюминия) имеют много общего и аналогичны технологии получения карбидов кремния. Усы и нитевидные кристаллы отличаются совершенством структуры и имеют прочностные свойства, близкие к теоретическим. Свойства наиболее изученных и практически используемых нитевидных кристаллов для армирования КМ приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Свойства некоторых нитевидных кристаллов (усов)

Материал кристаллов	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E \times 10^{-4}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b \times 10^3$ , МПа	Удельная прочность, км	Модуль упругости, км
SiC	2665	3320	49	21,0	650	15 200
B <sub>4</sub> C	2450	2490	45	14,0	550	20 000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3880	64	28,0	525	10 700
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1675	3320	31	14,0	425	12 000
Cr	1665	7500	23	9,0	125	3200
Fe	1540	6370	20	13,3	200	3200
Графит	3640	1660	71	19,9	1075	42 500

Усы графита, обладая высокими показателями удельной прочности и жесткости, неустойчивы в металлических матрицах при высоких температурах. Нитевидные кристаллы металлов из-за высокой плотности обнаруживают пониженную удельную жесткость по сравнению с соответствующими характеристиками усов тугоплавких соединений (SiC, B<sub>4</sub>C и др.). Усы металлов склонны к разупрочнению при переработке, несовместимы с металлическими матрицами и непригодны для армирования металлических матриц. Нитевидные кристаллы SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладают лучшей совместимостью с металлами, стойки к воздействию влаги, истиранию при переработке. Обладая лучшими высокотемпературными свойствами, усы SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других тугоплавких соединений являются хорошими упрочнителями композиционных материалов с металлической матрицей.

Органические волокна – это волокна на основе ароматических полиамидов. Они широко применяются для армирования пластиков, отличаются высокопрочными и высокомодульными характеристиками. К органическим относится термическое волокно типа «герлон» с рабочей температурой 300 °С и «кевлар» (табл. 3.4). При этих температурах волокна сохраняют до 50 % начальной прочности, а при криогенных – свою первоначальную прочность.

Таблица 3.4

Некоторые механические свойства волокна «Кевлар»

Свойства	Кевлар	Кевлар 29	Кевлар 19
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1440	1440	1450
Удлинение, %	4,0	3...4	2,8
Прочность $\sigma_b$ , МПа	1850	1940	2540
Модуль упругости $E$ , ГПа	75,0	80	140
Усадка, % при $t = 150$ °С	0,2	0	–

### Тема 3.3. Методы получения металлических композиционных материалов, армированных волокнами

Металлические композиционные материалы (МКМ) представляют собой такие материалы, в которых матрицей являются металлы и их сплавы, а арматурой – металлические и неметаллические волокна. Применение высокопрочных и высокомодульных волокон значительно повышает физико-механические характеристики МКМ, а использование металлической матрицы увеличивает прочность материала в перпендикулярном волокнам направлении (трансверсальную) и прочность при сдвиге до значений, сопоставимых с аналогичными величинами металлов, так как прочность при сдвиге КМ определяется в основном свойствами матрицы.

Металлическая матрица требует значительно более интенсивных в температурном и силовом отношении технологических методов и, кроме того, производство элементов конструкций из МКМ неразрывно связано с технологией получения самих МКМ. В настоящее время на базе металлургических производств организован выпуск полуфабрикатов из МКМ в виде листов, труб и профилей.

Технологическую схему производства полуфабрикатов и деталей из МКМ можно представить следующим образом:

- 1) очистка поверхностей волокон и матрицы (мойка, чистка, сушка);
- 2) объединение волокон и матрицы – сборка чередующихся слоев матричных элементов и волокон либо приготовление волокон в литейной форме под заливку матричным металлом;
- 3) получение компактных МКМ методами пластической деформации, порошковой металлургии, комбинированными методами (пластической деформацией в сочетании с методами порошковой металлургии).

Важнейшим в технологии МКМ является этап совмещения армированных волокон с матричным материалом. Способы совмещения можно разделить на следующие виды:

- твердофазные;
- жидкофазные;
- методы напыления-осаждения.

Для твердофазных методов характерно использование матрицы в твердом состоянии преимущественно в виде порошка, фольги или тонкого листа. Процесс изготовления МКМ заключается в сборке пакета заготовок, состоящего из чередующихся слоев матричного материала и упрочняющих волокон и последующего соединения компонентов между собой различными методами: диффузионной сваркой, сваркой взрывом, пластическим деформированием, спеканием и т.п.

Жидкофазные методы предусматривают получение МКМ совмещением армирующих волокон с расплавленной матрицей. К ним относятся различные методы пропитки волокон жидкими матричными материалами.

Процесс изготовления МКМ методами осаждения-напыления предусматривает нанесение на волокна различными способами (газо-

фазным, химическим, электролитическим, плазменным и т.п.) матричного материала и заполнение им межволоконного пространства.

Комбинированные методы включают последовательное или параллельное применение первых трех методов (например, плазменное напыление и горячее прессование, горячее прессование и последующая прокатка и т.д.).

Выбор метода получения МКМ определяется природой матрицы и волокна, возможностью совмещения компонентов с обеспечением необходимой между ними связи на границе раздела, особенностью процесса, позволяющего одновременно получить материал и деталь, экономичностью, наличием оборудования и т.д.

Несмотря на то что в настоящее время лишь небольшое число МКМ находится в стадии внедрения, а возможности их применения ограничиваются авиационной, ракетно-космической и атомной техникой, в дальнейшем МКМ найдут самое широкое применение и будут способствовать технологическому усовершенствованию свойств обычных материалов и заменяет широкую гамму обычных конструкционных материалов.

Рассмотрим более подробно основные методы получения МКМ, применяемые в сегодняшней практике.

*Метод твердофазного совмещения матрицы и волокон.* Одним из наиболее часто применяемых методов изготовления МКМ, состоящих из деформируемых матричных металлов и сплавов, является обработка давлением.

Если в качестве арматуры выбраны волокна со значительным запасом пластичности, то уплотнять МКМ можно прокаткой, импульсным прессованием с помощью взрыва или ударной нагрузки, гидрокстружией и т.п.

В случае армирования металлов хрупкими или малопластичными волокнами чаще всего применяют методы, при которых степень пластической деформации невысока, например, диффузионную сварку или прокатку с малыми обжатиями.

В зависимости от формы полуфабриката используют различные способы сборки заготовок, подвергаемых пластической деформации.

Листовые заготовки собирают способом нанесения монослоев или способом «сэндвич» пакетов. Заготовки типа «сэндвич» изготавливают путем укладки в пакет слоев волокон (сеток, матов, тканей) и матричных слоев фольги, соблюдая при этом определенную, требуемую схему и степень армирования. Нужную степень армирования в заготовке обычно обеспечивают за счет использования матричной фольги различной толщины, волокон различных диаметров, укладки различного числа слоев арматуры. Способом «сэндвич» пакетов получают заготовки только с продольно-поперечным расположением волокон.

Способ монослоев, схема которого представлена на рис. 3.9, позволяет собирать заготовки, в которых слои волокон могут быть ориентированы под различными углами друг к другу в соответствии с требованиями наилучшего восприятия внешних нагрузок.

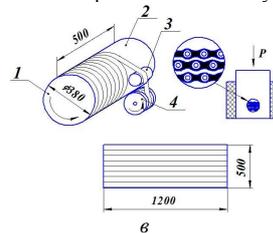


Рис. 3.9. Схема формирования МКМ А1-В

способом нанесения монослоев: а – получение заготовки; б – прессование заготовки; в – заготовка; 1 – барабан; 2 – алюминиевая фольга; 3 – натяжное устройство; 4 – бобина бороволокна

При сборке заготовок этим способом осуществляют намотку бороволокна с требуемым шагом и углом намотки с бобины 4 на цилиндрический барабан-оправку 1, на котором закреплен слой алюминиевой фольги. Для фиксации расположения укладки, волокна закрепляют на фольге 2 беззольным клеем в местах, по которым в дальнейшем фольга разрезается. Снятые с барабана монослои укладывают в нужном порядке в стопку и уплотняют прессованием.

Трубчатые и прутковые заготовки получают прокаткой, экструзией и волочением (рис. 3.10). Армированный монослой (рис. 3.10, а), состоящий из матричной рифленой фольги 1 и матричной полосы 2, между которыми расположены волокна 3, сворачивают в плотный рулон (рис. 3.10, в), подлежащий последующему уплотнению.

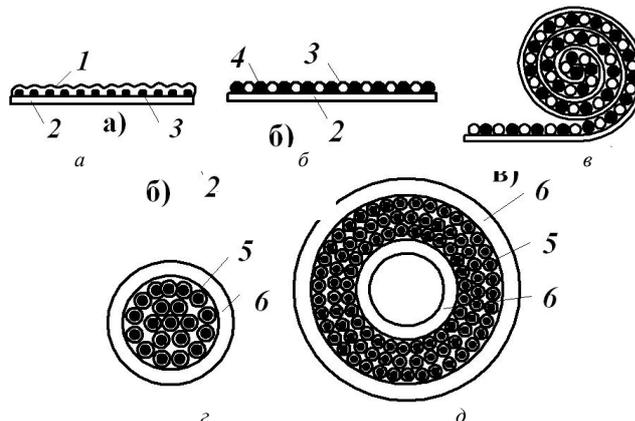


Рис. 3.10. Схемы получения армированных рулонных прутковых заготовок (а – в) и трубчатых заготовок из биметаллической проволоки (г, д): а – армирующий монослой; б – полоса с армирующими и матричными волокнами; в – сворачивание армированной полосы в рулон; 1 – матричная рифленая фольга; 2 – матричная полоса; 3 – армирующее волокно; 4 – волокно из металла матрицы; 5 – биметаллическое волокно; 6 – трубчатая оправка

Другим методом получения прутковых заготовок, в которых арматура ориентирована вдоль оси прутка (рис. 3.10, г), можно назвать укладку в трубу 6 волокон с нанесенным на них матричным покрытием (биметаллическое волокно 5). Если укладку биметаллических волокон провести между внутренней и наружной трубами 6, то можно получить трубчатую заготовку МКМ. Уплотняют такие заготовки гидрокстружией или волочением. Трубчатые заготовки можно также получить совместной намоткой армирующего и матричного волокон.

Наиболее производительный способ производства армированных лент и листов – прокатка (рис. 3.11). По этой технологии между вальцами 4 прокатного стана уплотняют либо матричные ленты и арматуру в виде непрерывных волокон (сеток, листов), либо ленты 1, 3 с расположенными между ними дискретными элементами. Прокаткой можно получить и армированные профили. Для этого используют сортовые прокатные станы, в калибры которых подают матричные ленты вместе с волокнами.

Для уплотнения заготовок типа «сэндвич», а иногда для изготовления готовых деталей из МКМ применяют диффузионную сварку. Отличительным признаком этого процесса является отсутствие больших пластических деформаций, поэтому диффузионная сварка незаменима при получении МКМ, армированных хрупкими волокнами. Особенно большими возможностями она обладает, если осуществляется под давлением в газостате или автоклаве.

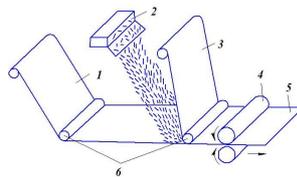


Рис. 3.11. Схема непрерывного процесса прокатки металлических армированных полос: 1, 3 – размотчики полос; 2 – бункер для дискретных волокон; 4 – рабочая клетка прокатного стана; 5 – армированная полоса; 6 – ролик

При динамическом горячем прессовании для уплотнения пакета используют энергию удара. Предварительно пакет равномерно прогревают, затем переносят под молот и наносят удар его падающими частями с заданной энергией. При таком методе получения МКМ нельзя использовать хрупкие волокна.

Сварка взрывом – весьма перспективный метод получения МКМ как в виде полуфабрикатов (листов, труб), так и в виде готовых изделий. Он не требует нагрева перед деформацией, что позволяет сохранить исходную прочность армирующих волокон.

В табл. 3.5 представлены свойства однонаправленных МКМ, полученных методами твердофазного совмещения.

Таблица 3.5

Свойства однонаправленных композиционных материалов с алюминиевой и магниевой матрицей

Свойства	Алюминий-стальная проволока		Алюминий-борное волокно	Магний-борное волокно
	Содержание волокна, объем, %			
	25	40	50	45
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4100	4800	2650	2200
Прочность при растяжении, МПа: при 293 К				
при 627 К	1177	1569	1128	1226
Модуль упругости, МПа	735	784	834	883
Длительная прочность за 100 ч при 673 К, МПа	102 970	117 680	235 360	196 133
Усталостная прочность на базе 10 <sup>7</sup> циклов, МПа				
Коэффициент термического расширения × 10 <sup>6</sup> , К <sup>-1</sup>	392	441	637	588
	294	343	588	539
	–	11,8	6,0	6,5

Методы жидкофазного совмещения матрицы и волокна различаются между собой условиями пропитки армирующего наполнителя, а именно:

- пропитка расплавом при нормальном давлении;
- вакуумное всасывание;
- пропитка расплавом под давлением;
- комбинированные методы пропитки (с использованием давления и вакуума, центробежных сил и т.д.).

Условия пропитки в основном определяются свойствами расплавленной матрицы и ее способностью к смачиванию волокон. Металлические матрицы, как правило, плохо смачивают керамические армирующие волокна. Однако увеличить эту способность удастся путем введения в расплав легирующих веществ: титана, хрома, циркония и других металлов.

Пропитка волокон расплавом матрицы при нормальном давлении (этот метод иногда называют методом непрерывного литья КМ) является наилучшим способом изготовления изделий сложной формы и полуфабрикатов в виде прутков, труб, профилей и т.д. Этот метод применим в тех случаях, когда волокна термодинамически стабильны в расплавленной матрице. Самый простой вариант этого метода заключается в укладке волокон в литейную форму и заливке в нее расплавленного металла матрицы. Перспективной и наиболее широко применяемой разновидностью метода пропитки расплавом при нормальном давлении является непрерывная пропитка пучка волокон (рис. 3.12). В табл. 3.6 представлены свойства МКМ магний-бор (Mg-B), полученных этим способом.

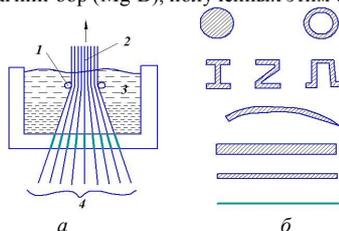


Рис. 3.12. Схема процесса непрерывной пропитки жидким металлом (а) и получаемые виды изделий (б): 1 – ограничители пучка волокон; 2 – композитный пучок; 3 – расплавленный металл; 4 – разделенные волокна

Таблица 3.6

Свойства МКМ Mg-B, полученных методом пропитки

на, объемн., %	Содержание волокон, %	Прочность, МПа			Модуль упругости при растяжении, ГПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
		при растяжении	при изгибе	при сжатии		
25	–	–	1130	–	105	1960
35	–	–	–	2090	–	2000
65	–	–	–	3190	–	2300
75	1350	1600	–	–	329...343	2400

Для упрочняющих волокон, склонных к окислению при нормальных условиях, при переработке их в МКМ необходимо применять защитную атмосферу либо вакуум. Так, методом пропитки в вакууме получают МКМ на основе алюминия и магния, упрочненные борными волокнами, и композиты на основе никелевых сплавов, упрочненные вольфрамовой проволокой, и др.

При получении углеалюминия (Al-C) также применяют метод пропитки, используя при этом две разновидности:

- протяжку углеродного жгута через матричный расплав с последующим формованием пропитанных жгутов;
- принудительную пропитку каркаса из углеродных волокон, уложенных в пресс-форме.

В обоих случаях характеристики материалов получаются примерно одинаковыми.

Газофазные методы осаждения-напыления. Осаждение-напыление – это газофазные, химические и электрохимические процессы получения МКМ, главной технологической особенностью которых является нанесение на волокна покрытий из матричного материала, заполняющего межволоконное пространство и образующего матрицу МКМ.

Преимущества методов:

- отсутствие разупрочнения волокон, поскольку они в процессе формообразования изделий из МКМ не подвергаются воздействию высоких температур или значительным механическим нагрузкам;
- исключение возможности нежелательного контакта волокон друг с другом;
- возможность формообразования полуфабрикатов и изделий сложной геометрической формы;
- непрерывный процесс введения матрицы, в том числе в промышленных масштабах.

Главным недостатком методов осаждения-напыления является трудность использования в качестве матриц сложнелегированных сплавов.

В практике производства МКМ наибольшее применение получили методы газотермического (плазменного) напыления и электролитического осаждения. Плазменное нанесение покрытий (рис. 3.13) заключается в следующем: наносимый материал матрицы в виде порошка или проволоки подводится к плазменной струе, температура которой около 15 000°С, расплавляется и, подхваченный сильным потоком плазмообразующего газа (например, аргона), направляется к поверхности изделия. Двигаясь с большой скоростью (150 м/с), частицы материала при ударе о поверхность подложки (металлическая фольга) прочно соединяются с уложенными на ней определенным образом волокнами. Полученный таким образом МКМ требует дальнейшей обработки давлением или диффузионной сваркой.

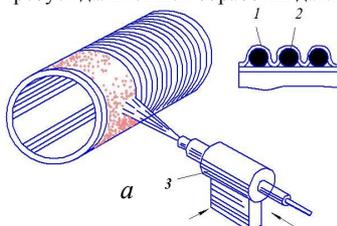


Рис. 3.13. Схемы плазменного напыления монослойных заготовок (а) и цилиндрической детали (б):

1 – напыляемый материал; 2 – волокно; 3 – плазмотрон

Промышленно серийно выпускаются различные плазмотроны для напыления порошка и проволоки.

При изготовлении МКМ методом электролитического осаждения (рис. 3.14) волокно перематывается с катушки на специальную металлическую оправку, служащую катодом. Оправка частично погружена в электролит и совершает вращательные движения с заданной скоростью. Анод, изготавливаемый из осаждаемого металла матрицы, размещается на определенном расстоянии.

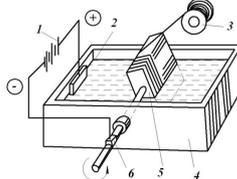


Рис. 3.14. Схема изготовления МКМ

способом электролитического осаждения: 1 – источник питания; 2 – анод; 3 – катушка с волокном;

4 – ванна с электролитом; 5 – катод-оправка; 6 – токосъемник

В результате осаждения материала анода на оправку образуется, как правило, плотный, малопористый материал, который фактически не требует дальнейшего уплотнения методом прессования, спекания или прокатки. Однако при использовании волокон бора или металлических волокон диаметром 100 мкм и более в процессе формирования МКМ образуется пористость. В табл. 3.7 представлены свойства никелевых МКМ, полученных способом электролитического осаждения.

Химические способы позволяют наносить металлические покрытия на непроводящие ток упрочнители (например, сапфир).

Таблица 3.7

Свойства никелевых МКМ

Наполнитель	Содержание волокна, объ-емн., %	Прочность при растяже-нии, МПа	Модуль упругости при растя-жении, ГПа
Вольфрамовое волокно Ø50...100 мкм	16	1050	189
	20	1190	175
	30	1160	210
	50	1640	238
Борное волокно Ø100 мкм	15	800	196
	23	840	210
	35	1120	224
	42	1310	224
Волокно карбида кремния	20	700	210
	40	1050	280
	50	1300	315

#### Области применения металлических композиционных материалов

МКМ применяют в различных областях современной техники, где они работают при низких, высоких и сверхвысоких температурах, в агрессивных средах, при статических, циклических, ударных, вибрационных и других нагрузках. Наиболее эффективно их применение в конструкциях, особые условия работы которых не допускают использование традиционных металлических материалов.

В настоящее время особое внимание уделяется боралюминию, как одному из самых наиболее исследованных материалов, определяющих возможность применения МКМ в авиационно-космических конструкциях. Например, применение боралюминия в планерах самолетов позволяет снизить массу на 25 %, и увеличить за счет этого полезную нагрузку на 115 % без уменьшения скорости и дальности полета.

Первый отечественный МКМ на основе боралюминия, разработан в ВИАме, получен с помощью диффузионной сварки. При объемном содержании волокон бора 50 % и их прочности 2500 МПа предел прочности и модуль упругости МКМ составляют соответственно 1100 МПа и 260 ГПа.

Боралюминий практически сохраняет высокую прочность и упругость до температур 400...500°С. Существенно увеличить рабочие температуры боралюминиевых материалов можно, используя волокна из бора с нанесенным защитным покрытием карбида кремния.

Об эффективности применения МКМ в авиационной технике можно судить на примере их использования в конструкции самолета ИЛ-62. Боралюминий обеспечивает снижение его взлетной массы при сохранении летных характеристик на 17 %, увеличение дальности полета на 15 %, полезной нагрузки на 20 % [14].

Использование боралюминиевых композиций эффективно в космических летальных аппаратах, узлах конструкций, подвергающихся нагреву, в герметических кабинах, а также для элементов, обеспечивающих жесткость панелей, кожухов, юбок ракетного двигателя, соединительных отсеков ступеней баллистических ракет.

Легкие МКМ с алюминиевой матрицей, армированной углеродными высокомодульными волокнами, хотя и обладают пределом прочности немногим выше, чем у лучших промышленных алюминиевых сплавов, однако имеют значительно более высокий модуль упругости (140...160 вместо 70 ГПа) при меньшей плотности (2300 вместо 2750 кг/м<sup>3</sup>). Особенно велика разница в удельной жесткости, которая у углеалюминиевой композиции в 2,5 раза выше, чем у стандартных сплавов. Углеалюминий отличается высокой усталостной прочностью, которая находится на том же уровне, что у титана и легированных сталей, а также обладает малым коэффициентом температурного расширения при изменении температуры в интервале 20...400°C. Указанные свойства дают основание конструкторам использовать углеалюминиевые МКМ в конструкциях таких высоконагруженных деталей, как корпус и силовые лопатки турбин двигателей самолетов, вертолетов и ракет.

Углеродные волокна используют также в композициях с медными, свинцовыми, цинковыми матрицами в изделиях различного назначения, для которых требуется высокая износостойкость, малый коэффициент трения, высокая электропроводность, хорошая термостабильность и способность сохранять высокие прочностные и другие свойства при нагреве. Например, армирование свинца углеродными волокнами дает возможность получить МКМ с пределом прочности и модулем упругости более чем в 10 раз выше, чем у неармированного. Это позволяет использовать углесвинец как конструкционный материал для оборудования и аппаратуры, обладающей высокой стойкостью в агрессивных средах, способностью подавлять звуковые колебания, поглощать гамма-излучение и т.д. Для изготовления подшипников, работающих без смазки, успешно опробован антифрикционный МКМ на основе свинца, армированного проволокой из нержавеющей стали или оловянистой бронзы.

Введение арматуры из вольфрама или молибдена в медную и серебряную матрицу позволяет получить износостойкие электрические контакты для сверхмощных высоковольтных выключателей. МКМ на основе никеля и хрома, армированные нитевидными кристаллами оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также композиции, в которых матрица изготавливается из жаропрочных сплавов, а арматура – из высокопрочных тугоплавких волокон, перспективны для изготовления жаропрочных деталей газотурбинных двигателей.

#### Композиционные материалы с алюминиевой матрицей

Технический алюминий и его сплавы АМц, АМг6, АД1, Д16, Д16Т, САП (дисперсно-упрочненный алюминий) и другие используют в качестве матриц композиционных материалов. Армирование матриц выполняют высокопрочной стальной (08Х18Н9Т, 1Х15Н4АМ3, ЭП322 и др.) или бериллиевой проволокой, а также волокнами бора, карбида кремния, углерода.

Композиции, упрочненные стальными проволоками, получают методом прокатки между вальками прокатного стана «сэндвичей» из алюминиевой фольги и волокон до компактного состояния. Режим прокатки определяется температурой, направлением и степенью деформации. Температура разупрочнения стальных волокон определяет температуру прокатки композиции алюминий-сталь, которая составляет, например, 380...400 °С – при использовании в качестве упрочнителя проволоки из стали 08Х18Н9Т и 12Х18Н10Т; 420...450 °С – при использовании волокон из стали 15Х15Н4АМ3 и ЭП322, имеющих более высокую температуру разупрочнения (400 и 450 °С соответственно). Направление деформации при прокатке выбирают под некоторым углом к направлению армирующих волокон, для того чтобы избежать их обрыва при продольной прокатке и искривления при поперечной.

Промышленно освоено выпуск композита КАС-1, в котором упрочнителем является проволока 1Х15Н4АМ3 диаметром 0,15 мм, а матрицей – алюминиевые сплавы. Механические свойства листов композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированных стальной проволокой, приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Механические характеристики композиций с алюминиевой матрицей, армированной стальными проволоками

Материал матрицы	Наполнитель		Плотность, т/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Модуль упругости E×10 <sup>-3</sup> , МПа
	материал проволоки	количество, %			
АД1	Х18Н9Т1850	7...24	3,1...3,9	160...465	100
АМг6	Х18Н9Т2000	5...20	2,9...3,7	390...630	70...90
АМг6	ЭП3222700	5...25	2,9...4,0	420...1000	80...101
САП1	1Х15Н4АМ34200	40	4,8	1700	100

В результате армирования алюминиевой матрицы прочность композиции увеличивается в 10...12 раз при объемной доле упрочнителя до 25 %, а при ее увеличении до 40 % временное сопротивление прочности композиции может достигать 1700 МПа.

Алюминиевая матрица, армированная стальной проволокой (25...40 %), по прочностным свойствам превосходит высокопрочные алюминиевые сплавы и приближается к уровню аналогичных свойств титановых сплавов. Если матрицей служит алюминиевый сплав, упрочняемый термической обработкой, то прочность алюминий-стальной композиции можно дополнительно повысить холодной пластической деформацией и закалкой с последующим старением.

При повышенных температурах прочность алюминий-стальной композиции выше, чем у теплостойких алюминиевых сплавов. Для работы в таких условиях рационально в качестве матрицы использовать дисперсионно-упрочненные материалы типа САП. Введение стальной проволоки в такую матрицу увеличивает прочностные свойства композиции. Так, предел прочности композиции САП-1 с 15 %

проволоки Х18Н9 ( $\sigma_b = 1750$  МПа) при температуре 250 °С и давлении 415...435 МПа в 2,3 раза больше, чем предел прочности неармированного сплава САП-1 при тех же температурах, при 350 °С – в 3,9 раза, при 500 °С – в 5,6 раза [16, 17].

Композиция САП-1 – стальная проволока имеет удовлетворительную термическую стабильность микроструктуры при высоких температурах. На границе матрица–волокно при 450 °С в течение 150 ч под нагрузкой не происходит образования интерметаллических соединений.

Композиция А1 – волокно бора отличается высокой прочностью и жесткостью и способна работать при 400...500 °С, поскольку бор мало разупрочняется с повышением температуры.

Основная проблема при армировании алюминия волокнами бора – предотвращение взаимодействия их частиц. Поэтому промышленный КМ, содержащий 50 % волокон бора, получают диффузионной сваркой пакета, составленного из чередующихся листов алюминиевой фольги с закрепленными на них слоями борных волокон. Покрытие борного волокна нитридом бора или карбидом кремния снижает его взаимодействие с алюминиевой матрицей даже в расплавленном состоянии. В этом случае возможно получение КМ жидкофазными методами.

Увеличение объемного содержания бора увеличивает прочность и жесткость композиции А1-В (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Прочность и жесткость композиции А1-В в зависимости от содержания волокон бора

Содержание волокон бора, %	0	10	20	30	40	50
(об.)						
Прочность, МПа	70...	300...	500...	700...900	900...	1100...1400
Модуль упругости E×10 <sup>-3</sup> , МПа	140	380	650	1000	1140	1400
	70	105	135	180	200	257

Например, прочность и модуль упругости композиционного материала ВКА-1 при температуре до 500 °С превосходят соответствующие характеристики высокопрочного сплава В95 и сплава АК4-1. Наиболее значительно преимущество КМ при 250...400 °С. Модуль упругости ВКА-1 с повышением температуры меняется незначительно и составляет: при содержании волокон бора 30 % – 136 000 МПа; при 50 % – 228 000 МПа. Плотность материала ВКА-1 – 2650 кг/м<sup>3</sup>, а удельная прочность – 45 км [16, 17].

Производство КМ с углеродными волокнами связано с большими технологическими трудностями вследствие взаимодействия угле-

рода с металлической матрицей при нагреве. В результате отмечается понижение прочности материала. Поэтому такие композиции получают быстрым протягиванием пучка углеродных волокон через расплав алюминия.

Параметры прочности алюминиево-углеродных композиций из-за большого разброса характеристик углеродных волокон, различия в технологических режимах процессов производства полуфабрикатов и изделий из этого материала имеют широкий диапазон значений. При объемной доле упрочнителя 18...53 % прочность композиции Al – углеродное волокно вдоль расположения волокон составляет от 150...400 до 500...1000 МПа, а модуль Юнга – (116...168)×10<sup>3</sup> МПа.

Добиться улучшения свойств композиционного материала можно, совершенствуя технологию его изготовления. Так, КМ с титановой матрицей армируют с целью увеличения модуля упругости и повышения рабочих температур, что резко активизирует способность матрицы к газопоглощению и взаимодействию со многими упрочнителями (бором, карбидом кремния, оксидом алюминия и др.).

#### **Композиционные материалы на никелевой основе**

Армированию обычно подвергаются жаропрочные никелевые сплавы для увеличения времени их работы и рабочих температур до 1100...1200 °С. При этом в качестве упрочнителя применяют нитевидные кристаллы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (усы), проволоки тугоплавких металлов и сплавов на основе вольфрама и молибдена, волокна углерода и карбида кремния.

Армирование никеля и нихрома усами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выполняют, используя методы порошковой металлургии. Для улучшения прочности связи волокно–матрица в шихту вводят титан и хром. Прочность композиции при содержании 9 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> достигает 1800...2100 МПа.

Наиболее широкое распространение получило армирование жаропрочных никелевых сплавов вольфрамовой проволокой. КМ в этом случае получают способами пластического деформирования: прокаткой, сваркой взрывом.

Так, методом динамического прессования в вакууме пакетов из чередующихся слоев жаропрочного никельхромовольфрамового сплава и проволоки ВТ15 диаметром 0,15...0,18 мм получают композицию, отличающуюся повышенной кратковременной прочностью при 1100...1200 °С по сравнению с неармированной.

Модуль упругости композиции увеличивается с ростом содержания упрочнителя согласно закону аддитивности и при 34 % проволоки ВТ15 составляет 265×10<sup>3</sup> МПа, а длительная прочность при выдержке 100 ч при 1100 и 1200 °С равна соответственно 104 и 55 МПа. Однако длительная работа композиции приводит к разупрочнению арматуры в связи с происходящими в проволоке ВТ15 рекристаллизационными процессами, ускоряемыми действующей нагрузкой и диффузией никеля и хрома из матрицы и волокна.

#### **Композиционные материалы на неметаллической основе**

В композиционных материалах на неметаллической основе в качестве матрицы используют отвержденные эпоксидные, полиэфирные, фенольные, полиамидные и другие смолы. Наиболее распространены композиции, армированные стеклянными, углеродными, органическими, борными и другими видами волокон.

Композиты, армированные однотипными волокнами, получают названия по упрочняющему волокну. Так, композицию, содержащую наполнитель в виде длинных стекловолокон, располагающихся ориентированно отдельными прядями, называют ориентированным стекловолокнитом, а содержащую короткое волокно – неориентированным. В том случае, если упрочнителем является стеклоткань, композицию называют стеклотекстолитом. Если упрочняющим волокном служит углеродное, такой КМ называют углеволокнитом, борное – бороволокнитом, органическое – органоволокнитом.

Композиционные материалы с полимерной матрицей (пластики) обнаруживают целый ряд достоинств, среди которых следует назвать высокие характеристики удельной прочности и упругости, стойкость к воздействию агрессивной среды, хорошие антифрикционные и фрикционные показатели наряду с высокими теплостойкими и амортизационными свойствами. В настоящее время пластики получают все большее распространение по причине простоты, технологичности и дешевизны производства деталей из них.

Вместе с тем пластики имеют недостатки: низкую прочность и жесткость при сжатии и сдвиге, снижение прочности при повышении температуры до 100...200 °С, изменение физико-механических характеристик при старении и воздействии климатических факторов.

В пластиках усилие от матрицы к армирующему элементу передается за счет сил межмолекулярного взаимодействия и носит адгезионный характер. Обеспечить прочную связь между ними можно при полном смачивании упрочняющих волокон жидкой связующей. В этом случае поверхностная энергия волокна должна быть больше поверхностного натяжения жидкой матрицы. Жидкая эпоксидная смола, обладающая энергией поверхностного натяжения  $5 \cdot 10^{-5}$  Дж/м<sup>2</sup>, лучше других полимеров смачивает углеродные и борные волокна, энергия поверхности которых имеет следующие значения: (2,7...5,8) · 10<sup>-5</sup> Дж/м<sup>2</sup> и 2 · 10<sup>-5</sup> Дж/м<sup>2</sup> соответственно. На практике достичь повышения этой энергии можно, например, способом травления, окисления или вискеризации [34].

Изделия из КМ с полимерной матрицей стараются получать одновременно с производством самих композиций. Несмотря на сравнительно большую трудоемкость процесса, в этом случае удается наиболее полно реализовать преимущества композиции и существенно снизить себестоимость детали.

Технология производства изделий с полимерной матрицей, армированной волокнами, включает следующие основные операции:

- 1) подготовка упрочняющих волокон:
  - удаление загрязнений;
  - нанесение на поверхность водоотталкивающих покрытий;
  - перемотка и укладывание волокон (лент) в однонаправленную полосу;
- 2) приготовление связующего:
  - проверка компонентов связующего;
  - приготовление смеси компонентов (компаунд);
- 3) пропитка:
  - пропитка волокон связующим;
  - подсушивание и частичное отверждение;
- 4) формование;
- 5) полное отверждение;
- 6) удаление оснастки;
- 7) контроль качества изделий;
- 8) механическая доработка и соединение с другими деталями.

### **3.4. Свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей (дискуссия – 2 ч.)**

**Стеклопластики** (стекловолокниты) содержат в качестве наполнителя стеклянные волокна:

- непрерывные – в виде нитей, жгутов, полос (тканей различного плетения);
- дискретные (рубленные или штапельные).

В ориентированных однонаправленных стекловолокнитах упрочняющие непрерывные волокна расположены в одном направлении – направлении действия нагрузки. Такие композиции отличаются анизотропией свойств и имеют наибольшую прочность и жесткость вдоль волокон. Этот недостаток отсутствует в перекрестно армированных ориентированных стеклопластике, в которых волокна расположены по различным направлениям. Так, стекловолокнистый анизотропный материал (СВАМ) содержит стеклянные нити, которые на выходе из фильера склеиваются между собой в полосы, а затем укладываются под углом 90°. Связующим в них являются различные смолы.

При равном соотношении продольных и поперечных слоев СВАМ имеет следующие характеристики:  $\sigma_b = 460...500$  МПа; модуль упругости  $E \geq 35000$  МПа. В случае соотношения слоев 10:1 предел прочности возрастает до 850...950 МПа, а модуль упругости – до 58000 МПа. Однонаправленный стекловолокнит, армированный высокопрочным волокном ВМ-1, имеет предел прочности

в направлении волокон 2100 МПа и модуль упругости 70 000 Мпа [12].

Прочность стеклопластиков зависит от объемного содержания наполнителя и повышается с его увеличением по закону аддитивности. Оптимальное содержание наполнителя составляет 65...67%. При большем содержании волокон возрастает пористость связующего, что вызывает неравномерную нагрузку на волокна. Уменьшая диаметр волокон и вводя в матрицу монокристаллы  $Al_2O_3$ , добиваются увеличения прочности стеклопластиков до 2000...2400 МПа. Наибольшая ударная вязкость при достаточно высокой теплостойкости достигается в стеклопластиках с эпоксидной смолой в качестве связки.

Неориентированные стекловолокнисты содержат хаотично расположенные в плоскости (реже в пространстве) дискретные, короткие волокна. У таких стеклопластиков изотропия свойств проявляется в большей степени, чем у ориентированных. В то же время их прочность и жесткость меньше (рис. 3.15).

Плотность стеклопластиков составляет 1500...2000 кг/м<sup>3</sup>, а их удельные характеристики прочности примерно такие же, как у стали. Стеклопластики способны длительное время работать при 200...300 °С. Температурное воздействие в несколько тысяч градусов они выдерживают в течение десятков секунд, что связано с особенностями поведения стеклопластиков при повышенных температурах. В таких условиях поверхностные слои, выгорая, выделяют газообразные продукты деструкции связующего. Выделяющиеся продукты, поглощая теплоту, уменьшают тепловой поток, подходящий к поверхности стеклопластика. Оплавление стеклонеполнителя поверхностных зон и образование на поверхности слоя термостойкого кокса уменьшают тепловой поток внутри материала и замедляют процесс деструкции.

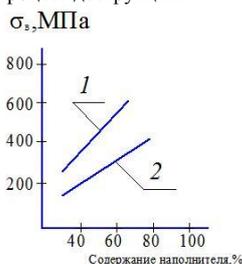


Рис. 3.15. Прочность ориентированного (1) и неориентированного (2) стеклопластиков в зависимости от содержания наполнителя

Длительная прочность стеклопластиков зависит от их состава, влажности и температуры окружающей среды, а также уровня действующих напряжений. По демпфирующим свойствам они превосходят металлы и хорошо работают в условиях вибрации. Лучшие свойства проявляются у стеклопластиков на основе эпоксидной и фенолоформальдегидной смол.

По применению стеклопластики делятся на конструкционные, электротехнические и радиотехнические. В качестве конструкционного материала используют как однонаправленные, так и неориентированные стеклопластики. Однонаправленные применяют для изготовления труб и различных профилей, при эксплуатации которых нагрузки направлены по длине детали. Полосы или профильные накладки из однонаправленных стеклопластиков наклеивают на наиболее нагруженные сечения детали по ее длине, тем самым выполняют местное упрочнение конструкции. Это дает экономию расхода конструкционных материалов и позволяет использовать методы проектирования, разработанные для металлических конструкций.

Неориентированные стеклопластики применяют в производстве корпусов лодок, автомобилей, катеров, мебели, покрытий полов, облицовки бытовых и железобетонных конструкций, силовых деталей электрооборудования и других конструкциях.

Материалы с перекрестным армированием используют в конструкциях типа оболочек, в секциях крыльев, хвостового оперения и фюзеляжа самолетов. Из них производят плиты, трубы, корпуса ракет и твердотопливных двигателей, сосуды высокого давления, лопасти вертолетов, радиолокационные обтекатели, топливные баки, пресс-формы, изоляторы для электродвигателей и трансформаторов, футеровку емкостей для химического машиностроения и другие изделия для различных областей техники.

**Углепластики** (карбоволокнисты, углеволокнисты) изготавливают на основе полиамида эпоксидной, эпокситрифенольной и других смол различного состава с упрочнителями из углеродных волокон. Отверждение связующих происходит без выделения низкомолекулярных соединений. В результате формирование изделий возможно при невысоком давлении, что позволяет сохранить целостность хрупких упрочняющих волокон. Смолы плохо смачивают углеродное волокно, поэтому волокна предварительно подвергают травлению или вискеризации. В качестве упрочнителей используют жгуты ВМЗ, ВМ4 и тканевые ленты ЛУ1, ЛУ2, ЛУ3, выполненные из высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон [34].

Рабочие температуры углепластиков зависят от связующей основы. Наиболее высокие температуры выдерживают углепластики на полиимидной основе (табл. 3.10). По удельной прочности и жесткости углепластики существенно превосходят стеклопластики, сталь, алюминевые и титановые сплавы. Слабая адгезионная связь полимерной связующей с углеродным волокном обуславливает их пониженную прочность при межслоевом сдвиге. Так, прочность углепластика КМУ-1В, армированного вискеризованным углеродным жгутом, имеет прочность при межслоевом сдвиге до 100 Мпа [34].

Анизотропия свойств у углепластиков выражена еще более резко, чем у стеклопластиков. Отношение модулей упругости наполнителя и матрицы у них достигает 100, в то время как у стеклопластиков 30. Кроме того, упрочняющие волокна углепластиков резко отличаются свойствами упругости по направлениям вдоль и перпендикулярно оси волокон, что дополнительно вызывает их повышенную анизотропность.

Таблица 3.10

Состав и физико-механические свойства углепластиков типа КМУ

Марка	Материал	Упрочнитель	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность вдоль волокон, МПа	Модуль упругости · 10 <sup>-3</sup> , МПа	Предел выносливости на базе 10 <sup>7</sup> циклов, МПа	Предел прочности за 1000 ч, МПа	Рабочая температура, °С
КМУ-1	Эпокситрифенольная смола	Жгут ВМН-3	1500	740	160	350	660	-
КМУ-4		Жгут ВМН-4	1500	1200	180	500	880	-
КМУ-1л	Полиимид	Лента ЛУ-2	1400	650	120	300	600	300
КМУ-2л		Жгут ВМН-4	1400	900	140	400	800	300
КМУ-3	Эпоксифенольная смола	Лента ЛУ-2	1400	650	120	300	600	200

При одинаковом уровне напряжений углепластики в меньшей степени, чем стеклопластики, подвержены деформации, поэтому отличаются высоким усталостным сопротивлением нагрузкам, что снижает вероятность растрескивания их матрицы.

По вибропрочности и демпфирующей способности углепластики превосходят многие металлы. Высокая теплопроводность углеродных волокон способствует рассеиванию энергии колебаний и снижает саморазогрев материала за счет сил внутреннего трения.

Высокомодульные углеродные волокна, обладая низким отрицательным коэффициентом термического расширения, придают углепластикам особые свойства, благодаря которым область их применения становится довольно широкой.

Детали, выполненные из углепластика, с изменением температуры мало изменяют размеры и форму. Из-за довольно высокой электропроводности их применяют как антистатика и электрообогревающие материалы.

Большое распространение углепластики получили как конструкционный материал в отраслях новой техники: авиации, космонавтике, ядерной технике. Из них производят конструкции, работающие на устойчивость под воздействием внешнего изгибающего момента и (или) давления: лопасти несущего винта вертолетов; корпуса компрессоров и вентиляторов, вентиляторные лопасти, диски статоров и роторов компрессоров низкого давления авиационных двигателей. Использование углепластиков вместо металлов позволяет снизить массу двигателя на 15...20 %.

Таблица 3.11

Состав и физико-механические свойства бороволоконитов

Марка	Матрица	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности		Модуль упругости, МПа·10 <sup>-3</sup>	Предел выносливости на базе 10 <sup>7</sup> циклов, МПа	Предел длительной прочности за 1000 ч, МПа
			при растяжении, МПа	при сжатии, МПа			
КМБ-1	Эпоксизоцианит	2000	1200	–	–	–	–
КМБ-1К	Амидомид	2000	900	920	214	350	1220
КМБ-2К	Эпоксидная модифицированная	2000	1000	1250	260	400	1200
КМБ-3Л		2000	1500	1500	260	420	1300

В космической отрасли из углепластиков изготавливают панели солнечных батарей, баллоны высокого давления, теплозащитные покрытия. В конструкциях самолетов применение углепластиков ограничено по причине неизбежной дефектности их структуры (трещины, поры, отслоения), которая закладывается еще на начальной стадии смачивания наполнителя жидкой матрицей. Трещины на волокнах уменьшают поверхность межфазного взаимодействия и повышают концентрацию напряжений в отверждаемой матрице.

Как химически стойкий материал, углепластики применяют в производстве насосов для перекачки коррозионноактивных сред.

**Боропластики** содержат в качестве армирующего наполнителя борные волокна, которые могут быть в виде отдельных нитей непрерывной длины диаметром 100 или 150 мкм, однонаправленных лент различной ширины, в которых параллельные борные волокна сплетены стеклянной нитью для придания формоустойчивости, а также в виде листового шпона или тканей. Матрицей в боропластиках служат модифицированные эпоксидные и полиимидные смолы. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1К на эпоксидцианатном связующем способны длительное время работать при 200 °С, а КМБ-2К на основе амидомидного связующего имеет рабочую температуру 300 °С. Материалы КМБ-3 и КМБ-3К на основе эпоксидной связующей работоспособны при температурах до 100 °С, но отличаются более высокой технологичностью и повышенными прочностными свойствами (табл. 3.11). Механические свойства боропластиков подчиняются общим закономерностям для армированных систем и зависят от количественного содержания волокна. Прочностные свойства в направлении армирования существенно уменьшаются в случае искривления волокон и наличия в связующей матрице пор, появление которых чаще связано с отклонением режима отверждения связующего вещества от оптимального режима [16].

При сжатии прочность боропластиков на 20...30 % выше, чем при растяжении, что обусловлено разным поведением дефектов на поверхности волокна под действием сжимающих и растягивающих нагрузок. Ячеистая структура борного волокна обеспечивает высокую прочность боропластиков при сдвиге и срезе.

Борные волокна, являясь полупроводниками, придают боропластикам повышенную теплопроводность и электропроводность.

Наибольшее применение боропластики нашли в авиационной и космической технике. Благодаря их высокой прочности и жесткости при сжатии они используются в конструкциях деталей летательных аппаратов: балок, стрингеров, стоек шасси. Широко используются боропластики в качестве подкрепляющих, усиливающих элементов металлических силовых конструкций, бандажных дисков и роторов компрессоров газотурбинных двигателей. Так, применение упрочняющих колец из боро волокна в конструкции диска, выполненного из титанового сплава, уменьшает массу газотурбинного двигателя на 40 % при сохранении показателей надежности и прочности изделия.

Механическая обработка бороволоконитов затруднена и для ее проведения применяют дорогостоящие алмазные и твердосплавные инструменты.

**Органопластики** (органиты, органоволокониты) состоят из полимерной матрицы и наполнителей – синтетических волокон: капрона, нитрона, нейлона, лавсана, которые определяют их механические свойства (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Механические свойства органопластиков с различными упрочнителями

Матрица	Армирующее волокно	Прочность, МПа	
		при изгибе	при растяжении
Эпоксидная смола	Лавсан	102	–
	Полиимидное (арамид)	170	117
	Полиамидное (фенилон)	222	142
	СВМ	351	550

Технология изготовления органопластиков отличается от технологии производства стекло- и углепластиков. Высокая прочность органопластиков реализуется при весьма точной укладке волокон, нарушение которой вызывает сильную деформируемость волокон и, как следствие, снижение их прочности в 2...5 раз по сравнению с исходными свойствами материала.

Природа волокна и матрицы в органитах одинакова, поэтому адгезия между связующим и наполнителем из-за их химического взаимодействия высока. Значительная адгезионная прочность между матрицей и волокном, близость значений их температурных коэффициентов линейного расширения позволяют получать органопластики с бездефектной, практически беспористой (пористость 1...3 %) структурой и стабильными механическими свойствами. Волокна упрочнителя отличаются неоднородной структурой, включающей в себя ориентированные макромолекулы и их совокупности – фибриллы. Ориентация их в направлении оси волокон придает им высокие значения прочности и жесткости при растяжении. Вследствие неоднородности волокон в отдельных их частях возникают разные напряженные состояния. В результате между элементами волокна возникают напряжения сдвига, приводящие к его расщеплению вдоль оси, а затем и разрушению. Такой разрыв упрочняющих волокон приводит к значительному разрушению композиции в целом. Так, ударная вязкость органопластика с эластичным наполнителем составляет 600...700 кДж/м<sup>2</sup> [16, 17].

Чаще всего в качестве упрочнителя в органопластиках используют высокопрочное синтетическое модифицированное волокно, а матрица может быть эпоксидной, эпоксидциантанной, эпоксифенольной, эпоксисоволачной.

Слабые межмолекулярные связи в волокнах-упрочнителях – причина низкой прочности и жесткости органоволокнитов при сжатии. Предельная деформация при этом определяется искривлением волокон, а не их разрушением. Дополнительное армирование органоволокнитов, например, углеродными или борными волокнами, затрудняющими искривление органических волокон, повышает их прочность при сжатии.

Органопластики имеют высокую прочность при динамическом и статическом нагружении. Большинство из них может длительное время работать при 100...150 °С. Также они обнаруживают высокое сопротивление знакопеременным нагрузкам и высокие теплозащитные свойства. Органоволокниты используют в элементах несущих и вспомогательных конструкций современных самолетов и вертолетов. Их применяют при изготовлении корпусов самолетов и вертолетов, лопастей несущих винтов, подкрепляющих элементов, балок в сотовых конструкциях. Применение органопластиков на 20...40 % снижает массу деталей при сохранении их эксплуатационной надежности.

**Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ)** представляют собой углеродсодержащую или графитовую матрицу, армированную углеродным или графитовым волокном. Эти материалы обладают как свойствами монолитного графита, так и волокнистых КМ.

Основные преимущества УУКМ состоят в высокой теплостойкости, малой плотности, стойкости к тепловому удару и облучению. Эти материалы обладают высокими характеристиками прочности и жесткости при обычной и повышенной температурах, низким коэффициентом термического расширения и рядом других ценных свойств. УУКМ длительное время работоспособны при температурах до 500°С в окислительной среде и до 3000°С в инертной среде и вакууме.

В качестве армирующего материала в УУКМ наибольшее применение нашли углеграфитные волокна, нити, жгуты и пряжа. Типовым материалом для матриц служат смолы (фенольные, фурановые, эпоксидные и др.) и каменноугольный пек – продукт крекинга угля.

В настоящее время для получения УУКМ в основном используется три способа:

- 1) пропитка смолой волокнистого каркаса и карбонизация;
- 2) осаждение углерода из газовой фазы между волокнами каркаса;
- 3) комбинированный.

При первом способе основными этапами являются: формование исходной заготовки методами намотки или выкладки из углепластика, полимеризация связующего, карбонизация, уплотнение пиролитическим углеродом, окончательная термическая обработка и нанесение противоокислительных покрытий на основе карбидов кремния, иридия, циркония. Полимеризация связующего осуществляется при температуре не более 200°С. При последующем пиролизе связующего происходит образование науглероженной фазы (кокса). Чем больше выход твердых продуктов пиролиза, выше прочность кокса и его сцепление с волокнами, тем выше качество получаемого УУКМ. Если конечная температура пиролиза находится в пределах 800...1500°С, получается карбонизированный материал. При дальнейшем нагревании до 2500...3000°С происходит его графитизация. Процесс пиролиза органических матриц очень продолжителен и составляет примерно 75 ч. Для получения плотного материала с хорошими механическими свойствами цикл пропитка–отверждение–карбонизация осуществляется многократно. Свойства УУКМ изменяются в широком диапазоне, так как они определяются многими факторами: свойствами исходного волокна и природой связующего; степенью наполнения; свойствами кокса и прочностью его связи с волокном; условиями пропитки, отверждения, карбонизации, графитизации; количеством циклов (табл. 3.13). Плотность УУКМ в зависимости от режимов его получения находится в интервале от 1300 до 2000 кг/м<sup>3</sup> [16, 17].

Второй способ изготовления УУКМ состоит в получении заготовки из сухого волокна методами укладки, намотки, плетения, армирования ткани в третьем направлении короткими волокнами, прошивки. В настоящее время интенсивно разрабатываются УУКМ, армированные в трех и более направлениях. Углеродные волокна собираются в блоки с помощью специальных приспособлений в соответствии со схемой ориентации волокон. Получаемые таким образом пространственно-армированные УУКМ характеризуются относительной изотропностью, низким коэффициентом термического расширения и позволяют производить заготовки для получения деталей больших размеров.

Таблица 3.13

Свойства карбонизированных пластиков на различных связующих

Тип связующего	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при изгибе, МПа
Фенолоформальдегидная смола	1400...1500	140	300	500...600
Кремнийорганическая смола	1600...1700	140...150	550	800...1000

При получении матрицы УУКМ методом химического осаждения из газовой фазы применяются природный газ метан или аналогичный газообразный углеводород в комбинации с водородом или аргоном.

Второй способ является наиболее перспективным, поскольку позволяет послойно создавать материалы разной архитектуры с любыми заранее заданными свойствами. Например, можно послойно осаждают не только углерод, но и такие материалы, как цирконий, медь, тантал и другие, придавая КМ различные желаемые свойства. Полученный таким образом УУКМ в виде блока с определенными характеристиками является полуфабрикатом, который затем может быть переработан в деталь методами механической обработки.

В целом УУКМ, полученные вторым способом, имеют большую плотность, более высокое содержание углерода, лучшие характеристики сцепления волокна с матрицей, но и большую стоимость, чем КМ, полученные методом пропитки.

### 3.5. Методы получения полимерных одномерноармированных КМ (дискуссия – 1 ч.)

Технология изготовления ПКМ включает следующие основные операции:

- подготовка армирующего наполнителя и приготовление связующего;
- совмещение арматуры и матрицы;
- формообразование детали;
- отверждение связующего в КМ;
- механическая обработка детали;
- контроль качества детали.

Этап подготовки исходных компонентов предполагает проверку их свойств на соответствие ТУ, а также обработку поверхности волокон для улучшения смачиваемости и увеличения прочности сцепления в готовом ПКМ (удаление загрязнений, активирование поверхности, химическое травление поверхности, удаление влаги и т.д.).

Совмещение армирующих компонентов и связующего может быть осуществлено прямыми и косвенными способами. К прямым относятся такие, при которых изделие формируется непосредственно из исходных компонентов КМ, минуя операцию изготовления из них полуфабрикатов. Косвенные способы предполагают дополнительную подготовку исходных материалов. Для формообразования ПКМ применяются следующие технологические методы:

- метод намотки;
- прессование;
- вакуумное и автоклавное формообразование;
- пултрузия.

*Метод намотки* – процесс формообразования конструкций из КМ, при котором заготовки получают укладкой по заданным траекториям армирующего наполнителя (нитей, лент, тканей), пропитанных полимерным связующим, на вращающиеся формы или технологические оправки (рис. 3.16).

Оправки или формы имеют конфигурацию и размеры, соответствующие внутренним размерам изготавливаемой детали. Намоткой изготавливаются трубы, баки, емкости давления различной формы, конические оболочки, стержни и т.п.

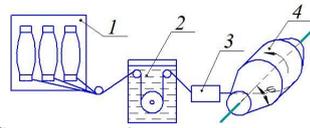


Рис. 3.16. Схема станка для спиральной намотки нитью:

1 – шпулярник; 2 – устройство пропиточно-натяжное; 3 – нитеукладчик; 4 – технологическая оправка

Армирующий материал укладывается на поверхность под некоторыми расчетными углами ( $\varphi$ ) в зависимости от схемы нагружения конструкции, что в конечном счете определяет механические характеристики ПКМ. В конце технологического процесса оправка вынимается из детали.

Существует несколько схем намотки: спирально-винтовая в один слой за один проход (рис. 3.17, а); спирально-винтовая в  $B/k$  слоев за один проход (рис. 3.17, б); продольно-кольцевая (рис. 3.17, в); спирально-перекрестная (рис. 3.17, г); совмещенная спирально-кольцевая (рис. 3.18, д); косослойная продольно-поперечная (рис. 3.17, е).

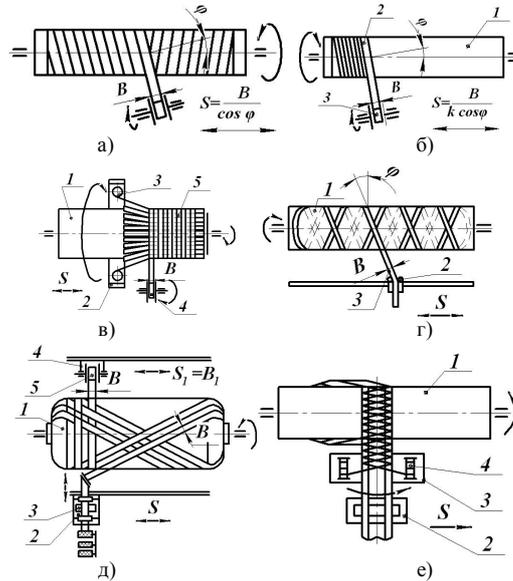


Рис. 3.17. Схемы намотки

Косвенными способами изготовления называются такие, в которых элементы конструкции изготавливается из полуфабрикатов. В этом случае пропитка армирующих волокон связующим представляет самостоятельную операцию, в результате которой получают предварительно пропитанные материалы (препреги) – нити, жгуты, ленты и ткани, которые потом собираются и частично отверждаются (рис. 3.18).

Прессование является одним из распространенных методов формообразования деталей из ПКМ. Оно осуществляется в пресс-формах, где создаются необходимые температура и давление для формования заготовок и отверждения связующего (рис. 3.19).

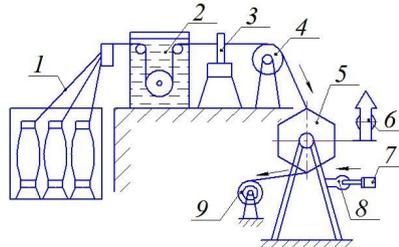


Рис. 3.18. Установка для получения препрега в виде ленты:

1 – стеклотити; 2 – пропиточная ванна; 3 – раскладчик нитей; 4 – подающий валик; 5 – камера сушки ленты с барабаном; 6 – отсасывающий вентилятор; 7 – калорифер; 8 – нагнетающий вентилятор;

9 – катушка с лентой препрега намоточном устройстве

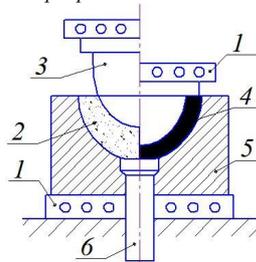


Рис. 3.19. Схема прессования:

1 – плиты обогрева; 2 – навеска полуфабриката;

3 – пуансон; 4 – опрессованная деталь; 5 – матрица пресс-формы; 6 – выталкиватель

Вакуумное и автоклавное формование заготовок – это процесс выкладки заготовок на плоскую или криволинейную форму и последующее формообразование детали давлением сжатых газов (автоклавный метод, рис. 3.20) или атмосферным давлением, действующим на замкнутый объем, в котором создается разрежение к вакуумному насосу (вакуумный метод, рис. 3.21).

Прессованием изготавливают детали с хаотическим и ориентированным расположением волокон. Исходными материалами в этом случае могут быть короткие волокна. Обрезки лент, гранулы из пучков волокон предварительно пропитываются связующим и соединяются в результате его частичного отверждения. При изготовлении деталей, в которых композит должен иметь слоистую структуру (двумерное строение), используют заготовки из препрегов (лент или тканей). В этом случае предварительно раскромсанные заготовки укладываются в определенном порядке, пакет слегка спрессовывается, а затем окончательно отверждается в горячей пресс-форме.

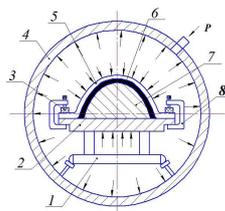


Рис. 3.20. Схема формования в автоклавах и гидроклавах:

1 – тележка; 2 – плита; 3 – прижимное кольцо; 4 – корпус автоклава; 5 – резиновый чехол; 6 – формируемое изделие; 7 – форма; 8 – винтовой зажим

Данные методы предназначены для получения конструкций сложной формы из тканых армирующих материалов, предварительно пропитанных термореактивными связующими. Заготовки из них последовательно укладываются на технологической оправке и под давлением, которое прикладывается через эластичную резиновую или полиэтиленовую диафрагму, происходит их усадка и отверждение.

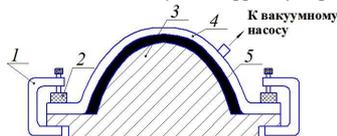


Рис. 3.21. Схема вакуумного формования:

1 – винтовой зажим; 2 – прижимное кольцо; 3 – форма; 4 – резиновый чехол; 5 – формируемое изделие

Действующее давление формования должно достигать 2 МПа в автоклавах и гидроклавах и до 0,1 МПа в вакуумных чехлах. При автоклавном методе отверждение заготовок происходит в печи или непосредственно в автоклаве, температура и продолжительность при этом определяется типом связующего и геометрией детали. Охлаждение детали происходит под давлением вместе со всей оснасткой. После этого деталь извлекается из формы и при необходимости проходит дальнейшую обработку.

**Пултрузия** – процесс непрерывного протягивания армирующего материала, пропитанного и отверждаемого в профилирующей форме специальной установки, с получением различных профилей: прутков, труб и других конструктивных элементов, изготавливаемых из волокнистых композитов на полимерной матрице (схема установки показана на рис. 3.22).

Армирующий материал (жгуты, холсты или тканевые ленты) последовательно проходит через ванну с жидким связующим 2, пропитывается, сжимается и идет далее в матрицу предварительного формования 4, а затем в обогреваемую пресс-форму 5, где фиксируется требуемая конфигурация и отверждается полимерное связующее. Для окончательного отверждения элемент после формования дополнительно термообработывают в печи 6. Полученный профиль, труба или пруток разрезается на части определенной длины [2, 5, 6, 7, 8, 10, 16, 17, 18, 30, 36].

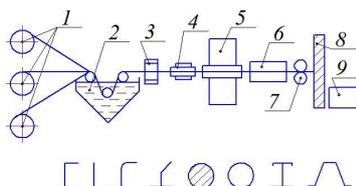


Рис. 3.22. а установка для изготовления элементов пултрузией:

а – схема процесса пултрузии; б – вид продукции (сечение профилей);

1 – армирующий материал; 2 – ванна для связующего; 3 – направляющие ролики; 4 – матрица; 5 – обогреваемая пресс-форма; 6 – печь для термообработки; 7 – тянущее устройство; 8 – устройство для резки профиля; 9 – накопитель для заготовок

## Раздел 4. Двумерные композиционные материалы

### Тема 4.1. Ткани, применяемые для армирования пластиков (дискуссия – 1 ч.)

Двумерные композиционные материалы – это материалы, в которых размеры армирующего элемента в двух направлениях значительно больше, чем в третьем. В качестве упрочняющих в таких КМ используют ткани различных материалов и различных плетений, а также проволочные сетки – сваренные и плетеные. Матрицей могут служить органические материалы из эпоксидных, фенолоформальдегидных и других смол.

Армирующие ткани получают в результате текстильной переработки волокон (за исключением борных). По виду переплетений они подразделяются на ткани полотняного, саржевого, сатинового, кордового и объемного плетения (рис. 4.1).

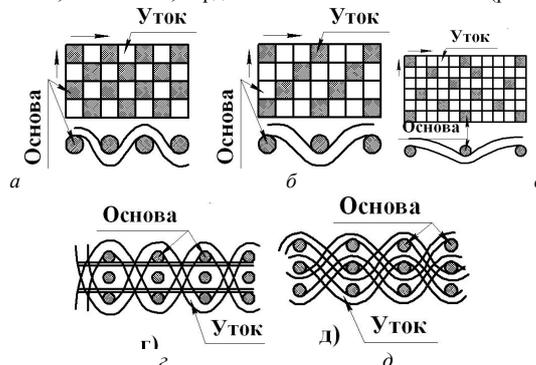


Рис. 4.1. Схемы переплетения тканей:

а – полотняное; б – саржевое; в – сатиновое; г – объемное соединение всех слоев нитью основы; д – объемное (состоит из нескольких слоев, объединенных общими нитями; кордовые ткани содержат усиление нити основы и тонкие, редко расположенные поперечные нити)

В производстве композитов применяются ткани полотняного и сатинового плетения, а в конструкциях, подверженных межслойным сдвиговым нагрузкам – ткани объемного плетения, состоящие из нескольких слоев, последовательно объединенных общими нитями. Основным преимуществом тканевых материалов является простота их использования, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий.

Механические свойства композитов, армированных тканями, зависят как от типа волокон, вида плетения, так и от соотношения волокон по основе и утку ткани (табл. 4.1).

Ткани полотняного плетения на поверхности имеют частое чередование продольных (основных) и поперечных (уточных) нитей, что придает им особую жесткость. Сатиновым тканям свойственно более редкое переплетение нитей. В качестве упрочнителей они широко используются в стеклопластиках, увеличивая их прочность и работоспособность.

#### 4.1. Композиционные материалы, упрочненные стеклотканью

Технологии производства полимерных композиционных материалов, армированных тканями различного химического происхождения, отличаются незначительно. Среди перспективных КМ можно выделить стеклопластики, которые используются во многих отраслях промышленности, поэтому более подробно остановимся на изучении характеристик именно этих композитов.

Таблица 4.1

Свойства композитов, армированных различными тканями

Марка ткани	Вид переплетения	Толщина ткани, мм	Плотность связующего, кг/м <sup>3</sup>	Содержание связующего, %	Прочность при растяжении, МПа		Модуль упругости, ГПа	
					основа	уток	основа	уток
Стеклоткань АСТТБ (фенолформальдегидные связующие)	Сатиновое 8/3	0,35	1850	38,8	530	280	26,6	20
Стеклоткань (полиэфирное связующее)	Полотняное	0,27	1930	27,1	520	30	30	25
Стеклоткань МТБС-2,5 (полимерное связующее)	Многослойное	2,5	1850	31,5	345	280	25	17,7
Углеткань П-5-13 (фенолформальдегидные связующие)	Многослойное	3,0	1360	32,5	101	92	12	13,5
Кевлар 49 (эпоксидное связующее)	Сатиновое 5/3	0,35	1330	50	517	310	27,5	21,5

Основным сырьем для производства стеклотканей является стекловолокно. Исходным технологическим процессом для получения стеклянных волокон является процесс вытяжки нитей из расплава. При этом под действием гидростатического давления расплав стекла вытекает через тонкие отверстия фильеры в виде струи, которую подвергают интенсивному механическому растяжению. После этого струя проходит через холодильник, создающий поток водяных брызг, собирается в нить и пропускается через зону, в которой на волокно наносится замасливающий для повышения компактности нити.

В зависимости от вязкости, температуры и скорости вытяжки расплава стекломассы получают волокна различных диаметров, которые стандартизованы и имеют маркировку (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Маркировка и размеры стеклянных моноволокон

Маркировка	Диаметр, мкм	Маркировка	Диаметр, мкм
B	3,8	E	7,0
C	4,5	G	9,0
D	5,0	H	10,0
DE	6,0	K	13,0

#### Тема 4.2. Свойства стеклянных волокон для производства тканей (дискуссия – 1ч.)

Стекло является аморфным материалом, с одной стороны, оно не обладает кристаллической структурой твердого тела, с другой – не обладает текучестью, проявляющейся в жидкостях. Химически стекла состоят в основном из кремнеземной ( $SiO_2$ ) основы, существующей в виде полимерных цепочек. Однако диоксид кремния требует высоких температур для размягчения и вытягивания. Поэтому необходима модификация состава для снижения уровня рабочих температур, при которых стекломасса обладает вязкостью, позволяющей проводить вытяжку нитей. Способы модификации состава могут быть разделены по решению задач на две группы: получение стекол с определенными свойствами и приспособление к техническим нуждам.

Высокощелочные стекла являются наиболее распространенными. Они используются в основном для производства емкостей и листового стекла. Высокощелочные композиции, известные под маркой А-стекла, выгодны для получения волокон, обладающих высокой хемостойкостью.

Вместе с тем высокое содержание щелочи в стекле определяет его невысокие электрические свойства, в то время как хорошие электроизоляционные свойства определили развитие стекол на основе низкощелочных композиций (алюмоборосиликаты), получивших название Е-стекло. В настоящее время из Е-стекол изготавливается большая часть текстильного ассортимента стекловолокон.

Для специальных областей применения, когда не подходят волокна из А-стекла и Е-стекла, могут быть созданы композиции с необходимыми характеристиками. Когда требуется особо высокая хемостойкость, может быть использовано волокно из С-стекла (натрийборосиликатная композиция). Для создания волокон с высокими прочностными характеристиками, например, для материалов несущих конструкций в самолето- и ракетостроении используют S-стекла (магнийалюмосиликатные композиции). Повышение прочностных свойств волокон из S-стекла приблизительно на 40 % относительно волокон из Е-стекла является результатом более высокой прочности исходной композиции. Кроме того, S-стекла имеют более высокую теплостойкость, чем Е-стекла.

Типичные композиции для перечисленных марок стекол приведены в табл. 4.3 с указанием массовой доли компонентов в процентах.

Таблица 4.3

Состав стекловолокон, %

Состав	Марка стекла			
	А (высокощелочное)	С (химически стойкое)	Е (электроизоляционное)	S (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	10,0	13,2	17,2	0,01
Окись магния	2,5	3,3	4,7	10,27
Окись натрия	14,2	7,7	0,6	0,27
Окись калия	-	1,7	-	-
Окись бора	-	4,7	8,0	0,01
Окись бария	-	0,9	-	0,2
Прочие	0,7	-	-	-

Свойства стеклянных волокон различного состава представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Основные свойства стеклянных волокон

Свойства	Марка стекла			
	A	C	E	S
Физические				
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2500	2490	2540	2480
Твердость по Моссу	-	6,5	6,5	6,5
Механические				
Предел прочности при растяжении при 22°C, МПа	3033	3033	3448	4585
Модуль упругости при растяжении при 22°C, МПа	-	69,0	72,4	85,5
Предел текучести, %	-	4,8	4,8	5,7
Термические				
Коэффициент линейного термического расширения, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	8,6	7,2	5,0	5,6
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	-	-	10,4	-
Удельная теплоемкость при 22°C	-	0,212	0,197	0,176
Температура размягчения, °C	727	749	841	-

Можно выделить некоторые свойства стеклянных волокон, отличающие их от других материалов:

1. Стекловолокна имеют высокий предел прочности при растяжении, превышающий прочность других текстильных волокон. Удельная прочность стекловолокон (отношение прочности при растяжении к плотности) превышает аналогичную характеристику стальной проволоки.
2. Так как природа стекловолокон неорганическая, они не горят и не поддерживают горение. Высокая температура плавления стекловолокон позволяет использовать их в области высоких температур.
3. Химически стойки к воздействию различных сред, грибов и бактерий.
4. Имеют высокую влагостойкость, что позволяет использовать их в средах с повышенной влажностью.
5. Имеют низкий коэффициент линейного расширения и большой коэффициент теплопроводности, что позволяет эксплуатировать композиты со стеклянными волокнами и тканями при повышенных температурах.
6. Не проводят электрический ток и могут быть использованы как изоляторы особенно там, где необходима высокая электрическая прочность и низкая диэлектрическая постоянная.

### Тема 4.3. Производство тканей из стеклянных волокон (дискуссия – 1 ч.)

**Стекловолоконные ровинги.** Представляют собой объединение непрерывных и параллельных жгутов или элементарных волокон.

Традиционный ровинг производится совместным прядением нескольких простых жгутов, число которых определяется требованиями последующей переработки. Отдельный жгут состоит из объединенных элементарных волокон, которые протягивают через фильеру.

**Ткани из ровинга.** Большая часть стеклоровинга перерабатывается в грубые ткани, потребность в которых возникает, если есть необходимость быстрого набора толщины материала на большой поверхности. Особенно часто используется при создании корпусов лодок, различных судовых приспособлений и многих типов покрытий. Ткань из стекловолоконного ровинга, пропитанная термореактивным полиэфирным связующим, может перерабатываться в композиционный материал методом ручной выкладки. Слоистый пластик, сделанный по этой технологии, имеет низкое соотношение стекло/смола и, следовательно, ограниченную возможность сшивки полимерного связующего. Вследствие этого механические свойства такого слоистого материала оказываются не очень высокими. Повышение механических свойств слоистых стеклопластиков может быть достигнуто за счет уменьшения содержания связующего и за счет использования полиэфирных связующих с высокой температурой отверждения. Свойства типичных стекловолоконных композиционных материалов представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Свойства слоистых пластиков на основе ткани с плотностью 0,814 кг/м<sup>3</sup> из стеклоровинга и полиэфирного связующего

Свойства	ОГС	ОГС	МЦ
Массовая доля связующего, %	49,0	45,6	42,6
Толщина, мм	7,59	6,73	6,68
Режим отверждения	T	P + T	P + T
Предел прочности при изгибе, МПа, по условиям: A D2/100	235,8 267,5	343,4 306,1	504,0 410,9
Модуль упругости при изгибе, ГПа, по условиям: A D2/100	14,2 14,6	16,6 15,9	20,0 19,5
Предел прочности при сжатии, МПа, по условиям: A D2/100	204,8 188,2	137,2 173,8	326,1 276,5
Предел прочности при растяжении, МПа, по условиям: A D2/100	289,6 279,9	337,2 326,8	354,5 347,5
<i>Примечание:</i> МЦ – многоцелевое связующее; ОГС – огнестойкое связующее; A – нормальные условия; D2/100 – после погружения на 2 часа в воду при температуре 100 °C; P + T – давление и повышенная температура.			

**Стекловолоконные маты.** Существует три основных типа матов из стеклянных волокон:

- маты из резаных нитей, изготавливаемые в виде нетканых материалов, в которых стекловолокна получают резкой непрерывного жгута на штабели длиной 25,4...50,5 мм.

- маты из непрерывных нитей, которые раскладываются и соединяются в виде спирали. Такие маты достаточно упруги при сравнительной разреженности структуры, а благодаря механическому переплетению не требуют дополнительной связи для создания необходимой прочности.

- декоративные маты или покрытия – это очень тонкие маты из непрерывных мононитей, используемые как декоративные поверхностно-армированные слои при получении композитов методом ручной выкладки или при расплавленном прессовании как компонент отделки и армирования поверхности.

**Текстильная стекловолоконная пряжа** – это собранные вместе одиночные параллельные волокна или жгуты, которые в дальнейшем могут быть переработаны в текстильный материал. Непрерывные одиночные жгуты представляют собой простейшую форму текстильной стекловолоконной пряжи, известной как «простая пряжа». Для использования такой пряжи в дальнейшей текстильной переработке ее

обычно подвергают незначительной крутке. Для большинства тканей необходима более толстая пряжа, чем получается при вытяжке, поэтому в данном случае текстильную пряжу получают методом скручивания и трощения (последующее скручивание двух или более уже предварительно скрученных жгутов). При этом просто скрученный жгут будет образовывать петли, скрутки и запутываться, так как все элементы закручены в одном направлении. Чтобы этого избежать при трощении общая крутка производится в направлении, противоположном «простой» крутке. В результате операций кручения и трощения получают пряжу, прочность, гибкость и диаметр которой могут варьироваться, что дает возможность для создания различных тканей, из которых получают более прочные композиты.

**Текстурированная пряжа.** Текстильная стекловолоконная пряжа может быть подвергнута воздействию струи воздуха, которая вызывает случайное, но контролируемое разрушение элементарных стекловолокон, расположенных на поверхности пряжи. Этот процесс известен как «текстурирование» или создание объемной пряжи. Эффект текстурирования контролируется давлением воздуха и скоростью подачи пряжи. Хотя происходит разрушение поверхностных элементарных волокон, пропитываемость такой пряжи повышается. Использование текстурированной пряжи в тканях наиболее выгодно тогда, когда необходимо сочетание максимальной прочности с низким содержанием связующего в композите.

#### **Тема 4.4. Маркировка стеклотканей (дискуссия – 1 ч.)**

Маркировка стекловолоконной пряжи основывается на буквенном и числовом обозначениях.

Первая буква в буквенном индексе соответствует композиции стекла (см. табл. 4.3), вторая – тип волокон: *S* – непрерывное (*N*), *S* – штабельное (*Ш*), *T* – текстурированное (*T*). Третья и четвертая буквы соответствуют диаметру элементарного волокна (см. табл. 4.2).

Первая серия цифр в числовом индексе представляет 1/100 линейную плотность основного жгута (в ярдах на фунт – 1 ярд/фунт =  $2,02 \cdot 10^{-3}$  текс). Вторая серия показывает число жгутов, скрученных вместе в числителе и число строщенных вместе жгутов в знаменателе. Общее число основных жгутов определяется перемножением этих чисел. Третья численная комбинация, включающая обозначение *S* или *Z*, определяет конечное число и направление скрутки в пряже.

Например, пряжа имеет индексацию *ECG150 4/2 3,8S*, следовательно, она изготовлена из *E*-стекла, из непрерывных элементарных волокон диаметром *G*, основной жгут имеет линейную плотность 15 ярд/фунт (33 текс). Четыре основных жгута из *ECG150 1/0*, скрученных вместе (*Z*-крутка), получают обозначение *ECG150 4/04.0Z*. Трощение двух таких жгутов вместе приводит к следующему индексу пряжи *ECG150 4/2 3,8S*. Следовательно, пряжа состоит из 8 (4·2) основных жгутов с линейной плотностью структуры (150·8) ярд/фунт (264 текс).

#### **Конструирование тканей из стекловолокон**

Свойства и условия получения стеклотканей зависят от строения этих тканей, плотности переплетения, извитости пряжи, плотности исходной пряжи и от условий ткачества.

Плотность нитей в основе и утке определяется числом нитей в 1 см ткани соответственно в продольном и поперечном направлениях. Основа – это пряжа, расположенная вдоль длины ткани, а уток перевивает ткань в поперечном направлении. Следовательно, плотность ткани, ее толщина и прочность при разрыве пропорциональны числу нитей и типу пряжи. Эти параметры могут быть определены, если известна конструкция ткани.

Существуют различные виды переплетения основы и утка для создания прочных тканей. Варьируя вид ткани, можно создать разнообразные армирующие структуры, влияющие в определенной степени на свойства композитов из них. В ряде случаев применения стеклотканей требуются специальные виды переплетений.

Простая ткань с полотняным переплетением, в которой уток проходит под каждой нитью основы и над ней, обладают самой высокой степенью устойчивости относительно проскальзывания пряжи и менее всего повреждается. Такая ткань стабильна как по плотности утка и основы, так и по расходу пряжи.

Сеточное переплетение представляет собой структуру, когда два и более элементов основы переплетены двумя или более нитями утка. Эти ткани менее стабильны, чем ткани полотняного переплетения, но более гибки и легче принимают необходимую форму при выкладке.

Саржевое переплетение создается переплетением одного или более элементов основы двумя или более элементами утка в правильном чередовании. В результате получают ткань с прямым или изломанным диагональным рисунком. Особенностью такой ткани является большая гибкость и лучшая драпирующая способность, нежели у тканей с полотняным или сеточным переплетениями.

Саржевое ломаное 3/1 переплетение характеризуется тем, что одна нить основы перекрывается тремя нитями утка сверху и одной снизу с образованием нерегулярного рисунка. В результате получают гибкую ткань, хорошо приспособляющуюся к любым формам выкладки.

Восьмиремизковое сатиновое переплетение представляет собой структуру, в которой одна нить основы перекрывается семью нитями утка сверху и одной нитью снизу с образованием нерегулярного рисунка. В результате получают очень гибкую и удобную для различных выкладок ткань. Эта ткань, имеющая высокую плотность по утку и основе, обладает максимальной изотропностью свойств в композите.

Другие переплетения, в которых использованы прочные нити основы и тонкие нити утка носят название однонаправленных. Такие ткани используются при создании композитов с высокой прочностью в направлении армирования.

Нетканые однонаправленные материалы могут быть получены с использованием процесса склеивания основы и утка вместо их механического переплетения. От вида такой связи зависит геометрическая устойчивость композиционного материала. Однако эти материалы получаются весьма жесткими и с трудом могут быть приспособлены к необходимой форме при выкладке.

Кроме представленных способов конструирования тканей стекловолоконная пряжа может перерабатываться в тесьму, контурные ткани, ткани с гофрированными волокнами и в трехмерные многослойные ткани.

Тесьма представляет собой узкую (менее 30,5 см шириной) ткань, которая может содержать распушенную кромку (т.е. заполняющую пряжу, выступающую за пределы тесьмы).

Контурные ткани – это такие ткани, в которых геометрическая форма совпадает с формой армируемых деталей. Такие ткани изготавливаются из специально сконструированных для этой цели станках.

Ткани с гофрированными нитями состоят из двух слоев, соединенных вместе нитями так, что конфигурация соединений представляет собой либо треугольник, либо прямоугольник.

Трехмерные ткани представляют собой плоскостные ткани, соединенные пряжей в третьем направлении. Эта пряжа проходит в основном направлении машины, затем под углами +45° и –45° от этого направления [5, 8, 12, 14, 16, 17, 34].

#### **Раздел 5. Эвтектические композиционные материалы**

Эвтектическими композиционными материалами называют сплавы эвтектического или близкого к нему состава, в которых упрочняющей фазой выступают ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. В отличие от обычных КМ, получаемых путем последовательного выполнения нескольких трудоемких технологических операций, эвтектические КМ получают в течение одной. Важно то, что направленная ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Это является существенным преимуществом эвтектических композиций по сравнению с другими КМ.

Структура эвтектических КМ представлена, как правило, кристаллами твердой прочной фазы (карбиды, интерметаллиды), распределенными в матрице, представляющей собой твердый раствор. Их форма может быть в виде волокон или пластин. При объемной доле упрочняющей фазы меньше 32% образующиеся кристаллы имеют форму стержня, а при большем содержании – пластинчатую.

Равновесные условия кристаллизации обеспечивают высокую термическую стабильность эвтектических КМ. Между фазами эвтектики, волокнами и матрицей отсутствует химическое взаимодействие, поскольку химические потенциалы фаз равны. Особенности строения эвтектических микроструктур, полукогерентные границы раздела фаз с минимальной поверхностной энергией определяют термическую стабильность эвтектической микроструктуры и, как следствие, высокие механические свойства при температурах, близких к температурам плавления эвтектики.

Способом направленной кристаллизации получают КМ на основе алюминия, магния, меди, никеля, кобальта, титана, ниобия, тантала и других элементов, поэтому они могут эксплуатироваться в широком интервале температур.

### Тема 5.1. Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия (дискуссия – 1 ч.)

Методом направленной кристаллизации получают композиции  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  и  $\text{Al-CuAl}_2$ . При затвердевании эвтектического сплава  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  фаза  $\text{Al}_3\text{Ni}$  выделяется в виде сильно вытянутых частиц, объемное содержание которых  $\sim 11\%$ . Направленность частиц  $\text{Al}_3\text{Ni}$  достигается кристаллизацией со скоростью  $2 \dots 10$  см/ч. Прочность сплава, полученного без направленной кристаллизации, – низкая ( $\sim 90$  МПа), в то время как при ориентации армирующих частиц  $\text{Al}_3\text{Ni}$  его прочность повышается до 330 МПа. При растяжении композиции из-за высокой прочности связи усов  $\text{Al}_3\text{Ni}$  с матрицей разрушение начинается с волокон.

С повышением температуры прочность сплава  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  понижается (рис. 5.1, кривая 1) и при  $500^\circ\text{C}$  составляет 75 МПа. Композиция отличается высокой стабильностью структуры вплоть до температур плавления. Частицы  $\text{Al}_3\text{Ni}$  при этих условиях сохраняют прочную связь с матрицей, не укорачиваются и не подвергаются сфероидизации до  $611^\circ\text{C}$ .

Композиция  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  обнаруживает высокий предел усталости. Например, на базе  $10^8$  циклов он в  $4 \dots 5$  раз выше, чем у алюминия. Усталостная трещина в композиции  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$ , зарождающаяся в матрице, огибает волокно  $\text{Al}_3\text{Ni}$  и не разрушает его. Предел прочности композиции  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  составляет 270 МПа.

В композиции  $\text{Al-CuAl}_2$  при направленной кристаллизации эвтектика имеет пластинчатое строение. Объемная доля пластин  $\text{CuAl}_2$  довольно высока и составляет  $\sim 50\%$ . Имея меньшую прочность по сравнению со сплавом  $\text{Al}_3\text{Ni}$ , пластины  $\text{CuAl}_2$  упрочняют матрицу меньше, чем он. Сплав  $\text{Al-CuAl}_2$  из-за пластинчатого строения эвтектики отличается высокой хрупкостью. Разрушение материала начинается с разрушения пластин, за которым следует разрушение матрицы.

С повышением температуры у композиции  $\text{Al-CuAl}_2$  отмечено существенное возрастание относительного удлинения и падение предела прочности.

Эвтектические КМ  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  и  $\text{Al-CuAl}_2$  хорошо свариваются методом диффузионной сварки и обрабатываются способом холодной пластической деформации. Диффузионную сварку можно вести при  $525^\circ\text{C}$  и получать листы с перекрестным армированием.

Степень обжатия листов при холодной прокатке поперек волокон не более  $70 \dots 80\%$ , так как при больших степенях обжатия волокна разрушаются. В результате прочность композиции  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  вдоль волокон становится меньше исходной.

Композиционные материалы  $\text{Al-Al}_3\text{Ni}$  и  $\text{Al-CuAl}_2$  применяют как конструкционный материал, а также для изготовления высокопрочных электрических проводов и контактов электрических выключателей, в производстве абразивного инструмента с металлической связкой.

### Тема 5.2. Эвтектические композиционные материалы на основе никеля (дискуссия – 1 ч.)

КМ на основе никеля являются жаропрочными материалами. Пластинчатые композиции с объемной долей упрочняющей фазы более  $33 \dots 35\%$  являются хрупкими. К ним относятся композиции на основе никеля с содержанием объемной доли волокон  $3 \dots 15\%$  из карбидов тантала, ниобия, гафния. Прочность карбидов близка к прочности усов, полученных из газовой фазы, и колеблется в пределах  $600 \dots 1200$  МПа.

Физико-механические свойства некоторых композиционных материалов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Физико-механические свойства эвтектических композиционных материалов на основе никеля

Матрица	Упрочнитель	Общая доля упрочнителя, %	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$E \cdot 10^{-3}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
Волокнистые КМ							
Ni	W	6	1500	–	830	–	45,0
Ni	NbC	11	1328	8,8	890	–	9,5
Ni-Co-Cu-Al	TaC	9	–	8,8	1650	–	5,0
Пластинчатые КМ							
Ni	NiBe	38...40	1157	–	918	215	9,0
Ni	Ni <sub>3</sub> Nb	26	1270	8,8	745	–	12,4
Ni-Ni <sub>3</sub> Al	Ni <sub>3</sub> Nb	–	1270	–	1140	–	2,3
Ni <sub>3</sub> Al	Ni <sub>3</sub> Nb	44	1280	8,44	1240	24,2	0,8

Процесс деформирования эвтектических композиций никель – карбид (Ta, Nb, Hf) сопровождается интенсивным дроблением (фрагментацией) армирующих волокон, которое охватывает всю рабочую зону и происходит в произвольном сечении. Разрушение волокон, тем не менее, не приводит к разрушению всей композиции, поскольку деформирующаяся и вследствие этого упрочняющаяся матрица принимает нагрузку, которую несли волокна.

Применение никелевых эвтектических КМ аналогично алюминиевым и медным, однако за счет более высокой прочности они могут использоваться при более высоких нагрузках [16, 17, 34, 60].

## Раздел 6. Композиционные наноматериалы

### Основные понятия и определения

Значительным технологическим достижением конца XX – начала XXI века стало создание и развитие новых технологий, связанных с манипулированием свойствами материалов на уровне размеров менее 100 нанометров (1 нанометр (нм) =  $10^{-9}$  м), соизмеримых с размерами макромолекул. После того как появилась возможность осуществлять измерение и исследование веществ в наноразмерном диапазоне, началось бурное развитие нанотехнологий.

Принятая на сегодняшний момент терминология предполагает использование определенных понятий.

**Нанотехнология** – совокупность методов и приемов, позволяющих контролируемым образом создавать и видоизменять объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграции в полноценно функционирующие системы большого масштаба.

Объектами нанотехнологий являются нанообъекты и нано-структуры.

Объект называют **наноразмерным** (нанообъектом), если хотя бы один из его габаритных размеров лежит в диапазоне  $1 \dots 100$  нм (например наночастица).

**Наночастицы** (нанопорошки) – это малоразмерные твердые вещества, геометрический размер которых изменяется от десятых долей до 100 нм.

**Наноразмерная структура** (наноструктура) – структура, элементы которой имеют размер от 1 до 100 нм. Примером наноструктур являются наноматериалы.

**Наноматериалы** – материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Наноматериалы, в свою очередь, делятся на две основные группы: объемные и поверхностные наноструктурные материалы.

*Объемные наноструктурные материалы* – компактированные (т.е. находящиеся не в виде порошка или пленки, а в виде компакта) наноструктурные материалы.

*Поверхностные наноструктуры* – наноразмерные структуры, образующиеся на поверхности материала вследствие нанесения (напыления, осаждения и т.д.) покрытия или пленки, либо вследствие обработки (механической, лазерной, плазменной и др.) поверхностного слоя компактированного материала.

С самого начала развития нанотехнологий сформировались два функциональных подхода: технология создания нанообъектов и наноструктур «снизу вверх» и «сверху вниз».

*Первый подход* основан на сборке наноизделий из атомов и молекул. К технологиям «снизу вверх» можно отнести создание наноизделий посредством методов атомной силовой и сканирующей зондовой микроскопии, а также некоторые другие технологии. Несмотря на значительные трудности при их реализации, именно эти технологии считаются основой будущего развития нанотехнологий.

*Второй подход* основан на обработке обычных материалов и получении из них наноизделий – наноразмерных объектов или наноструктур. В качестве примера технологий «сверху вниз» можно привести деформационное объемное наноструктурирование посредством многократной пластической деформации и многие другие. Технологии «сверху вниз» являются основой развития нанотехнологий в настоящее время.

*Наноразмерная погрешность* (нанопогрешность) – погрешность обработки, лежащая в диапазоне от 1 до 100 нм (исходный термин «nanoprecision») может быть переведен и как нанопогрешность, и как наноточность).

Неотъемлемой составляющей нанотехнологий являются *наноизмерения* – измерения наноразмерных объектов или измерения с наноразмерной погрешностью – это измерения (главным образом, линейные и угловые) с погрешностью, соизмеримой с размером наноструктур (обычно менее 100 нм). Измерения с наноразмерной погрешностью необходимы для контроля изделий с допустимой погрешностью размеров менее 100 нм.

## Тема 6.1. Классификация наноматериалов (дискуссия – 1 ч.)

Наноматериалы можно разделить на четыре основные категории.

*Первая категория* включает материалы в виде твердых тел, размеры которых в одном, двух или трех пространственных координатах не превышает 100 нм (нанопорошки, нановолокна, нанопроволоки и т.п.). Такие материалы могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких слоев (для пленки). В связи с этим первую категорию можно определить как наноматериалы с малым числом структурных элементов, или наноматериалы в виде наноизделий.

*Вторая категория* представлена материалами в виде малоразмерных изделий с характерным размером в диапазоне 1 мкм...1 мм (проволока, лента, фольга). Они содержат значительное число структурных элементов и их можно классифицировать как наноматериалы в виде микроизделий.

*Третья категория* представляет собой массивные (или объемные) наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких миллиметров). Они состоят из очень большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и фактически являются поликристаллическими материалами с размером зерна от 1...100 нм.

В свою очередь третью категорию наноматериалов можно разделить на два класса. В первый входят однофазные материалы, структура и (или) химический состав которых изменяются по объему материала только на атомном уровне. Они находятся в неравновесном состоянии. К таким материалам относятся, например, стекла. Ко второму классу можно отнести многофазные материалы, например, на основе сложных металлических сплавов.

*Четвертая категория* включает композиционные материалы, содержащие в своем составе компоненты из первой и второй категории.

### Особенности наноматериалов

Свойства нанообъектов и наноструктур существенно отличаются от свойств макротел. Наиболее сильно они начинают проявляться в диапазоне размеров кристаллитов порядка 10...100 нм.

Существует несколько особенностей специфического поведения нанообъектов и наноструктур. Условно их можно разделить на 4 группы:

1. Увеличение объемной доли свободных поверхностей. Доля атомов  $\alpha$ , находящихся в тонком поверхностном слое ( $\sim 1$  нм), растет с уменьшением размера  $R$  частицы (частицы порошка или зерна объемного материала вещества), поскольку  $\alpha \sim \frac{S}{V} \sim \frac{1}{R}$ , где  $S$  – площадь поверхности частицы;  $V$  – объем частицы.

У поверхностных атомов задействованы не все связи с соседними атомами. В результате в поверхностном слое возникают сильные искажения кристаллической решетки и, как следствие, изменения механических свойств (прочности, твердости, пластичности).

Другим аспектом является тот факт, что свободная поверхность является местом сосредоточения (стока) кристаллических дефектов. Установлено, что процессы деформации и разрушения протекают в первую очередь в поверхностном слое, что определяет его механические свойства.

2. Увеличение объемной доли границ раздела с уменьшением размеров зерен и кристаллитов в наноматериалах.

Неравновесный характер границ зерен обусловлен присутствием высокой концентрации пограничных дефектов между ними. Эта неравновесность характеризуется избыточной энергией границ зерен, наличием дальнедействующих упругих напряжений и вызывает возникновение искажений кристаллической решетки и изменение межатомных расстояний. В результате повышается микротвердость.

3. Проявление квантовых размерных эффектов в наноматериалах (в материалах с размерами кристаллитов в нижнем нанодиапазоне  $D < 10$  нм). Такой размер кристаллитов становится соизмерим с длиной волны свободного носителя, т.е. при  $D \leq \lambda_n$  ( $D$  – размер носителя, например, электрона и  $\lambda_n$  – длина волны его пробега, равная  $(m_e \cdot E)^{-1/2}$ , где  $m_e$  – эффективная масса электрона;  $E$  – энергия Ферми).

Квантовыми размерными могут быть эффекты при фазовых переходах в наночастицах, нанокристаллических материалах, нанокompозитах.

4. Появление или исчезновение физических эффектов в наноразмерном диапазоне.

Такие эффекты обусловлены тем, что наибольший размер одного из структурных элементов объемного наноструктурированного материала или частицы нанопорошка в целом может быть меньше или равен размеру, характерному для определенного физического явления. Так, для прочностных свойств это будет размер бездефектного кристалла, для магнитных – размер одноименного кристалла, для электропроводности – длина свободного пробега электронов. Например, расчетный размер частиц порошка, не содержащих дислокационных петель, для меди составляет 250 нм, а у ее зерен в поликристалле – 38 нм. У алюминия соответственно – 60 нм и 18 нм.

Таким образом, нанотехнологии представляют собой совокупность методов и приемов нанобработки, т.е. создания (обработки) наноразмерных структур (объектов) или обработки макрообъектов (деталей, заготовок) с наноразмерной погрешностью.

## Тема 6.2. Основные области применения наноматериалов (дискуссия – 1 ч.)

В настоящее время наноматериалы и нанотехнологии используются во всех развитых странах мира в наиболее значимых областях науки и техники.

*Конструкционные материалы.* Повышение предела прочности и текучести материала обычно приводит к росту его хрупкости, т.е. к снижению допустимой деформации до разрушения. Наноструктурные материалы обеспечивают оптимальные сочетания этих свойств, причем эффект достигается не за счет использования дорогостоящих легирующих компонентов, а благодаря изменению структуры материала.

В основе повышения характеристик наноматериалов лежит уменьшение размера зерен материала до наноуровня, возможность образования сложных композитных соединений и создание изделий в различных отраслях производства. Так, прочностные свойства НМ увеличиваются по сравнению с обычными материалами в 2...3 раза и более, а пластичность и ударная вязкость – в 1,5...2,0 раза, особенно у керамических НМ, то и скорость износа таких материалов уменьшается в десятки раз.

В наноструктурных материалах области контакта зерен занимают очень большую долю объема всего материала, что значительно расширяет возможности легирования различных материалов и их сплавов.

Итак, наноразмерные структуры конструкционных материалов открывают большие возможности для получения свойств нового уровня – высокой прочности, твердости, износостойкости при достаточно высокой пластичности.

Объемные (компактные) НМ в силу своих высоких прочностных характеристик могут найти широкое применение в качестве материала для деталей, работающих в условиях сильного износа, при ударных и вибрационных нагрузках, а также в качестве армирующих компонентов в межфазных слоях композиционных материалов.

*Инструментальные материалы.* Инструментальные сплавы с нанозерном являются более стойкими по сравнению с обычными. Так, введение

в твердые сплавы и режущую керамику волокон из углеродистых наноматериалов, например, фуллеренов, значительно снижает их хрупкость, которая является существенным недостатком.

Высокая износостойкость и малый коэффициент трения проявляется при использовании поликристаллических алмазов и алмазоподобных покрытий, а также наноструктурных многослойных пленок на основе BN, TiC, TiN, Ti (Al, N), обладающих высокой твердостью (до 70 МПа).

**Производственные технологии.** Важным и перспективным является использование наноматериалов в качестве компонентов КМ самого разного назначения. Добавление тугоплавких нанопорошков к обычным при производстве сталей и сплавов методами порошковой металлургии позволяет снижать пористость изделий, улучшать их механические свойства. Высокая удельная поверхность нанопорошков способствует их применению в качестве катализаторов в ряде химических производств.

**Военная промышленность.** Ультрадисперсные порошки используются в составе ряда радиопоглощающих покрытий самолетов, созданных с применением технологии «Стелс», а также в перспективных видах взрывчатых веществ и зажигательных смесей. Углеродные нановолокна используются в специальных боеприпасах, предназначенных для вывода из строя энергосистем и электроники противника.

**Медицина и биотехнологии.** Наноматериалы обладают хорошей биосовместимостью, химической, термической и механической стойкостью, поэтому перспективны для использования в узлах биосенсоров, протезов, имплантантов. Нанопорошки лекарственных препаратов используются в медикаментах быстрого усвоения и действия при экстремальных условиях.

**Электронная техника.** Комплекс магнитных характеристик некоторых НМ делает перспективным их использование для записывающих устройств, для считывания информации с магнитных дисков. Углеродные нанотрубки применяются в магнитных чернилах и тонерах, а также в качестве сверхпроводников.

**Защита поверхности материалов.** Для повышения износостойкости материалов, защиты от коррозии, снижения трения и т.д. широко используют износостойкие и защитные покрытия. В частности, их применяют для упрочнения режущего инструмента, работающего в очень жестких условиях: при высоких напряжениях (до 4000 МПа) и температуре (более 1000 °С), способствующих всем видам износа (абразивный, адгезионный, окислительный, диффузионный и др.).

Технологические методы нанесения покрытий осуществляются в основном за счет адаптации и модернизации существующих методов нанесения тонких покрытий (электролитический, изотермический, физическое осаждение и др.). На сегодняшний день наиболее часто используются три из них, а именно:

- осаждение покрытий в условиях ассистирования;
- осаждение многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины;
- осаждение многофазных покрытий.

Большинство соединений, применяемых в качестве упрочняющих покрытий, имеют высокие значения микротвердости, но являются достаточно хрупкими.

При нанесении покрытий имеют место два эффекта:

– эффект, связанный с наноразмерной структурой покрытия, при которой увеличивается твердость и хрупкость;

– эффект, связанный с переходом от трехмерной системы к двумерной, для которой увеличение внутренней энергии и энтропии не повышает хрупкость.

#### **Ограничения в использовании наноматериалов**

Несмотря на свои достоинства и высококачественные характеристики, наноматериалы обладают и некоторыми недостатками. В частности, из-за очень большой объемной доли границ зерен они склонны к коррозии, поэтому не могут быть рекомендованы для работы в условиях, способствующих ее развитию (диффузия атомов с поверхностью и по границам зерна; высокие температуры в сочетании с коррозионными воздействиями; радиация; состав сплава, склонный к изменениям химического состава по границам зерен и т.д.).

Другим важным ограничением является нестабильность структуры наноматериалов, а следовательно, нестойкость их свойств. Так, при термических, радиационных, деформационных и других воздействиях в них неизбежны рекристаллизационные, релаксационные, сегрегационные и гомогенизационные процессы, а также явления распада, фазовых превращений, спекания и запыливания нанопор и наноклапиров, аморфизации кристаллизации.

Например, углеродные нановолокна, предназначенные для фильтрации жидкости, могут повреждаться под действием вибраций и структурной неустойчивости углерода, возбуждаемой потоком жидкости. При формировании изделий из нанопорошков достаточно остро встает также проблема слипания наночастиц, что может осложнить получение материалов с заданной структурой и распределением компонентов.

В настоящее время наиболее широко выпускаются такие наноматериалы, как нанопорошки металлов и сплавов, оксидов (кремния, железа, сурьмы, алюминия, титана), некоторых карбидов, а также углеродные нановолокна и фуллереновые материалы.

#### **Методы нанобработки**

Существуют следующие основные группы методов суперпрецизионной (высокоточной) обработки наноматериалов:

- размерная нанобработка объемных изделий (лезвийная, абразивная, электроэрозионная, лазерная и др.);
- нанобработка сканирующими зондами.

**Размерная нанобработка.** Методы размерной нанобработки направлены на изменение размера и формы изделий посредством локального инструментального воздействия. При этом погрешность обрабатываемых размеров должна лежать в наноразмерном диапазоне (1...100 нм). Таким образом, можно сказать, что размерная нанобработка – это обработка с нанопогрешностью.

**Алмазное наноточение.** Наиболее распространенной формой нанобработки в настоящее время является алмазное наноточение, которое применяется при изготовлении деталей из цветных сплавов, например, металлических зеркал, магнитных дисков ЭВМ и др. Этот вид обработки, по сравнению с обработкой свободным абразивом, позволяет повысить в 5...10 раз производительность процесса и исключить шаржирование (насыщение поверхности инструмента – притиров – абразивным порошком или пастой).

При точении алмазный резец перемещается по траектории, соответствующей осевому сечению обрабатываемой поверхности (прямая, дуга окружности, парабола и др.). Поэтому траектория движения резца, точность вращения шпинделя или стола с обрабатываемой деталью должны соответствовать расчетной траектории с точностью до долей микрометра.

При наноточении на режущей кромке алмазного резца могут развиваться локальные зоны повышенной температуры, которые при малом радиусе кривизны ( $R = 0,1$  мкм) могут приводить к окислению кромки резца кислородом воздуха и, как следствие, ее обгоранию и увеличению  $R$ . При этом изменяется длина резца, что снижает точность обработки. Поэтому большое значение имеет определение критического температурного режима резца.

Для получения необходимой погрешности нанобработки и шероховатости поверхностей таких изделий, как магнитные диски, зеркала лазерных отражателей, применяются алмазные резцы с прямолинейной режущей кромкой. Процесс обработки поверхностей таким резцом состоит из двух составляющих: резания и выглаживания. Совмещение этих двух процессов позволяет получать поверхность с  $R_a < 0,01$  мкм (10 нм).

Для получения необходимой точности и шероховатости также необходимо и оборудование соответствующей точности. В России на базе станка МК6521Ф3 был создан сверхточный станок МК6521Ф3.04 с ЧПУ для обработки наружных и внутренних поверхностей тел вращения, имеющих следующие параметры обработки:

- шероховатость обрабатываемой поверхности  $R_z$  менее 25 нм;
- погрешность формы обработанной поверхности 0,5 мкм;
- дискретность обработки перемещений по осям  $x$  и  $z$  10 нм.

Наиболее точные (ультрапрецизионные) станки алмазного точения производятся в США и Японии. Наибольшую точность позиционирования имеет обрабатывающий центр Ultra Nano 100 (Япония, 2004 г.). Сверхвысокоточная обработка здесь реализуется за счет контроля линейных перемещений с дискретностью 0,07 нм. Центр имеет двойные линейные сервомоторы по каждой из трех осей, закрытые аэроэстатические направляющие, бесконтактные линейные датчики и собственную систему управления. Конструкция обрабатываемого центра – полнокерамическая на гранитной основе.

**Наношлифование.** Целью наношлифования является не только снижение шероховатости, но и достижение суперпрецизионной точности, что требует такой же точности базирования (позиционирования) обрабатываемой заготовки.

Монопольное положение среди всех методов наношлифования занимает обработка связанным абразивным материалом (кругами). Ранее обработка шлифовальными кругами применялась лишь для предварительных технологических операций, однако в последние годы появились новые модели суперпрецизионных станков для нанобработки. В качестве примера можно привести круглошлифовальный станок модели S12 фирмы Fritz Studer (Германия) с погрешностью обработки около 10 нм. Высокие точность и скорость обработки обеспечиваются за счет новой комбинации при-

вод / направляющие – линейные двигатели, которые обеспечивают скорость холостых перемещений до 30 м/мин при ускорении до  $3 \text{ м/с}^2$ , а также за счет уникальной станины из гранита с высокими демфирующими свойствами. Термическая стабильность конструкции гарантированно сохраняется благодаря встроенным агрегатам охлаждения.

*Электроэрозионная обработка.* В последние годы уровень точности электроэрозионной обработки значительно повышается, поэтому электроэрозионные станки в настоящее время являются одним из основных средств размерной обработки. Так, вырезной станок ЕХС-100 имеет следующие характеристики:

- дискретность подачи привода (50 с): 10 нм;
- достижимая точность обработки:  $\pm 0,8 \text{ мкм}$ ;
- наилучшая шероховатость:  $R_a = 30 \text{ нм}$ .

Все наностанки фирмы Sodick Co LTD (Япония) имеют двоярные бессердечниковые линейные двигатели, изготовленные практически полностью из специальной керамики с коэффициентом теплового расширения вдвое меньшим, чем у гранита. Некоторые узлы термостатируются, а столы и другие рабочие детали наностанков перемещаются по закрытым аэроэрозионным направляющим (воздушные подушки) и используют антиинерционные механизмы.

*Лазерная нанобработка* – суперпрецизионная обработка, осуществляемая посредством лазерного удаления вещества с поверхности материала с помощью лазерного импульса. Качество лазерной обработки определяется погрешностью фокусировки луча, постоянством мощности лазерного импульса и его продолжительностью, т.е. для повышения точности обработки нужно точно фокусировать лазерный луч и предельно уменьшать длительность лазерного импульса. Для фокусировки лазерного луча используются в основном пьезоэлектрические устройства нанопозиционирования. Длительность лазерного луча должна быть порядка 100...200 фемтосекунд ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ ). Такие короткоимпульсные лазеры называют фемтосекундными. Примером практической реализации установки для лазерной нанобработки является фемтосекундная микронанообрабатывающая система ELS-100 производства Tokyo Instruments Inc (Япония), обеспечивающая трехмерное позиционирование с разрешением менее 200 нм и автофокусировку с погрешностью  $\pm 100 \text{ нм}$ . Система оснащена гелио-неоновым лазером с длиной волны 543,5 нм, продолжительностью и частотой импульса 150 фс и 300 кГц соответственно, а также ТВ-монитором для наблюдения за обработкой в режиме реального времени.

Система предназначена для резания и сверления металлов, полупроводников, диэлектриков, композитных материалов, полимеров и т.д. В качестве приводов системы лазерного сканирования использованы пьезоактуатор, гальваническое зеркало, аэроэрозионный подшипник и шаговый мотор. Весьма перспективной обработкой высокопрочных и наноструктурных материалов является технология электроалмазного шлифования, суть которой заключается в одновременном анодном растворении удаляемого припуска обрабатываемого материала и непрерывной электрохимической правке шлифовального инструмента.

#### 4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Приготовление порошковых материалов	8	-
2	2.	Определение свойств порошков	6	-
3	2.	Получение деталей из порошковых материалов	6	-
4	4.	Изготовление текстолитовых листовых деталей	4	-
5	4.	Исследование структуры композиционных материалов	4	-
6	4.	Определение влагопоглощения полимерных композитов	6	-
<b>ИТОГО</b>			34	-

#### 4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Проектирование технологического процесса получения прессовки сменных многогранных пластин из твердых сплавов	5	-
2	2.	Проектирование матрицы пресс-формы для прессования сменных многогранных пластин	2	-
3	3.	Разработка рецептуры, определение свойств и структуры композиционного материала	4	-
4	3.	Расчет на прочность консольного цилиндрического стержня, армированного продольными ребрами	4	-
5	3.	Задачи на применение композиционных материалов на практике	2	-
<b>ИТОГО</b>			17	-

#### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено.

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Σ комп.</i>	<i>t<sub>ср</sub>, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ПК</i>				
		<i>16</i>				
1. Классификация композиционных материалов	5	+	1	5	Лк, СР	Экзамен
2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями	65	+	1	65	Лк, ЛР, ПЗ, СР	Экзамен
3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями	40	+	1	40	Лк, ПЗ, СР	Экзамен
4. Двумерные композиционные материалы	35	+	1	35	Лк, ЛР, СР	Экзамен
5. Эвтектические композиционные материалы	4	+	1	4	Лк, СР	Экзамен
6. Композиционные наноматериалы	4	+	1	4	Лк, СР	Экзамен
<b><i>всего часов</i></b>	<b>153</b>	<b>153</b>	<b>1</b>	<b>153</b>		

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2013. - 54 с.
2. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2013. - 30 с.
3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2017. - 55 с.
4. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2017. - 40 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	<i>Наименование издания</i>	<i>Вид занятия</i>	<i>Кол-во экз. в библ., шт.</i>	<i>Обеспеченность, (экз./ чел.)</i>
<b>Основная литература</b>				
1.	Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург: НОТ, 2010. - 822 с.	Лк, ЛР, СР	25	1,0
2.	Свойства и применение композиционных материалов: учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск: БрГУ, 2014. - 242 с.	Лк, ЛР, ПЗ, СР	46	1,0
3.	Технология композиционных материалов: учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск: БрГУ, 2012. - 152 с.	Лк, СР	49	1,0
4.	Композиционные материалы на основе эпоксиполимеров для машиностроения: учебное пособие / Е.М. Готлиб, Э.Р. Галимов, Н.Я. Галимова и др. - Казань: Издательство Казанского университета, 2016. - 204 с. [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=480115">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=480115</a>	Лк, СР	ЭР	1,0
5.	Материаловедение и технологии конструкционных материалов: учебное пособие / О.А. Масанский, В.С. Казаков, А.М. Токмин и др. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. - 268 с. [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=435698">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=435698</a>	Лк, СР	ЭР	1,0
<b>Дополнительная литература</b>				
6.	Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2013. - 54 с.	ПЗ, СР	88	1,0
7.	Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2013. - 30 с.	ЛР, СР	87	1,0
8.	Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2017. - 55 с.	ПЗ, СР	49	1,0
9.	Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск: БрГУ, 2017. - 40 с.	ЛР, СР	48	1,0

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ

[http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).

2. Электронная библиотека БрГУ <http://ecat.brstu.ru/catalog> .

3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru> .

4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань» <http://e.lanbook.com> .

5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <http://window.edu.ru> .

6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .

7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .

8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Номер раздела Основные положения раздела, рекомендуемые для СР	Рекомендуемая литература	Форма отчета	Всего часов
1.	<b>1. Классификация композиционных материалов</b> 1.1. Понятие, признаки и классификация КМ	[2], [3]	Экзамен	1
2.	<b>2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями</b> 2.1. Химические, физические и технологические свойства порошков 2.2. Технологические методы получения порошков 2.3. Твердые сплавы 2.4. Керамические КМ 2.5. Сверхтвердые материалы 2.6. Прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов 2.7. Технология спекания порошковых материалов	[2], [3], [6], [7], [9] [2],[3],[7],[8],[9] [2], [3], [7], [8] [2], [3], [5] [2], [3] [2], [3], [6], [7], [8], [9] [2], [6], [9]	Экзамен, ЛР 1...3 ПЗ 1, 2	26
3.	<b>3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями</b> 3.1. Упрочнение волокнами 3.2. Армирующие вещества и их свойства 3.3. Методы получения металлических КМ, армированных волокнами 3.4. Свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей 3.5. Методы получения полимерных одномерноармированных КМ	[1], [2], [3], [4] [2], [3], [4] [2], [3], [4] [2], [3], [4], [8], [9] [2], [3], [4], [8], [9]	Экзамен, ПЗ 3...5	20
4.	<b>4. Двумерные композиционные материалы</b> 4.1. Ткани, применяемые для армирования пластиков 4.2. Свойства стеклянных волокон для производства тканей 4.3. Производство тканей из стеклянных волокон 4.4. Маркировка стеклотканей	[2], [3], [4] [2], [3], [4] [2], [7], [9] [2], [3], [8], [9]	Экзамен, ЛР 4...6	17
5.	<b>5. Эвтектические композиционные материалы</b> 5.1. Эвтектические КМ на основе алюминия 5.2. Эвтектические КМ на основе никеля	[2], [3], [5] [2], [3], [5]	Экзамен	2
6.	<b>6. Композиционные наноматериалы</b> 6.1. Классификация наноматериалов 6.2. Основные области применения наноматериалов	[2], [3], [5] [2], [3], [5]	Экзамен	2
<b>ИТОГО</b>				<b>68</b>

## 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных и практических работ

### Лабораторная работа № 1 Приготовление порошковых материалов

*Цель работы:* освоить технологию получения порошков методом механического дробления в шаровой мельнице.

*Порядок выполнения работы:*

1. Определить параметры шаровой мельницы: диаметр барабана, диаметры мелющих шаров, коэффициент заполнения мельницы.
2. Рассчитать режимы работы мельницы: скорость вращения барабана и время измельчения.
3. Поместить в мельницу стружку из силумина ( $Al - Si$ ) в количестве достаточном для измельчения.
4. Провести измельчение в течение 30 минут, после чего взять пробу полученного порошка и измерить средний размер частиц.
5. Продолжать измельчение еще 60 минут, после чего извлечь порошок из мельницы и снова измерить средний размер частиц.
6. Провести измельчение мелкодисперсного порошка оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) в течение 60 минут. Измерить размер частиц до и после измельчения.

*Оборудование и инструмент:*

1. Шаровая мельница с мелющими шарами.
2. Весы электронные.
3. Токарный станок 1К62.
4. Микроскоп.
5. Штангенциркуль.
6. Емкость для хранения порошка.
7. Стружка алюминиевого сплава с кремнием ( $Al - Si$ ).

*Структура и содержание отчета:*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Порядок выполнения работы.
4. Оборудование и инструмент.
5. Эскиз мельницы с расстановкой размеров.
6. Результаты работы оформить в виде табл. 1.2.
7. Выводы по работе.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе:*

проработка лекционного материала, основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : НОТ, 2010. - 822 с.
2. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 30 с.
4. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 40 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки:*

1. Назовите основные способы получения порошков.
2. Каким образом рассчитываются режимы работы мельницы?
3. От чего зависит массовая производительность мельницы?
4. От чего зависит критическая частота вращения барабана?

### Лабораторная работа № 2 Определение свойств порошков

*Цель работы:* научиться определять свойства порошковых материалов, таких как насыпная масса, насыпной объем, текучесть и размер частиц.

*Порядок выполнения работы:*

1. Определить насыпную массу порошков оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и силумина ( $Al - Si$ ).
2. Определить насыпной объем порошков оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и силумина ( $Al - Si$ ).
3. Определить текучесть порошков оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и силумина ( $Al - Si$ ).
4. Определить размер частиц порошков оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и силумина ( $Al - Si$ ).

*Оборудование и инструмент:*

1. Колба для порошка.
2. Воронка с отверстием  $d = 5$  мм.
3. Весы электронные.
4. Секундомер.
5. Микроскоп.
6. Измельченные порошки оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и силумина ( $Al - Si$ ), полученные в лабораторной работе № 1.

*Структура и содержание отчета:*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.

3. Порядок выполнения работы.
4. Оборудование и инструмент.
5. Описание методов измерения свойств порошков.
6. Результаты работы оформить в виде табл. 2.1.
7. Выводы по работе.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе:*

проработка лекционного материала, основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : НОТ, 2010. - 822 с.
2. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 30 с.
4. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 40 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки:*

1. Дайте характеристику основных свойств порошковых материалов.
2. Опишите методику определения насыпной массы порошка.
3. Как определяется текучесть порошков?
4. Каким образом оценивают размер частиц порошков?

### **Лабораторная работа № 3** **Получение деталей из порошковых материалов**

*Цель работы:* освоить технологию получения деталей из порошковых композиционных материалов.

*Порядок выполнения работы:*

1. Приготовить шихту порошкового материала, состоящую из порошка оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) – 75 %, и порошка силумина ( $Al - Si$ ) – 25 %. Процентное содержание отражает объемную долю компонентов в шихте.
2. Добавить 10 % пластификатора (парафин). Парафин растворить в бензине, смешать с шихтой и выпаривать на водяной бане до полного высыхания шихты.
3. Рассчитать насыпную массу полученной шихты.
4. Спрессовать порошок в пресс-форме с выдержкой давления в течение 15 минут и последующей допрессовкой длительностью 5 минут.
5. Извлечь прессовку из пресс-формы, измерить размеры детали и ее массу, сравнить с размерами пресс-формы и рассчитать коэффициент упругого последействия.
6. Произвести спекание полученной прессовки в печи при температуре 900 °С.
7. Снять размеры детали после спекания, сравнить их с размерами прессовки и рассчитать коэффициент усадки.

*Оборудование и инструмент:*

1. Колба для порошка.
2. Воронка с отверстием  $d = 5$  мм.
3. Весы электронные.
4. Секундомер.
5. Пресс-форма.
6. Муфельная печь.
7. Микрометр 0 – 25 мм.
8. Парафин.
9. Бензин.
10. Порошок алюминия ( $Al$ ).
11. Измельченные порошки оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и силумина ( $Al - Si$ ), полученные в лабораторной работе № 1.

*Структура и содержание отчета:*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Порядок выполнения работы.
4. Оборудование и инструмент.
5. Эскиз пресс-формы с размерами.
6. Расчет величин упругого последействия и усадки при спекании.
7. Эскиз детали после прессования и после спекания с расстановкой размеров.
8. Результаты работы оформить в виде табл. 3.1.
9. Выводы по работе.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе:*

проработка лекционного материала, основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : НОТ, 2010. - 822 с.

2. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 30 с.

4. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 40 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки:*

1. Каким образом приготавливается шихта порошкового материала?
2. Для чего в шихту добавляют пластификатор и каким образом его смешивают с порошком?
3. Опишите технологию прессования порошковых материалов.
4. Опишите технологию спекания порошковых материалов.
5. Дайте характеристику параметрам упругого последствия и усадки при спекании.

## Лабораторная работа № 4

### Изготовление текстолитовых листовых деталей

*Цель работы:* освоить технологию изготовления текстолитовых листовых деталей на примере производства стеклотекстолита.

*Порядок выполнения работы:*

1. Подготовить исходные компоненты: стеклоткань и пропиточный материал.
2. Произвести сборку слоев композита.
3. С помощью приспособления спрессовать слои и оставить до полного затвердевания, излишки пропиточного материала удалить.
4. С помощью микроскопа изучить структуру полученного композита. Для этого вырезать образец размером 10×10×10 перпендикулярно слоям. Сделать фотографии поверхности при увеличении на микроскопе.

*Оборудование и инструмент:*

1. Микроскоп.
2. Стеклоткань.
3. Эпоксидная смола и отвердитель.
4. Приспособление для прессования листовых деталей.
5. Средства личной безопасности при работе с эпоксидными смолами (перчатки, очки, респиратор).

*Структура и содержание отчета:*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Порядок выполнения работы.
4. Оборудование и инструмент.
5. Схема прессования.
6. Снимки поверхности образцов при увеличении.
7. Выводы по работе.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе:*

проработка лекционного материала, основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : НОТ, 2010. - 822 с.

2. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

1. Материаловедение и технология материалов [Текст] : учебник для бакалавров / Под ред. Г. П. Фетисова. - 7-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2015. - 767 с.

2. Рогов, В. А. Современные машиностроительные материалы и заготовки : учебное пособие / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. - М. : Академия, 2008. - 336 с.

3. Брызгалин, Г.И. Проектирование деталей из композиционных материалов волокнистой структуры: учебное пособие / Г.И. Брызгалин. - М.: Машиностроение, 1982. - 84 с.

4. Композиционные материалы : справочник / Под ред. В. В. Васильева. - М.: Машиностроение, 1990. - 510 с.

5. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы. Механика и технология : учебник для вузов / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс; Пер. с англ. - М. : Техносфера, 2004. - 408 с.

6. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 30 с.

7. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 40 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки:*

1. Что представляют собой текстолиты?
2. В чем заключается отличие между термопластами и реактопластами?
3. Каким образом производится формование стеклотекстолита контактным способом?
4. Какие требования по технике безопасности необходимо соблюдать при работе с полимерными связками?

## Лабораторная работа № 5

### Исследование структуры композиционных материалов

*Цель работы:* изучить структуру композиционных материалов с порошковыми, волокнистыми и ткаными наполнителями.

*Порядок выполнения работы:*

1. Вырезать образцы для микроскопических исследований размером 10×10×10 мм.
2. С помощью микроскопа изучить поперечный и продольный разрезы образцов.
3. Сделать фотографии поверхности при увеличении на микроскопе.

*Оборудование и инструмент:*

1. Микроскоп.
2. Фотоаппарат.
3. Профиль из крупнозернистого порошкового материала (шлифовальный круг).
4. Профиль круглый с полимерной матрицей, армированной стеклянными волокнами.
5. Профиль листовой, армированный стеклотканью.

*Структура и содержание отчета:*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Порядок выполнения работы.
4. Оборудование и инструмент.
5. Снимки поверхности образцов при увеличении.
6. Выводы по работе.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе:*

проработка лекционного материала, основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : НОТ, 2010. - 822 с.
2. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 30 с.
4. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 40 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки:*

1. От чего зависит шероховатость поверхности после механической обработки стеклопластиков?
2. Какие дефекты могут образоваться после механической обработки?
3. Какие режимы обработки обеспечивают лучшее качество обработанной поверхности?
4. Какие параметры качества оцениваются при обработке полимерных композиционных материалов, армированных волокнами и тканями?
5. Каким параметром оценивается износ режущего инструмента при обработке полимерных композиционных материалов? Почему выбран именно этот параметр и от чего зависит его величина?

## Лабораторная работа № 6

### Определение влагопоглощения полимерных композитов

*Цель работы:* освоить методику определения влагопоглощения и равновесного состояния полимерных композитов.

*Порядок выполнения работы:*

1. Получить образцы композиционных полимерных материалов из СТЭФ-1, ДСтП-III и детали, полученной в лабораторной работе №4. Размеры образцов 10×10×10 мм.
2. Измерить влагопоглощение образцов по методике, представленной в ГОСТ Р 56762-2015.
3. Построить график влагопоглощения исследованных композитов.

*Оборудование и инструмент:*

1. Весы аналитические с точностью 0,01 г.
2. Печь для высушивания образцов.
3. Гигроскопическая ткань.
4. Емкость для жидкости с возможностью удерживания теплоты (термос).
5. Термометр.

*Структура и содержание отчета:*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Порядок выполнения работы.
4. Оборудование и инструмент.
5. Протокол испытаний по форме табл. 6.1.
6. График влагопоглощения исследованных образцов.
7. Выводы по работе.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе:*

проработка лекционного материала, основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

#### *Основная литература*

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Михайлин. - 2-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : НОТ, 2010. - 822 с.
2. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

#### *Дополнительная литература*

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 30 с.
4. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: лабораторный практикум / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 40 с.

#### *Контрольные вопросы для самопроверки:*

1. Что такое влагопоглощение?
2. Что такое равновесное состояние влажности?
3. Что такое насыщенность влагой?
4. Какова минимальная продолжительность контрольного периода кондиционирования полимерных композитов, если неизвестен коэффициент диффузии?

### **Практическое занятие №1 Проектирование технологического процесса получения прессовки сменных многогранных пластин из твердых сплавов**

#### *Цель работы:*

получение навыков проектирования технологического процесса изготовления изделий из порошковых материалов.

*Задание:* спроектировать процесс получения сменной многогранной пластины из твердого сплава методом порошковой металлургии, размеры, материал и форма которой соответствуют выданному преподавателем варианту задания.

#### *Порядок выполнения:*

1. Рассчитать высоту загрузочной камеры.
2. Рассчитать размеры рабочей полости пресс-формы.
3. Рассчитать диаметр стержня.
4. Определить высоту спрессованной детали.
5. Определить усилие прессования и выбрать оборудование.

#### *Форма отчетности:*

Отчет по практическому занятию должен содержать: цель, задание, расчеты всех необходимых этапов, выводы.

#### *Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

#### *Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:*

Проработка основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

#### *Основная литература*

1. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

#### *Дополнительная литература*

2. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 54 с.
3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 55 с.

#### *Контрольные вопросы для самопроверки*

1. Что такое аддитивность?
2. Каким образом выбирается оборудование для прессования?

### **Практическое занятие №2 Проектирование матрицы пресс-формы для прессования сменных многогранных пластин**

#### *Цель работы:*

получение навыков проектирования технологической оснастки для изготовления изделий из порошковых материалов.

*Задание:* спроектировать конструкцию матрицы пресс-формы по результатам расчетов, полученных в практической работе № 1 настоящих методических указаний.

#### *Порядок выполнения:*

1. Распределить силы, действующие на стенки пресс-формы.
2. Рассчитать силу реакции стенки R.
3. Определить толщину стенки пресс-формы.
4. Определить габаритные размеры матрицы.

#### *Форма отчетности:*

Отчет по практическому занятию должен содержать: цель, задание, расчеты всех необходимых этапов, выводы.

#### *Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

#### *Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:*

Проработка основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

#### *Основная литература*

1. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

#### *Дополнительная литература*

2. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 54 с.

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 55 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки*

1. От чего зависит толщина стенки пресс-формы?
2. По какому принципу производится распределение сил при прессовании?

### Практическое занятие №3

#### Разработка рецептуры, определение свойств и структуры композиционного материала

*Цель работы:*

получение навыков проектирования свойств и структуры композиционного материала.

*Задание:* спроектировать стержень, работающий под нагрузкой на растяжение и выполненный из композиционного материала с хаотично-армированными дискретными волокнами.

*Порядок выполнения:*

1. Выбрать материал матрицы и волокон двухкомпонентного хаотично армированного дискретного композита.
2. Дать оценку энергоемкости ( $W$ ) изготовления возможных вариантов проектирования материала.
3. Для спроектированного композита рассчитать удельную прочность.

*Форма отчетности:*

Отчет по практическому занятию должен содержать: цель, задание, расчеты всех необходимых этапов, выводы.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:*

Проработка основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

2. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 54 с.

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 55 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки*

1. Что такое удельная прочность?
2. Как выбирается армирующий компонент?
3. Как рассчитывается объемная доля компонентов?

### Практическое занятие №4

#### Расчет на прочность консольного цилиндрического стержня, армированного продольными ребрами

*Цель работы:*

получение навыков прочностного расчета армированных конструкций.

*Задание:* произвести расчет стержня на прочность и определить деформацию нагруженного участка (рис. 4.1). Стенка стержня является трехслойной и состоит из несущих слоев и легкого наполнителя – пенопласта. Несущие слои образованы из углепластика

намоткой элементарных спиральных слоев с углами армирования  $\varphi = \pm 45^\circ$  толщиной  $0,6 \times 10^{-3}$  м, и кольцевых слоев

$\varphi = 90^\circ$  толщиной  $0,3 \times 10^{-3}$  м. Стержень усилен 12 одинаковыми продольными ребрами. Материал продольных ребер представляет собой композит, состоящий из двух компонентов в соответствии с вариантом задания.

*Порядок выполнения:*

1. Рассчитать жесткость стенки стержня.
2. Рассчитать напряжение и сдвигающие усилия в стержне.
3. Рассчитать прогиб стержня.

*Форма отчетности:*

Отчет по практическому занятию должен содержать: цель, задание, расчеты всех необходимых этапов, выводы.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:*

Проработка основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

2. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 54 с.

3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 55 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки*

1. Как производится спирально-винтовая намотка?
2. От чего зависит величина прогиба стенки?

## Практическое занятие №5

### Задачи на применение композиционных материалов на практике

*Цель работы:*

получение навыков расчета на прочность изделий из композиционных материалов.

*Задача 1.* Бетон состоит из 60% известнякового наполнителя и 40% цементной массы. Определите модуль упругости бетона, если  $E$  известняка и цементной массы равны 63 и 25 ГПа соответственно.

*Задача 2.* Объемная доля волокон в однонаправленном композите равна 38 %. Определите модули упругости  $E_{KM //}$  (параллельно волокнам) и  $E_{KM \perp}$  (перпендикулярно волокнам) для композиционного материала, компоненты которого необходимо выбрать из табл. П.3.2 прил. 3 в соответствии с вариантом задания. Модули упругости волокон и матрицы даны в табл. П.3.1 прил. 3.

*Задача 3.* Объемная доля высокопрочных углеродных волокон в однонаправленном углепластике на основе эпоксидной матрицы равна 60%. Определите прочность композита при растяжении. Предел текучести матрицы при растяжении  $\sigma_T^M = 40$  МПа, прочность волокон  $\sigma_B = 2700$  МПа.

*Задача 4.* Композитный материал, используемый для ремонта автомобиля, состоит из случайно ориентированных коротких стеклянных волокон и полиэфирной матрицы. Определите критическую длину волокон и максимальную вязкость разрушения  $G_c$  композита. Предполагается, что степень армирования равна 30%; диаметр волокон 15 мкм; предел прочности волокон 1400 МПа, а прочность матрицы при сдвиге равна 30 МПа.

*Задача 5.* Требуется спроектировать герметичный корпус глубоководного батискафа, выдерживающего давление в 200 МПа. Герметичный корпус представляет собой тонкостенную сферу с радиусом  $r = 1$  м и постоянной толщиной стенки  $t$ . Возможны два механизма разрушения сферы:

- 1) потери устойчивости под действием внешнего давления
- 2) разрушения или инициализации пластического течения материала при сжимающем давлении

Определите лимитирующий механизм разрушения для каждого из этих материалов (этот механизм разрушения соответствует наибольшему из двух значений  $t$ ). Каков оптимальный материал для изготовления герметичного корпуса батискафа? Каковы будут масса, толщина стенок и лимитирующий механизм разрушения корпуса?

*Порядок выполнения:*

1. Выполнить задачи.

*Форма отчетности:*

Отчет по практическому занятию должен содержать: цель, задание, расчеты всех необходимых этапов, выводы.

*Задания для самостоятельной работы:*

1. Проработать рекомендуемые источники, основную и дополнительную литературу по изучаемому вопросу с целью углубления, систематизации и расширения полученных знаний;
2. Ответить на контрольные вопросы для самопроверки.

*Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:*

Проработка основной и дополнительной литературы. Конспектирование прочитанных литературных источников.

*Основная литература*

1. Свойства и применение композиционных материалов : учебное пособие / А. С. Янюшкин [и др.]. - Братск : БрГУ, 2014. - 242 с.

*Дополнительная литература*

2. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2013. - 54 с.
3. Рычков Д.А. Технология композиционных материалов: практические работы / Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. - Братск : БрГУ, 2017. - 55 с.

*Контрольные вопросы для самопроверки*

1. Как определяется критическая длина волокон?
2. Как найти лимитирующий механизм разрушения тонкостенной детали?

## 9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата

Учебным планом не предусмотрено.

## 10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Информационно-коммуникативные технологии (ИКТ) используются для:

- получения информации при подготовке к занятиям;
- создания презентационного сопровождения занятий;
- работы в электронной информационной среде.

Стандартное лицензионное программное обеспечение:

1. Microsoft Imagine Premium: Microsoft Windows Professional 7.
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level.
3. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.
4. Adobe Reader.

## 11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ Лк, ЛР, ПЗ</i>
Лк	Лекционная / семинарская аудитория	Учебная мебель	-
ЛР	Лаборатория Технологии машиностроения	Учебная мебель; Токарно-винторезный станок 1К62.	ЛР № 1...6
	Лаборатория технических средств измерения	Учебная мебель; Микроскопы МБС-10, ММУ-3, ИМЦЛ.	
ПЗ	Лекционная / семинарская аудитория	Учебная мебель	-
СР	Читальный зал № 1	Учебная мебель; 10-ПК i5-2500/Н67/4Gb (мониторTFT19 Samsung); принтер HP LaserJet P2055D	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-16	способность осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств, участвовать в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий, выполнять мероприятия по выбору и эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств диагностики, автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов для их реализации.	1. Классификация композиционных материалов	1.1. Понятие, признаки и классификация КМ	Экзаменационный вопрос № 1.1
		2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями	2.1. Химические, физические и технологические свойства порошков	Экзаменационный вопрос № 2.1
			2.2. Технологические методы получения порошков	Экзаменационный вопрос № 2.2
			2.3. Твердые сплавы	Экзаменационные вопросы № 2.3
			2.4. Керамические КМ	Экзаменационный вопрос № 2.4
			2.5. Сверхтвердые материалы	Экзаменационный вопрос № 2.5
			2.6. Прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов	Экзаменационный вопрос № 2.6
			2.7. Технология спекания порошковых материалов	Экзаменационный вопрос № 2.7
		3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями	3.1. Упрочнение волокнами	Экзаменационный вопрос № 3.1
			3.2. Армирующие вещества и их свойства	Экзаменационный вопрос № 3.2
			3.3. Методы получения металлических КМ, армированных волокнами	Экзаменационный вопрос № 3.3
			3.4. Свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей	Экзаменационный вопрос № 3.4
			3.5. Методы получения полимерных одномерноармированных КМ	Экзаменационный вопрос № 3.5
		4. Двумерные композиционные материалы	4.1. Ткани, применяемые для армирования пластиков	Экзаменационный вопрос № 4.1
			4.2. Свойства стеклянных волокон для производства тканей	Экзаменационный вопрос № 4.2
			4.3. Производство тканей из стеклянных волокон	Экзаменационный вопрос № 4.3
			4.4. Маркировка стеклотканей	Экзаменационный вопрос № 4.4
		5. Эвтектические композиционные материалы	5.1. Эвтектические КМ на основе алюминия	Экзаменационный вопрос № 5.1
			5.2. Эвтектические КМ на основе никеля	Экзаменационный вопрос № 5.2
		6. Композиционные наноматериалы	6.1. Классификация наноматериалов	Экзаменационный вопрос № 6.1
			6.2. Основные области применения наноматериалов	Экзаменационный вопрос № 6.2

## 2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1.	ПК-16	способность осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств, участвовать в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий, выполнять мероприятия по выбору и эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств диагностики, автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов для их реализации.	1.1. Понятие, признаки и классификация КМ	1. Классификация композиционных материалов
			2.1. Химические, физические и технологические свойства порошков	2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями
			2.2. Технологические методы получения порошков	
			2.3. Твердые сплавы	
			2.4. Керамические КМ	
			2.5. Сверхтвердые материалы	
			2.6. Прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов	
			2.7. Технология спекания порошковых материалов	
			3.1. Упрочнение волокнами	3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями
			3.2. Армирующие вещества и их свойства	
			3.3. Методы получения металлических КМ, армированных волокнами	
			3.4. Свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей	
			3.5. Методы получения полимерных одномерноармированных КМ	
			4.1. Ткани, применяемые для армирования пластиков	4. Двумерные композиционные материалы
			4.2. Свойства стеклянных волокон для производства тканей	
			4.3. Производство тканей из стеклянных волокон	
			4.4. Маркировка стеклотканей	
			5.1. Эвтектические КМ на основе алюминия	5. Эвтектические композиционные материалы
			5.2. Эвтектические КМ на основе никеля	
6.1. Классификация наноматериалов	6. Композиционные наноматериалы			
6.2. Основные области применения наноматериалов				

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<b>знать:</b> <i>ПК-16</i> – технологии, системы и средства производства композиционных материалов; <b>уметь:</b> <i>ПК-16</i> – проектировать свойства композиционных материалов для их эффективного использования; <b>владеть:</b> <i>ПК-16</i> – навыками определения свойств и структуры композиционных материалов.	<b>отлично</b>	«Отлично» заслуживает обучающийся, который знает технологии, системы и средства производства композиционных материалов, умеет проектировать свойства композиционных материалов, владеет навыками определения свойств и структуры композиционных материалов.
	<b>хорошо</b>	«Хорошо» заслуживает обучающийся, который знает технологии, системы и средства производства композиционных материалов, умеет проектировать свойства композиционных материалов, владеет навыками определения свойств и структуры композиционных материалов. Но обучающийся допустил не более двух-трех недочетов и может исправить их самостоятельно или с помощью преподавателя.
	<b>удовлетворительно</b>	«Удовлетворительно» ставится обучающемуся, у которого в ответе имеются отдельные пробелы в освоении вопросов курса «Технология композиционных материалов», не препятствующие усвоению программного материала. Владеет навыками определения свойств и структуры композиционных материалов.
	<b>не удовлетворительно</b>	«Неудовлетворительно» ставится обучающемуся, который не знает основные разделы дисциплины.

### 4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина «Технология композиционных материалов» направлена на формирование у обучающихся фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов и покрытий для разработки эффективных технологических процессов производства полуфабрикатов, заготовок и изделий из порошковых и композиционных материалов для машиностроения.

Изучение дисциплины «Технология композиционных материалов» предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- практические занятия;
- самостоятельную работу;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 Классификация композиционных материалов обучающиеся должны уяснить понятие, признаки и классификацию композиционных материалов.

В ходе освоения раздела 2 Композиционные материалы с нульмерными наполнителями обучающиеся должны уяснить химические, физические и технологические свойства порошков, технологические методы получения порошков, твердых сплавов, керамических КМ, сверхтвердых материалов, прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов, технологию спекания порошковых материалов.

В ходе освоения раздела 3 Композиционные материалы с одномерными наполнителями обучающиеся должны уяснить упрочнение волокнами, армирующие вещества и их свойства, методы получения металлических КМ, армированных волокнами, свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей, методы получения полимерных одномерноармированных КМ.

В ходе освоения раздела 4 Двумерные композиционные материалы обучающиеся должны уяснить ткани, применяемые для армирования пластиков, свойства стеклянных волокон для производства тканей, производство тканей из стеклянных волокон, маркировку стеклотканей.

В ходе освоения раздела 5 Эвтектические композиционные материалы обучающиеся

должны уяснить эвтектические КМ на основе алюминия, эвтектические КМ на основе никеля.

В ходе освоения раздела 6 Композиционные наноматериалы обучающиеся должны уяснить классификацию наноматериалов, основные области применения наноматериалов.

В процессе проведения лабораторных работ происходит формирование навыков определения свойств и структуры композиционных материалов и закрепление теоретических знаний по технологии, системам и средствам производства композиционных материалов.

В процессе проведения практических занятий происходит формирование умений проектирования свойств композиционных материалов для их эффективного использования.

При подготовке к экзамену необходимо ознакомиться с экзаменационными вопросами. На основе этого надо составить план повторения и систематизации учебного материала на каждый день. Нельзя ограничиваться только конспектами лекций, следует проработать рекомендуемые преподавателем учебные пособия и литературу. Необходимо внимательно прочитать и уяснить суть требований конкретного экзаменационного вопроса. Если отдельные вопросы программы остаются неясными, их необходимо выяснить на консультации с преподавателем.

Удобнее готовиться к лабораторным работам, практическим занятиям и экзамену в читальном зале библиотеки или в специализированном учебном кабинете.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

**АННОТАЦИЯ**  
**рабочей программы дисциплины**  
**Технология композиционных материалов**

**1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является – формирование у обучающихся фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов и покрытий для разработки эффективных технологических процессов производства полуфабрикатов, заготовок и изделий из порошковых и композиционных материалов для машиностроения.

Задачами изучения дисциплины является:

- теоретическое и практическое освоение закономерной связи между строением, свойствами и факторами технологических процессов производства изделий из композиционных материалов;

- изучение основных технологических процессов получения заготовок и деталей из композитов различного назначения и их проектирования.

**2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: лекции – 34 часа, лабораторные работы – 34 часа, практические занятия – 17 часов, самостоятельная работа – 68 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 180 часов, 5 зачетных единицы.

2.2. Основные разделы дисциплины:

1. Классификация композиционных материалов.
2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями.
3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями.
4. Двумерные композиционные материалы.
5. Эвтектические композиционные материалы.
6. Композиционные наноматериалы.

**3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-16 – способность осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств, участвовать в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий, выполнять мероприятия по выбору и эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств диагностики, автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов для их реализации.

**4. Вид промежуточной аттестации: Экзамен.**

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

---

---

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

---

---

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.,  
(разработчик)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО  
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-16	способность осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств, участвовать в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий, выполнять мероприятия по выбору и эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств диагностики, автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов для их реализации.	1. Классификация композиционных материалов	1.1. Понятие, признаки и классификация КМ	Конспект лекций
		2. Композиционные материалы с нульмерными наполнителями	2.1. Химические, физические и технологические свойства порошков	Конспект лекций; Отчет по ЛР №1
			2.2. Технологические методы получения порошков	Конспект лекций; Отчет по ЛР №1
			2.3. Твердые сплавы	Конспект лекций; Отчет по ПЗ №1
			2.4. Керамические КМ	Конспект лекций
			2.5. Сверхтвердые материалы	Конспект лекций
			2.6. Прессование деталей (прессовок) из порошковых материалов	Конспект лекций; Отчет по ЛР №2 Отчет по ПЗ №2
			2.7. Технология спекания порошковых материалов	Конспект лекций; Отчет по ЛР №3
		3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями	3.1. Упрочнение волокнами	Конспект лекций
			3.2. Армирующие вещества и их свойства	Конспект лекций
			3.3. Методы получения металлических КМ, армированных волокнами	Конспект лекций
			3.4. Свойства одномерноармированных КМ с полимерной матрицей	Конспект лекций; Отчет по ПЗ № 3, 5
			3.5. Методы получения полимерных одномерноармированных КМ	Конспект лекций; Отчет по ПЗ № 4, 5
		4. Двумерные композиционные материалы	4.1. Ткани, применяемые для армирования пластиков	Конспект лекций
			4.2. Свойства стеклянных волокон для производства тканей	Конспект лекций
			4.3. Производство тканей из стеклянных волокон	Конспект лекций; Отчет по ЛР №4...6
			4.4. Маркировка стеклотканей	Конспект лекций
		5. Эвтектические композиционные материалы	5.1. Эвтектические КМ на основе алюминия	Конспект лекций
			5.2. Эвтектические КМ на основе никеля	Конспект лекций
		6. Композиционные наноматериалы	6.1. Классификация наноматериалов	Конспект лекций
6.2. Основные области применения наноматериалов	Конспект лекций			

## 2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>знать:</b> <i>ПК-16</i> – технологии, системы и средства производства композиционных материалов;</p> <p><b>уметь:</b> <i>ПК-16</i> – проектировать свойства композиционных материалов для их эффективного использования;</p>	<b>зачтено</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- даны исчерпывающие и обоснованные ответы на все поставленные вопросы;</li> <li>- ответы изложены грамотно, уверенно, логично, последовательно;</li> <li>- опираясь на усвоенные знания, четко увязывает научные положения с практической деятельностью;</li> <li>- свободно владеет основными понятиями дисциплины.</li> </ul>
<p><b>владеть:</b> <i>ПК-16</i> – навыками определения свойств и структуры композиционных материалов.</p>	<b>не зачтено</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- допускает существенные ошибки и неточности при ответе на поставленные вопросы;</li> <li>- испытывает трудности в практическом применении полученных знаний;</li> <li>- не может аргументировать научные положения;</li> <li>- не владеет системой основных понятий дисциплины.</li> </ul>

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств от 11 августа 2016 г № 1000

**для набора 2015 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413,

**для набора 2016 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» октября 2016 г. № 684,

**для набора 2017 года:** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» марта 2017 г. № 125,

**для набора 2018 года** и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. № 130.

**Программу составил:**

Рычков Д.А., доцент кафедры МиТ, канд. техн. наук. \_\_\_\_\_

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры МиТ

от «11» декабря 2018 г., протокол № 6

И.о. заведующего кафедрой МиТ \_\_\_\_\_ Е.А. Слепенко

СОГЛАСОВАНО:

И.о. заведующего выпускающей кафедрой МиТ \_\_\_\_\_ Е.А. Слепенко

Директор библиотеки \_\_\_\_\_ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета МФ

от «14» декабря 2018 г., протокол № 4

Председатель методической комиссии факультета МФ \_\_\_\_\_ Г.Н. Плеханов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный № \_\_\_\_\_