

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

**СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**
сборник учебно-методических материалов

для специальности

24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-
космических комплексов

Благовещенск 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
Университета*

Составители: Нецименко В.В., Соловьев В.В.

Современные и перспективные конструкционные материалы: сборник учебно-методических материалов для специальности 24.05.01. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017. – 213 с.

Рассмотрен на заседании кафедры *СиТПК* 05.06.2017, протокол № 11.

© Амурский государственный университет, 2017
© Нецименко В.В., Соловьев В.В., составление, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины «Современные и перспективные конструкционные материалы» получение знаний, позволяющих оценивать поведение материалов в условиях эксплуатации, правильно выбирать материал и технологию его обработки с целью получения заданной структуры и свойств, обеспечивающих высокую надежность и долговечность изделий.

Основными задачами дисциплины является изучение физической сущности явлений, происходящих в материалах при воздействии на них различных факторов в условиях производства и эксплуатации и их влияния на структуру и свойства материалов; изучение зависимостей между составом, строением и свойствами материалов, теории и практики различных способов упрочнения материалов, обеспечивающих высокую надежность и долговечность деталей машин, инструментов и других изделий; изучение основных групп современных металлических и неметаллических конструкционных материалов, их свойств и области применения, определение основных характеристики материалов и их соответствия требованиям ГОСТов и ТУ; приобретение навыков расчета потребностей в материалах; анализ перспективного развития рынка новых конструкционных материалов.

Для формирования умений и навыков в учебной программе дисциплины предусмотрены лекции и практические работы, а также самостоятельная работа студентов, роль которой в настоящее время в системе высшего образования значительно возросла и является формой самообразования.

В процессе обучения происходит закрепление и систематизация знаний, углубление теоретических знаний, развитие умений работать с различными источниками информации и как результат – освоения основных компетенций.

1 КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции

В высшем учебном заведении лекция является важной формой учебного процесса и представляет собой в основном устное систематическое и последовательное изложение материала по какой-либо проблеме, методу, теме вопроса и т. д.

Основные функций, которые осуществляет вузовская лекция – это информативная, ориентирующая и стимулирующая, методологическая, развивающая и воспитывающая, поскольку на лекции студенты получают глубокие и разносторонние знания, развивают свои творческие способности.

Лекции могут быть вводными, обзорными, тематическими (лекции по изучению нового материала), итоговыми.

Вводные лекции подготавливают студента к восприятию данной дисциплины (физики) или ее раздела. На вводной лекции излагаются цели и задачи дисциплины, ее актуальность, практическая значимость, методы научного исследования и т.д. для того, чтобы дать целостное представление о дисциплине и вызывать интерес к предмету.

Тематические лекции посвящены глубоко осмысленному и методически подготовленному систематическому изложению содержания курса (дисциплины).

Итоговая лекция содержит основные идеи и выводы по курсу, выводы о достижении поставленных учебных целей.

На обзорных лекциях рассматриваются наиболее сложные, проблемные вопросы курса или новейшие достижения в данной области, что позволит установить взаимосвязь учебного материала с производством и новейшими научными достижениями.

Подготовка к самостоятельной работе над лекционным материалом должна начинаться на самой лекции. На лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись. И как бы внимательно студент не слушал лекцию, большая часть информации вскоре после воспри-

ятия будет забыта. Поэтому при изучении дисциплины студентам рекомендуется составлять подробный конспект лекций, так как это обеспечивает полноценную систематизацию и структурирование материала, подлежащего изучению. Конспект лекций должен отражать специфику данного курса, которая состоит в обобщении физической теории, рассматривающей процессы обмена энергией в макроскопических системах, на случай сложных, полифункциональных систем.

Очень важным является умение правильно конспектировать лекционный материал и работать с ним. Ниже приведены *рекомендации по конспектированию лекций и дальнейшей работе с записями*.

1. Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам.

2. Конспект должен легко восприниматься зрительно (чтобы максимально использовать «зрительную» память), поэтому он должен быть аккуратным. Выделяйте заголовки, отделите один вопрос от другого, соблюдайте абзацы, подчеркните термины.

3. При прослушивании лекции обращайтесь внимание на интонацию лектора и вводные слова «таким образом», «итак», «необходимо отметить» и т.п., которыми он акцентирует наиболее важные моменты. Не забывайте пометать это при конспектировании.

4. Не пытайтесь записывать каждое слово лектора, иначе потеряете основную нить изложения и начнете писать автоматически, не вникая в смысл. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Техника прочтения лекций преподавателем такова, что он повторяет свою мысль два-три раза. Постарайтесь вначале понять ее, а затем записать, используя сокращения.

Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов.

Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Научитесь в процессе лекции разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание ко-

роткими фразами и формулировками. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную.

5. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Используйте общепринятую в данном разделе физики аббревиатуру и систему сокращений. Придумайте собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, удобную только вам (но не забудьте сделать словарь, иначе существует угроза не расшифровать текст). Однако при дальнейшей работе с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста.

6. Конспектируя лекцию, надо оставлять поля, на которых позднее, при самостоятельной работе с конспектом, можно сделать дополнительные записи, отметить непонятные места. Полезно после каждой лекции оставлять одну страницу свободной, она потребуется при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи, графики, схемы, и т.п.

7. После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Насколько эффективно студент это сделает, зависит и прочность усвоения знаний, и, соответственно, качество восприятия предстоящей лекции, так как он более целенаправленно будет её слушать. В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать опорные конспекты, учебники и учебные пособия.

1.2 Краткое содержание курса лекций

ТЕМА 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ

1.1 Аллотропические превращения железа при нагреве и охлаждении

Чистое Железо (Fe, атомный номер 26, радиус 0,127 нм) имеет температуру плавления 1539°C, плотность $7,68 - 7,85 \text{ г/см}^3$. Металл обладает невысокой твердостью и прочностью $HV \approx 80$, предел прочности $\sigma_b \approx 250 \text{ МПа}$, предел текучести $\sigma_{0,2} = 120 \text{ МПа}$ и хорошей пластичностью; относительное удлинение $\delta = 50 \%$; относительное сужение $\psi = 80 \%$.

В твердом состоянии испытывает два полиморфных превращения. Важнейшее из них – превращение при 911 °С. Ниже этой температуры железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК) с параметром $a = 0,286$ нм (рис.1.1). Это α -железо (Fe_α). Выше 911°С существует γ -железо (Fe_γ) с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) и параметром $a = 0,356$ нм.

Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется аллотропией или полиморфизмом. Каждый вид решетки представляет собой аллотропическое видоизменение или модификацию.

Превращение одной модификации в другую протекает при постоянной температуре и сопровождается тепловым эффектом.

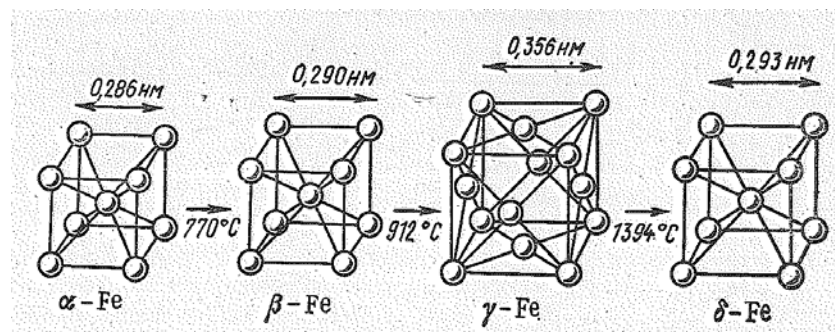


Рис.1.1. Аллотропические превращения железа.

Другой пример аллотропического видоизменения, обусловленного изменением давления, является углерод: при низких давлениях образуется графит, а при высоких – алмаз. Углерод – химический элемент II периода IV группы периодической системы, химический знак - С, атомный номер 6, радиус 0,077 нм или 0,77 Å; масса 12,011; неметалл. Массовая доля углерода в земной коре составляет 0,1 %. Алмаз – прозрачное кристаллическое вещество с атомной кубической решеткой. Графит имеет темно-серую окраску с металлическим блеском. Он является жирным на ощупь. По своему строению это слоистое кристаллическое вещество с гексагональной структурой.

Углерод может растворяться в жидком железе и в решетках обеих полиморфных модификаций, а также образует с железом химическое соединение. Поэтому в

сплавах могут присутствовать следующие фазы: жидкий раствор (Ж), феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц), графит (Г).

1.2 Структурные составляющие системы железо-углерод

Твердые растворы внедрения углерода и других примесей в α -железе называют **ферритом**, а в γ -железе – **аустенитом**.

Феррит получил свое название от латинского наименования железа – «Ferrum». Различают низкотемпературный α -феррит с растворимостью углерода до 0,02 % и высокотемпературный δ -феррит с предельной растворимостью углерода 0,1 %. Атом углерода в решетке феррита располагается в центре объема куба. Под микроскопом феррит выявляется в виде однородных полиэдрических зерен. Твердость и механические свойства феррита близки к таковым технически чистого железа ($\sigma_b = 250$ МПа, $\sigma_{0,2} = 120$ МПа, $\delta = 50$ %, $\psi = 80$ %, НВ 80 – 90 кгс/мм² или 800 – 900 МПа), они зависят от количества элементов, присутствующих в нем. Микроструктура феррита представлена на рис.1. 2.

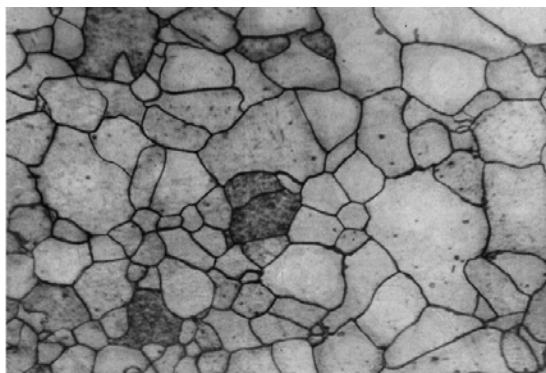


Рис.1.2. Микроструктура феррита.

Аустенит был назван так в честь английского ученого Роберта Аустена, который занимался исследованиями структуры составляющих системы железо - углерод и разработкой вариантов ее диаграммы состояния. Атом углерода в решетке γ -железа располагается в центре элементарной ячейки (рис. 1.3,б).

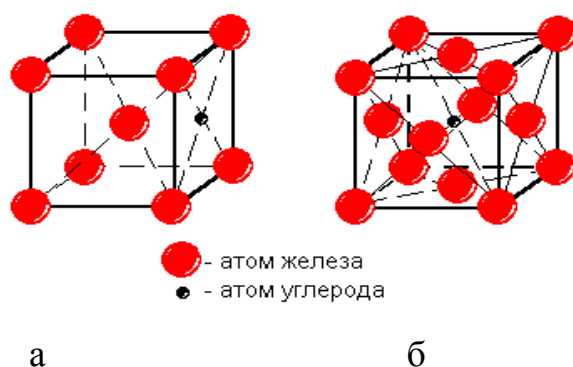


Рис.1.3. Кристаллическая решетка феррита (а) и аустенита (б).

Аустенит – парамагнитен, высокопластичен (НВ = 170-220 кгс/мм² или 1700-2200 МПа), имеет низкие механические характеристики, такие как пределы текучести и Аустенит – парамагнитен, высокопластичен (НВ = 170-220 кгс/мм² или 1700-2200 МПа), имеет низкие механические характеристики, такие как пределы текучести и прочности. Микроструктура аустенита - полиэдрические зерна (рис.1.4).

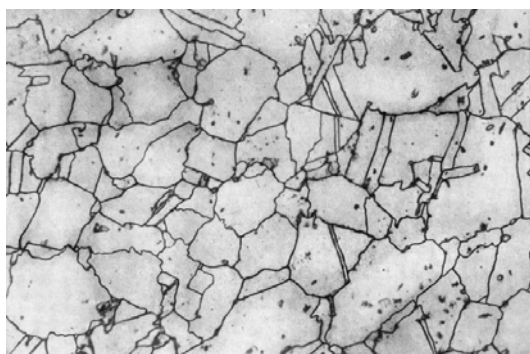


Рис.1.4. Микроструктура аустенита.

Железо и углерод, взаимодействуя друг с другом, могут образовывать ряд металлических карбидов с различными химическими формулами: Fe₃C, Fe₂C, FeC и другие. Наиболее распространенным и широко применяемым из них является карбид железа среднего состава Fe₃C – **цементит**. Стехиометрическое соотношение элементов в нем соответственно равно 3 : 1. Содержание углерода составляет 6,67 % масс.

Кристаллическая решетка карбида железа очень сложная. Она представляет собой орторомбическую структуру с плотной упаковкой атомов (в элементарной ячейке расположено 12 атомов железа и 4 углерода). Данное соединение обладает высокой твердостью, сравнимой только с алмазом, он легко царапает стекло (НВ

более 800 кгс/мм²), но чрезвычайно низкой практически нулевой пластичностью (большой хрупкостью), значительной жаропрочностью и обычно более высокой температурой плавления, чем исходный металл.

Кроме перечисленных фаз, в структуре сплавов железа с углеродом присутствуют две структурные составляющие: эвтектика и эвтектоид.

В системе железо – углерод эвтектика содержит 4,3 % С и кристаллизуется при температуре 1147°С. Она представляет собой смесь кристаллов аустенита и цементита и называется **ледебурит** ($L = A + Ц$).

Ледебурит - образуется в процессе эвтектического превращения по реакции:
 $Ж = \gamma + Fe_3C$.

По своей структуре он представляет собой чередующиеся пластинки аустенита и цементита. При температурах ниже 727°С аустенит в этой смеси изотермически превращается в перлит. Ледебурит такого состава называется низкотемпературным. Микроструктура ледебурита представлена на рис.1.5.

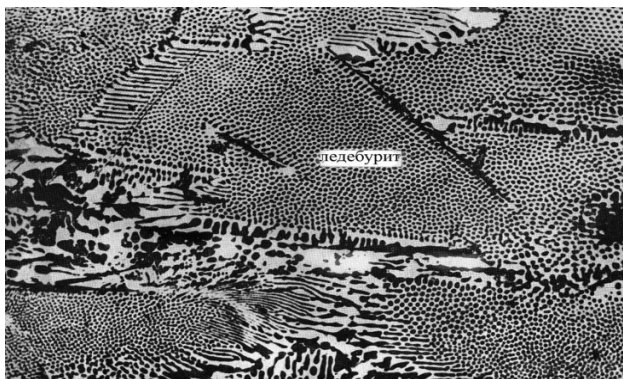


Рис.1.5. Микроструктура ледебурита.

Перлит – смесь пластин феррита и цементита образующаяся при 727°С по реакции: $A = \alpha + Fe_3C$.

Он имеет перламутровый цвет (отсюда и название), концентрация углерода в нем -0,8 % масс. Структура его также как и ледебурита состоит из следующих друг за другом пластинок феррита и цементита.

Перлит имеет наиболее удачное сочетание механических свойств из всех равновесных структур в сплавах железа с углеродом. В нем мягкие, вязкие пластины феррита чередуются с прочными, твердыми, жесткими пластинами цементита: $П =$

Ф + Ц (рис. 1.6). Такая структура хорошо сопротивляется самым разным механическим нагрузкам, обладает высокой прочностью и достаточной вязкостью. Твердость перлита составляет 180-220 НВ, в зависимости от размера зерна.

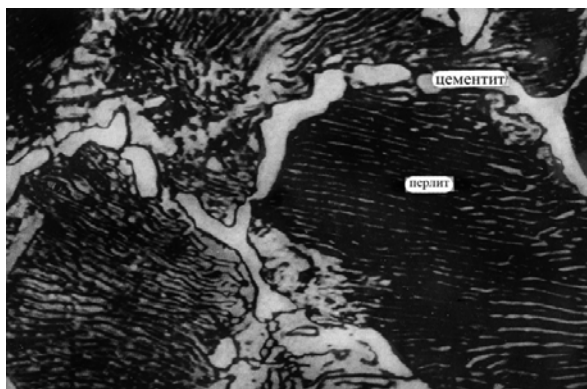


Рис.1.6. Микроструктура перлита и цементита вторичного.

3.3 Диаграмма состояния желез- цементит

Диаграмму системы железо-углерод можно проанализировать только до образования в ней карбида железа - Fe_3C – концентрация углерода 6,67 %. Это связано с тем, что наибольшее практическое значение имеет только часть диаграммы состояния железо-углерод, в которой показано формирование цементита, так как сплавы, содержащие большее количество углерода, очень хрупкие и практически не применяются в промышленности. Поэтому диаграмму состояния системы железо-углерод изображают только до концентрации углерода 6,67 % масс и называют диаграммой состояний железо-цементит (рис.1.7).

Кривая $ABCD$ - линия ликвидус, которая на участке AB соответствует температурам начала выпадения кристаллов феррита (α), а на участке BC соответствует температурам начала выпадения кристаллов аустенита (γ) из жидкого сплава (L). В области CD – она представляет геометрическое место точек, отвечающих температурам начала кристаллизации первичного цементита (Fe_3C_I) из жидкой фазы (L).

Линия $AHJECFD$ - солидус, криволинейный участок $AHJE$ которой, определяет окончание затвердевания жидкой фазы.

На горизонтальной линии HJB происходит неинвариантная реакция с участием трех фаз образования аустенита из жидкости и феррита.



Горизонтальный участок ECF является геометрическим местом точек, соответствующих также концу кристаллизации аустенита (EC) и первичного цементита - Fe_3C_I (CF), и одновременно отвечает температурам изотермического превращения жидкого сплава состава точки C в двухфазную эвтектику – ледебурит.

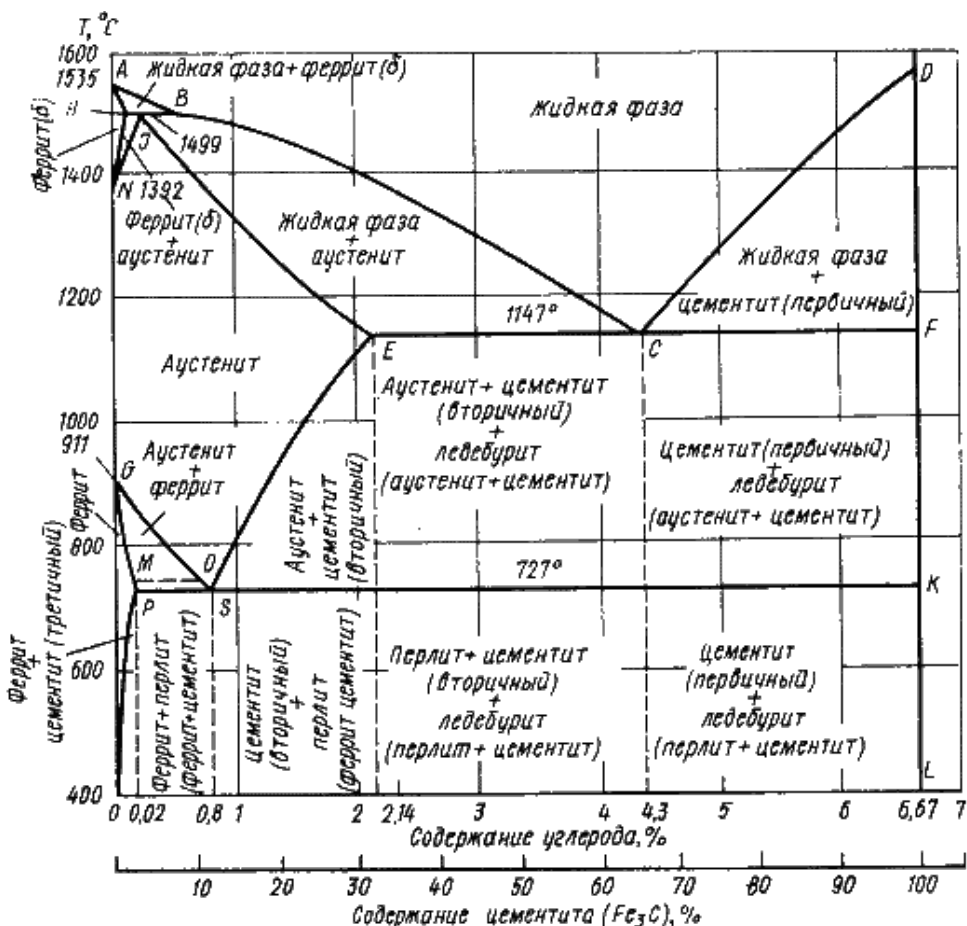
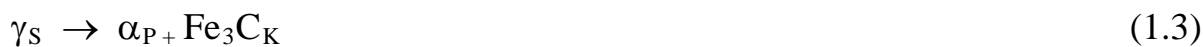


Рис. 1.7. Диаграмма железо-углерод.



Данная реакция наблюдается только у сплавов с содержанием углерода более 2,14 % масс.

На горизонтальной линии PSK происходит неинвариантная реакция с участием трех фаз образования перлита из аустенита.



Линии NH и NJ отражают начало и конец полиморфного превращения аустенита и δ -феррита, а линии GS и GP соответственно начало и конец полиморфного превращения аустенита и α -феррита.

Кривые DC , ES и PQ показывают на ограничение максимальной растворимости углерода в фазовых составляющих железоуглеродистых сплавов. Эти линии определяют максимальную растворимость углерода в той фазе, которая расположена на диаграмме левее данной кривой.

Диаграмму состояния Fe - Fe₃C по оси абсцисс – концентрация углерода – делят на следующие участки: 0 - 0,02 % (точка P) - технически чистое железо; 0,02 - 0,80 % (отрезок PS) - доэвтектоидные стали; 0,80 % (точка S) - эвтектоидная сталь; 0,80 - 2,14 % - заэвтектоидные стали; 2,14 - 4,31 % (отрезок EC) - доэвтектические чугуны; 4,31 % (точка C) - эвтектический чугун; 4,31 - 6,67 % (отрезок CF) - заэвтектические чугуны.

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2,14 %, называют сталями. Они после затвердевания не содержат хрупкой структурной составляющей - ледебурита и при высоком нагреве имеют только аустенитную структуру, обладающую высокой пластичностью. Поэтому они легко деформируются при нормальных и повышенных температурах, т. е. являются ковкими сплавами.

1.4 Кристаллизация и формирование структуры сплавов

1.4.1 Кристаллизация стали

Первичная кристаллизация стали в зависимости от содержания углерода происходит по-разному. При содержании углерода от 0 до 0,5% из жидкости начинает выделяться феррит, а при содержании углерода от 0,5% до 2,14% из жидкости первоначально выделяется аустенит. Диаграмма состояния и кривые охлаждения типовых сплавов представлены на рис.1.8.

Рассмотрим кристаллизацию сплава 1, относящегося к доэвтектоидной стали, с содержанием углерода менее 0,5% (Рис.1.8,а).

Кристаллизация этого сплава начинается в точке t_1 выделением из жидкости кристаллов феррита. При температуре 1499⁰C в сплаве происходит перитектическая реакция, при которой выделившийся ранее феррит взаимодействует с жидкостью, в

результате образуется новая фаза – аустенит. Окончательное формирование структуры стали происходит в результате превращений аустенита при дальнейшем охлаждении. Основой этого превращения является полиморфизм, связанный с перегруппировкой атомов из ГЦК решетки аустенита в ОЦК решетку феррита, а также изменение растворимости углерода по линии ES в аустените и PQ в феррите.

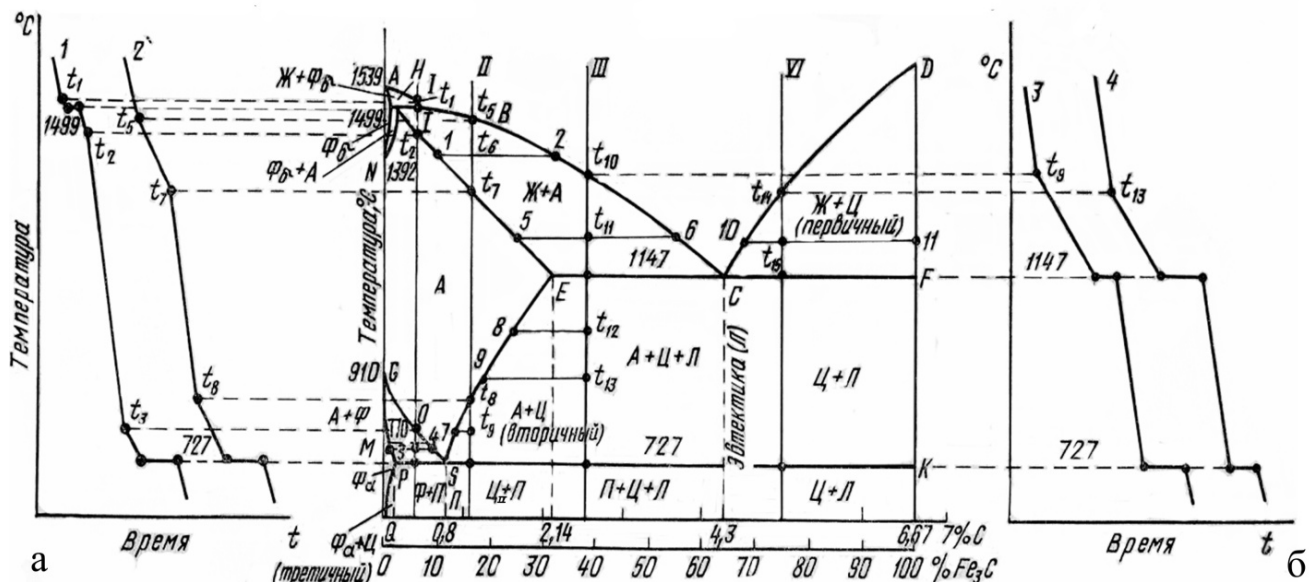


Рис.1.8. Кривые охлаждения при кристаллизации:

а) - кристаллизация сталей; б)- кристаллизация чугунов.

В данном сплаве в интервале температур $t_3-727^\circ\text{C}$ идет полиморфное превращение $A \rightarrow \Phi$. На стыках и границах зерен аустенита возникают зародыши феррита, которые растут и развиваются за счет атомов аустенитной фазы. Состав аустенита меняется по линии GS , а феррита – по линии GP . При 727°C концентрация углерода в аустените равна $0,8\%$ (точка S) и в феррите – $0,025\%$ (точка P). Ниже этой температуры происходит эвтектоидное превращение. В равновесии находятся три фазы: феррит состава точки P , аустенит состава точки S , цементит. Так как число степеней свободы равно нулю, т.е. имеется нонвариантное равновесие, то процесс протекает при постоянном составе фаз. На кривых охлаждения или нагрева наблюдается температурная остановка. Таким образом, структура доэвтектоидной стали характеризуется избыточными кристаллами феррита и эвтектоидной смесью феррита с цементитом, называемой перлитом. Количественные соотношения феррита и перлита за-

висят от состава сплава. Чем больше углерода в доэвтектоидной стали, тем больше в структуре ее перлита и, наоборот, чем меньше углерода, тем больше феррита и меньше перлита. При дальнейшем охлаждении в результате изменения растворимости углерода в феррите (соответственно линии PQ) выделяется третичный цементит. Однако в структуре обнаружить его при наличии перлита невозможно.

Сплавы с содержанием углерода менее 0,025 % (левее т. P) не испытывают эвтектоидного превращения.

Сплав 2 относится по составу к заэвтектоидной стали. Кристаллизация этого сплава начинается в точке t_5 выделением из жидкости кристаллов аустенита. В t_7 кристаллизация заканчивается и до температуры t_8 (линия ES) аустенит охлаждается без изменения состава. Несколько ниже этой температуры аустенит достигает предельного насыщения углеродом согласно линии растворимости углерода в аустените ES . В интервале температур $t_{10} - 727\text{ °C}$ из пересыщенного аустенита выделяется высокоуглеродистая фаза – цементит, который называется вторичным. Состав аустенита меняется по линии ES и при температуре 727 °C достигает точки S (0,8 %C). Ниже 727 °C происходит эвтектоидное превращение: аустенит состава точки S (0,8 %C) распадается на смесь феррита состава точки P (0,025 %C) и цементита. Таким образом, структура заэвтектоидной стали характеризуется зернами перлита и вторичного цементита. При медленном охлаждении цементит, как правило, располагается в виде тонкой оболочки. В разрезе это выглядит как сетка цементита. Более благоприятной формой цементита является зернистая, она не приводит к значительному снижению пластических свойств стали. В реальной стали с 1,2%С (У12) количество вторичного цементита составляет всего около 6 %.

1.4.2 Кристаллизация чугунов

Все превращения в белых чугунах, начиная от затвердевания и до комнатных температур, полностью проходят по метастабильной диаграмме Fe-Fe₃C. Наличие цементита придает излому светлый блестящий цвет, что привело к термину “белый чугун”. Независимо от состава сплава обязательной структурной составляющей белого чугуна является цементитная эвтектика (ледебурит). На рис. изображена

структурная диаграмма равновесия железо-цементит и кривые охлаждения типичных сплавов.

Железоуглеродистые сплавы состава 2,14-4,3% С называются доэвтектическими белыми чугунами. Рассмотрим процесс кристаллизации и вторичных превращений на примере сплава 3 (рис.1.8,б). От температуры несколько ниже линии ликвидус AC до 1147°C , из жидкости выделяются кристаллы аустенита. Аустенит кристаллизуется в форме дендритов, которые, как правило, обладают химической неоднородностью, называемой дендритной ликвацией. Состав жидкой фазы меняется по линии ликвидус, стремясь к эвтектическому, а твердой фазы по линии солидус, стремясь к составу точки E . При температуре 1147°C концентрация жидкой фазы достигает точки C (4,3 % С), а аустенита – точки E (2,14 % С). Из жидкости эвтектического состава образуется смесь аустенита и цементита – ледебурит 1147°C . Таким образом, ниже эвтектической линии ECF структура характеризуется избыточными кристаллами аустенита и эвтектикой (ледебуритом). При охлаждении от 1147 до 727°C состав аустенита непрерывно меняется по линии ES , при этом выделяется цементит вторичный. Он выделяется как из избыточного аустенита, так и из аустенита эвтектики. Однако, если вторичный цементит, выделяющийся из аустенита эвтектики, присоединяется к эвтектическому цементиту, то из избыточного аустенита он выделяется в виде оболочек вокруг дендритов аустенита и представляет собой самостоятельную структурную составляющую. Ниже 727°C весь аустенит: и избыточный, и тот, который входит в состав эвтектики – претерпевает эвтектоидное превращение, при котором образуется перлит. Таким образом, ниже 727°C структура доэвтектического белого чугуна характеризуется следующими структурными составляющими: избыточным перлитом (бывшим аустенитом), ледебуритом превращенным, состоящим из перлита и цементита и цементитом вторичным

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 4,3 до 6,67 % (сплав 4, рис.1.8,б) называются заэвтектическими белыми чугунами. Кристаллизация начинается при температуре t_{13} несколько ниже линии CD выпадением цементита, который называется цементитом первичным. Состав жидкой фазы меняется по линии CD , состав твердой остается без изменения. При температуре 1147°C заканчивается

кристаллизация избыточных кристаллов. Жидкость состава точки *C* (4,3 % C) согласно эвтектической реакции образует ледебурит. При дальнейшем охлаждении изменение состава аустенита по линии *ES* приводит к выделению цементита вторичного, который присоединяется к эвтектическому. Температура 727 °C является температурой эвтектоидного равновесия аустенита, феррита и цементита. Ниже этой температуры аустенит превращается в перлит. Таким образом, ниже 727 °C структура заэвтектического белого чугуна характеризуется избыточными кристаллами цементита первичного (белые пластины) и превращенным ледебуритом, состоящим из темных полосок или зернышек перлита и светлой основы – цементита.

1.5 Влияние постоянных примесей на структуру и свойства стали

Примеси в сталях и чугунах делят на 4 группы:

1. Постоянные примеси: кремний, марганец, сера, фосфор;
2. Скрытые примеси – газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке.
3. Специальные примеси – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали – легированные сталями.
4. Случайные примеси (мышьяк, свинец, олово, сурьма) – химические элементы, которые не добавлялись специально в сталь, в том числе, косвенно, например, при раскислении стали, и которые нельзя удалить простыми металлургическими процессами.

Содержание марганца не превышает 0,5...0,8 %. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Он способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS, так как образует с серой соединение сульфид марганца MnS. Частицы сульфида марганца располагаются в виде отдельных включений, которые деформируются и оказываются вытянутыми вдоль направления прокатки.

Содержание кремния не превышает 0,35...0,4 %. Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает проч-

ность стали, особенно повышается предел текучести. Но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке.

Содержание фосфора в стали 0,025...0,045 %. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладоломкость, уменьшает работу распространения трещин. Повышение содержания фосфора на каждую 0,01 % повышает порог хладоломкости на 20...25°C.

Содержание серы в сталях составляет 0,025...0,06 %. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS, которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988 °C. Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, а так же предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

Углерод – важнейший компонент сталей и чугунов, от количества которого зависят ее свойства. С увеличением содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита – очень твердой и хрупкой фазы (твердость цементита HB = 800 больше твердости феррита HB = 80). Поэтому прочность и твердость стали растут с повышением содержания углерода, а пластичность и вязкость, наоборот, снижаются.

Азот и кислород находятся в стали в виде хрупких неметаллических включений: окислов (FeO, SiO₂, Al₂O₃) нитридов (Fe₂N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах).

Очень вредным является растворенный в стали водород, который значительно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катанных заготовках и поковках флокенов, т.е. тонких трещин овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Металл с флокенами нельзя использовать в промышленности, при сварке образуются холодные трещины в наплавленном и основном металле.

Легирующие элементы оказывают влияние на электронную и дислокационную структуру металла. Замещая атомы в решетке основы, они создают барьеры ближнего действия на пути движущихся дислокаций. Плотность дислокаций, их подвижность, значения констант диффузии и упругости, условия протекания фазовых превращений и в конечном итоге прочность твердого раствора связаны с легированием. Легированные стали характеризуются лучшим комплексом физико-химических (в том числе и механических) свойств по сравнению с углеродистыми: они отличаются повышенной жаростойкостью, сопротивлением коррозии, значительной ударной вязкостью, высоким пределом текучести, большим электросопротивлением и т. д. Оптимальные механические свойства обеспечиваются формированием в результате термической обработки дисперсных структур и более мелкого зерна.

1. Все легирующие элементы, растворяясь в феррите, аустените, цементите, а также образуя химические соединения (карбиды, интерметаллиды), упрочняют сталь. Пластичность и вязкость при этом падают.

2. Никель одновременно повышает и прочность, и вязкость.

3. Алюминий, кремний, хром и медь повышают коррозионную стойкость стали.

4. Алюминий, ванадий, молибден, вольфрам, титан измельчают зерно и тем самым повышают вязкость стали.

5. Марганец и кремний способствуют получению крупнозернистой структуры в стали.

6. Молибден и вольфрам устраняют хрупкость стали при отпуске.

7. Молибден, вольфрам, ванадий, титан повышают жаропрочность стали, а также ее красностойкость (твердость при высоких температурах).

8. Никель, марганец, медь, азот являются аустенизаторами, т. е. растворяясь в железе, расширяют область аустенита.

9. Карбидообразующие элементы: хром, молибден, ванадий, вольфрам и другие, растворяясь в железе, расширяют область феррита и поэтому называются ферритизаторами.

10. Ванадий, титан, ниобий и цирконий образуют труднорастворимые в аустените карбиды. Способствуют измельчению зерна, снижению порога хладноломко-

сти, уменьшают чувствительность стали к концентраторам напряжений (но только при микролегировании).

11. Все легирующие элементы, за исключением кобальта, кремния, алюминия, понижают температуру изотермического распада аустенита и способствуют увеличению количества остаточного аустенита при закалке. Они же уменьшают критическую скорость закалки стали, увеличивают прокаливаемость стали.

Легированными называют стали, в которые кроме железа и углерода вводят легирующие добавки для обеспечения требуемой структуры и придания сталям специальных свойств. Основными легирующими элементами являются Mn, Si, Cr, Ni, W, Mo, Co, Ti, V, Zr, Nb и др. Большинство легирующих элементов распределяется между ферритом, аустенитом и карбидной фазой.

Твердые растворы легирующих элементов в α -Fe (ОЦК решетка) называются *легированным ферритом*, а в γ -Fe (ГЦК решетка) – *легированным аустенитом*. Наибольшей растворимостью в феррите и аустените обладают элементы, имеющие близкие к железу размеры атомов и изоморфные кристаллические решетки. При различии в размерах атомов компонентов до 8 % образуется непрерывный ряд твердых растворов замещения, а при различии до 15...17 % наблюдается их ограниченная растворимость в твердом растворе.

Легированный феррит является основой структуры некоторых нержавеющей сталей и может быть самостоятельной фазой или (и) входить в строение перлита.

Легированный аустенит является основной структурной составляющей многих нержавеющей, жаропрочных и немагнитных сталей.

Элементы с очень малым атомным диаметром (H, B, C, N) образуют с железом твердые растворы внедрения малой концентрации.

Интерметаллиды образуются только в высоколегированных сталях и сплавах со специальными свойствами, в которых они играют роль упрочнителей, однако при этом снижаются пластичность и сопротивление разрушению. В обычных массовых промышленных сталях интерметаллические соединения легирующих элементов не встречаются.

Карбидная фаза. По отношению к углероду легирующие элементы делятся на две группы: карбидообразующие (т. е. образующие соединения железа с углеродом) и некарбидообразующие (графитизирующие).

Легирующие элементы, расположенные в периодической системе Д. И. Менделеева справа от железа (Co, Ni, Cu, Al, Si), не образуют в стали карбидов. Эти элементы, растворяясь в феррите и аустените, образуют твердые растворы замещения. Некарбидообразующие элементы (Si, Al, Cu) понижают устойчивость цемента и других карбидов.

Карбидообразующие элементы имеют высокую степень химического сродства к углероду и образуют более прочные и устойчивые при нагревании карбиды, чем карбид железа (цементит).

К карбидообразующим относятся элементы, расположенные в периодической системе слева от железа. По степени способности к карбидообразованию эти элементы располагаются в такой последовательности: Ti, Zr, Nb, V, W, Mo, Cr, Mn. Чем дальше от железа находится легирующий элемент, тем более устойчивые карбиды он образует. Устойчивость карбидов от марганца к цирконию возрастает, а растворимость в феррите, аустените и цементите уменьшается. При небольшом содержании Mn, Cr, Mo, W они растворяются в феррите и цементите, образуя легированный феррит и легированный цементит. В *легированном цементите* – $(Fe, Mn)_3C$, $(Fe, Cr)_3C$ и др. – атомы этих элементов частично замещают атомы железа, не изменяя его структуру. При повышении содержания этих элементов (Cr, W, Mo) образуются *сложные карбиды* следующих типов – $(Cr, Fe)_7C_3$, $(Cr, Fe)_{23}C_6$, Fe_3W_3C , Fe_3Mo_3C и др. Легированный цементит и сложные карбиды указанного типа при нагревании сравнительно легко растворяются в аустените.

К сильным карбидообразователям относятся Nb, V, Zr, Ti, которые практически не растворяются ни в феррите, ни в цементите. Они образуют *собственные специальные карбиды* типа NbC, VC, ZrC, TiC. Даже при очень высокой температуре эти карбиды не полностью растворяются в аустените из-за их высокой энергии межатомной связи, которую в известной степени характеризует их температура плавления (WC – 2900 °C, VC – 3100 °C, TiC – 3450 °C, ZrC – 3800 °C). Карбиды в сталях

являются упрочняющей фазой из-за их высокой твердости и высокого сопротивления сдвигу. Наличие карбидообразующих элементов в стали оказывает также значительное влияние на величину зерна (уменьшая их рост при нагреве) и на процессы, происходящие при термообработке (при нагреве и при охлаждении в процессе отжига и, особенно, при закалке и отпуске). Недостатком карбидов является их хрупкость.

Концентрация некоторых легирующих элементов может быть очень малой. В количестве до 0,1 % вводят Nb, Ti, а содержание бора обычно не превышает 0,005 %. Легирование стали, когда концентрация элемента составляет около 0,1 % и менее называют микролегированием.

Установлено, что в основном легирующие элементы повышают твердость феррита. Наиболее сильно повышают твердость сталей Mn и Si Cr и особенно Ni почти не уменьшают вязкость стали, никель наиболее резко снижает порог хладноломкости. Кроме того, Ni, Cr, Mn и некоторые другие элементы, хорошо (растворимые в аустените, повышают его устойчивость при охлаждении, увеличивая прокаливаемость стали.

Особенно повышается прокаливаемость при одновременном легировании стали Cr и Ni. Поэтому возможность достижения высокой прочности, пластичности, вязкости, прокаливаемости делает Ni и Cr важнейшими легирующими элементами в конструкционных сталях.

1.6. Получение чугунов

Выплавку чугуна осуществляют в печах шахтного типа – доменных печах. Сущность процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении оксидов железа, входящих в состав руды оксидом углерода, водородом и твёрдым углеродом, выделяющимся при сгорании топлива.

При выплавке чугуна решаются задачи:

- Восстановление железа из окислов руды, науглероживание его и удаление в виде жидкого чугуна определённого химического состава.
- Оплавление пустой породы руды, образование шлака, растворение в нём золы кокса и удаление его из печи.

1.7. Получение сталей

Основными исходными материалами для производства стали являются перелитый чугун и стальной лом (скрап). Сущность производства стали заключается в снижении содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки.

Процессы выплавки стали осуществляют в три этапа.

Первый этап – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла, при этом происходит окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей: кремния, марганца и фосфора.

Наиболее важная задача этапа – удаление фосфора.

Второй этап – кипение металлической ванны (основной этап). При повышении температуры более интенсивно протекает реакция окисления углерода, происходящая с поглощением теплоты: $FeO + C = CO + Fe - Q$

Для окисления углерода в металл вводят незначительное количество руды, окалины и вдувают кислород. Также создаются условия для удаления серы.

Третий этап – раскисление стали заключается в восстановлении оксида железа, растворённого в жидком металле.

При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей, но в готовой стали кислород – вредная примесь, так как понижает механические свойства стали, особенно при высоких температурах.

Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим и диффузионным.

Осаждающее раскисление осуществляется введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, алюминия), содержащих элементы, которые обладают большим сродством к кислороду, чем железо.

В результате раскисления восстанавливается железо и образуются оксиды: MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , которые имеют меньшую плотность, чем сталь, и удаляются в шлак.

В зависимости от степени раскисления выплавляют стали: спокойные, кипящие, полуспокойные.

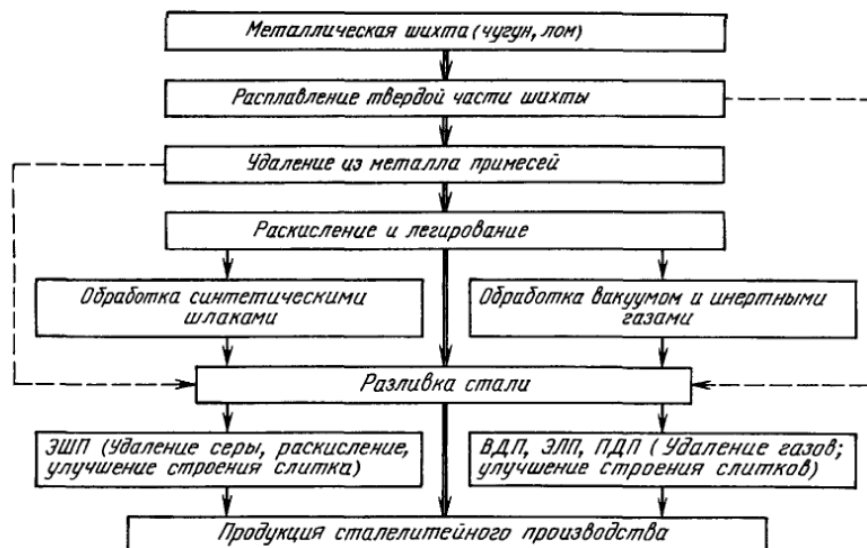


Рис.1.11. Схема технологических процессов производства стали.

Легирование стали осуществляется введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в расплав. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду меньше, чем у железа (Ni, Co, Mo, Cu), при плавке и разливке не окисляются, поэтому их вводят в любое время плавки. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду больше, чем у железа (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti), вводят в металл после раскисления или одновременно с ним в конце плавки, а иногда в ковш.

Чугун переделывается в сталь в различных по принципу действия металлургических агрегатах: мартеновских печах, кислородных конвертерах, электрических печах.

1.7.1. Производство стали в мартеновских печах

Основной принцип действия - вдувание раскаленной смеси горячего газа и воздуха в печь с низким сводчатым потолком, отражающим жар вниз, на расплав. Нагревание воздуха происходит посредством продувания его через предварительно нагретый регенератор (специальная камера, в которой выложены каналы огнеупорным кирпичом). Нагрев регенератора до нужной температуры осуществляется очищенными горячими печными газами. Происходит попеременный процесс: сначала нагрев регенератора продувкой печных газов, затем продувка холодного воздуха.

Продолжительность плавки составляет 3...6 часов, для крупных печей – до 12 часов. Готовую плавку выпускают через отверстие, расположенное в задней стенке

на нижнем уровне пода. Отверстие плотно забивают малоспекающимися огнеупорными материалами, которые при выпуске плавки выбивают. Печи работают непрерывно, до остановки на капитальный ремонт – 400...600 плавков.

В основных мартеновских печах выплавляют стали углеродистые конструкционные, низко- и среднелегированные (марганцовистые, хромистые), кроме высоколегированных сталей и сплавов, которые получают в плавильных электропечах.

В кислых мартеновских печах выплавляют качественные стали. Применяют шихту с низким содержанием серы и фосфора.

Стали содержат меньше водорода и кислорода, неметаллических включений. Следовательно, кислая сталь имеет более высокие механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, её используют для особо ответственных деталей: коленчатых валов крупных двигателей, роторов мощных турбин, шарикоподшипников.

1.7.2. Производство стали в кислородных конвертерах

Кислородно-конвертерный процесс – выплавка стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кислородом через водоохлаждаемую фурму. Кислородный конвертер – сосуд грушевидной формы из стального листа, футерованный основным кирпичом. Вместимость конвертера – 130...350 т жидкого чугуна. В процессе работы конвертер может поворачиваться на 360° для загрузки скрапа, заливки чугуна, слива стали и шлака. Шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий передельный чугун, стальной лом (не более 30%), известь для наведения шлака, железная руда, а также боксит Al_2O_3 и плавиковый шпат CaF_2 для разжижения шлака.

В кислородных конвертерах выплавляют стали с различным содержанием углерода, кипящие и спокойные, а также низколегированные стали. Легирующие элементы в расплавленном виде вводят в ковш перед выпуском в него стали. Плавка в конвертерах вместимостью 130...300 т заканчивается через 25...30 минут.

1.7.3 Производство стали в электропечах

Плавильные электропечи имеют преимущества по сравнению с другими плавильными агрегатами:

- а) легко регулировать тепловой процесс, изменяя параметры тока;
- б) можно получать высокую температуру металла,
- в) возможность создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу и вакуум, что позволяет раскислять металл с образованием минимального количества неметаллических включений.

В металлургических цехах используют электропечи с основной футеровкой, а в литейных – с кислой.

В основной дуговой печи осуществляется плавка двух видов:

- а) на шихте из легированных отходов (методом переплава),
- б) на углеродистой шихте (с окислением примесей).

Плавку на шихте из легированных отходов ведут без окисления примесей. После расплавления шихты из металла удаляют серу, наводя основной шлак, при необходимости науглероживают и доводят металл до заданного химического состава. Проводят диффузионное раскисление, подавая на шлак измельченные ферросилиций, алюминий, молотый кокс. Так выплавляют легированные стали из отходов машиностроительных заводов.

Плавку на углеродистой шихте применяют для производства конструкционных сталей. В печь загружают шихту: стальной лом, чушковый передельный чугун, электродный бой или кокс, для науглероживания металлов и известь.

В дуговых печах выплавляют высококачественные углеродистые стали – конструкционные, инструментальные, жаростойкие и жаропрочные. Под действием электромагнитного поля индуктора при плавке происходит интенсивная циркуляция жидкого металла, что способствует ускорению химических реакций, получению однородного по химическому составу металла, быстрому всплыванию неметаллических включений, выравниванию температуры.

В индукционных печах выплавляют сталь и сплавы из легированных отходов *методом переплава*, или из чистого шихтового железа и скрапа с добавкой ферросплавов *методом сплавления*.

После расплавления шихты на поверхность металла загружают шлаковую смесь для уменьшения тепловых потерь металла и уменьшения угара легирующих элементов, защиты его от насыщения газами.

В основных печах выплавляют высококачественные легированные стали с высоким содержанием марганца, титана, никеля, алюминия, а в печах с кислой футеровкой – конструкционные, легированные другими элементами стали.

В печах можно получать стали с незначительным содержанием углерода и безуглеродистые сплавы, так как нет науглероживающей среды.

При вакуумной индукционной плавке индуктор, тигель, дозатор шихты и изложницы, помещают в вакуумные камеры. Получают сплавы высокого качества с малым содержанием газов, неметаллических включений и сплавы, легированные любыми элементами.

1.8 Принципы классификации и маркировки сталей

По структуре в отожженном (равновесном) состоянии различают следующие группы сталей:

- 1) техническое железо с содержанием углерода менее 0,02 %. Структура сплава однофазная – феррит ;
- 2) доэвтектоидные стали с содержанием углерода от 0,02 до 0,8%. Структура сплавов состоит из феррита и перлита, причем с увеличением содержания углерода доля перлита в структуре возрастает;
- 3) эвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,8%. Структура стали – перлит: чередующиеся пластинки феррита и цементита;
- 4) заэвтектоидные стали с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 %.



Структура состоит из участков перлита, разделенных хрупкими цементитными оболочками.

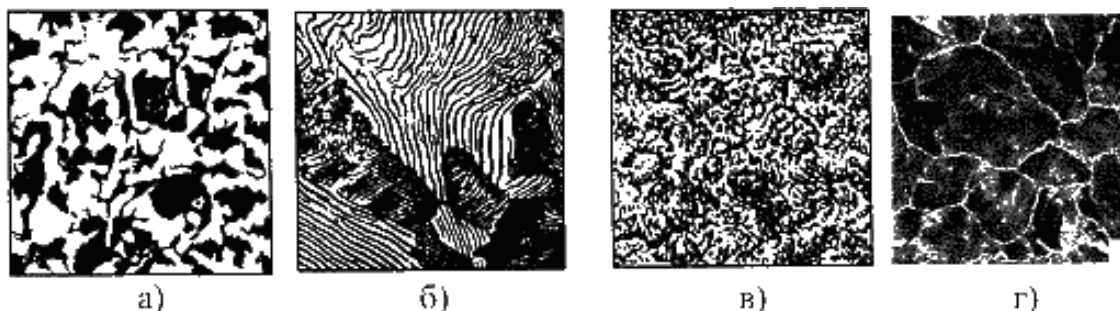


Рис. 1.16. Микроструктуры сталей:

а – доэвтектоидная сталь (феррит+перлит); б – эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит); в – эвтектоидная сталь (зернистый перлит); г – заэвтектоидная сталь (перлит + вторичный цементит).

Классификация сталей по качеству лежит в основе маркировки сталей. Качество стали – это металлургическое понятие. Оно определяется содержанием вредных примесей: серы, фосфора и газов. Чем этих примесей меньше, тем качество стали выше. Дальнейшая обработка, механическая или термическая, не способна изменить качество стали, сложившееся в процессе выплавки. Выделяют четыре группы сталей (таблица 3.1).

Таблица 1.1

Классификация стали по качеству.

Обыкновенного качества, маркировка «Ст»	Качественные, маркировка «Сталь»	Высококачественные, маркировка «А» в конце марки	Особо высококачественные, маркировка «Ш» в конце марки
ГОСТ 380-94 ≤ 0,05 % S ≤ 0,04 % P	ГОСТ 1050-88 ≤ 0,04 % S ≤ 0,035 % P	≤ 0,025 % S и P	≤ 0,015 % S и P

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-88) маркируют буквенно-цифровым кодом и по гарантии свойств, при поставке подразделяют на три группы: А, Б и В. Буквы «Ст» означают сталь, цифры от 0 до 6 - условный номер марки, например Ст0, Ст2 и т. д.

Стали группы А. Поставляются с определёнными регламентированными механическими свойствами. Их химический состав не регламентируется. Эти стали применяются в конструкциях, узлы которых не подвергаются горячей обработке — ковке, горячей штамповке, термической обработке и т. д. В связи с этим механические свойства горячекатаной стали сохраняются.

Стали группы Б. Поставляются с определённым регламентированным химическим составом, без гарантии механических свойств. Эти стали применяются в изделиях, подвергаемых горячей обработке, технология которой зависит от их химического состава, а конечные механические свойства определяются самой обработкой.

Стали группы В. Поставляются с регламентируемыми механическими свойствами и химическим составом. Эти стали применяются для изготовления сварных конструкций. Их свариваемость определяется химическим составом, а механические свойства вне зоны сварки определены в состоянии поставки. Такие стали применяют для более ответственных деталей.

По степени раскисления:

Степень раскисления определяется содержанием кремния (Si) в этой стали. По степени раскисления углеродистые стали обыкновенного качества делятся на: спо-

койные (СП) – не менее 0,12 % (Si), полуспокойные (ПС) – 0,07-0,12 % (Si), кипящие (КП) – не более 0,07 % (Si)

Раскислением называют последний этап выплавки стали, когда в расплав добавляют более активные, чем железо, металлы с целью отнять у железа кислород, восстановить его из оксида FeO. Марганец и кремний вводятся в жидкую сталь в виде ферросплавов – ферромарганца и ферросилиция, алюминий – в виде металла технической чистоты.

Маркировка конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества: Ст1кп2; БСт2пс; ВСт3Гпс; Ст4-2; ... ВСт6сп3. Буква перед маркой показывает группу стали. Сталь группы А буквой не обозначается. Ст — показывает, что сталь обыкновенного качества. Первая цифра — номер по ГОСТу (от 0 до 6). Буква Г после первой цифры — повышенное содержание марганца (Mn) (служит для повышения прокаливаемости стали). сп; пс; кп – степень раскисления стали (Для стали группы А отсутствие обозначения подразумевает «сп»). Вторая цифра — номер категории стали (от 1 до 6 — основные механические свойства). Сталь 1-й категории цифрой не обозначается.

Качественными углеродистыми сталями являются стали марок: Сталь08; Сталь10; Сталь15 ...; Сталь78; Сталь80; Сталь85. Сталь – слово «Сталь» указывает, что данная углеродистая сталь качественная. Цифра – указывает на содержание в стали углерода (С) в сотых долях процента.

Стали повышенной обрабатываемости (автоматные) являются стали марок: например А12, А20, А35, где вначале стоит буква «А». Имеют высокое содержание серы и фосфора, а также они, специально легированны селеном (Se), теллуром (Te) или свинцом (Pb). Указанные элементы способствуют повышению скорости резания, уменьшают усилие резания и изнашиваемость инструмента, улучшают чистоту и размерную точность обработанной поверхности, облегчают отвод стружки из зоны резания и т. д.

Легированные конструкционные стали. Две цифры в начале маркировки указывают на конструкционные стали. Это содержание в стали углерода в сотых долях процента. Буква без цифры – определённый легирующий элемент с содержанием

ем в стали менее 1 %. (А – азот, Р – бор, Ф–ванадий, Г – марганец, Д – медь, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, С – кремний, Х – хром, П – фосфор, Ч – редкоземельные металлы, В – вольфрам, Т – титан, Ю – алюминий, Б – ниобий)

Буква и цифра после неё — определённый легирующий элемент с содержанием в процентах (цифра). Буква А в конце маркировки – указывает на высококачественную сталь. Например 38Х2Н5МА – это среднелегированная высококачественная хромоникелевая конструкционная сталь. Химический состав: углерод – около 0,38 %; хром – около 2 %; никель – около 5 %; молибден – около 1 %.

1.9 Применение сталей

Применение **углеродистых конструкционные стали** обыкновенного качества: Ст1; Ст2 – проволока, гвозди, заклёпки. Ст3; Ст4 – крепёжные детали, фасонный прокат; Ст5; Ст6 – слабонагруженные валы, оси.

Стали **углеродистые качественные** Сталь08, Сталь08КП, Сталь08ПС относятся к мягким сталям, применяемым чаще всего в отожжённом состоянии для изготовления деталей методом холодной штамповки – глубокой вытяжки. Стали марок Сталь10, Сталь15, Сталь20, Сталь25 обычно используют как цементируемые, а высокоуглеродистые Сталь60 ... Сталь85 – для изготовления пружин, рессор, высокопрочной проволоки и других изделий с высокой упругостью и износостойкостью. Сталь30 ... Сталь50 и аналогичные стали с повышенным содержанием марганца Сталь30Г, Сталь40Г, Сталь50Г применяют для изготовления самых разнообразных деталей машин.

Стали повышенной обрабатываемости используют в массовом производстве для изготовления деталей на станках-автоматах. Стали с повышенным содержанием серы и фосфора обладают пониженными механическими свойствами и их используют для изготовления малонагруженных неотчетственных деталей.

Легированные конструкционные стали применяются для наиболее ответственных и тяжело нагруженных деталей машин. Практически всегда эти детали подвергаются окончательной термической обработке — закалке с последующим высоким отпуском в районе 550-680 °С (улучшение), что обеспечивает наиболее высокую конструктивную прочность.

Хромистые, обладающие хорошей твердостью, прочностью, сравнительно недорогие. К ним относятся стали марок 15Х, 20Х, 30Х, 45Х, боросодержащие 40ХР, с цирконием 40ХЦ.

Марганцевые, например 15Г, 20Г, 40Г, 45Г2, отличающиеся износостойкостью. Особенно износостойчива сталь марки Г13, которую применяют для гусениц "тракторов, железнодорожных стрелок.

Кремнистые и хромокремнистые (33ХС, 55ХС), обладающие высокой твердостью и упругостью; применяются для пружин, рессор.

Хромованадиевые (45ХФ, 40ХФА) особо прочные, плотные, хорошо противостоящие истиранию, применяемые для автомобильных деталей, осей, валов.

Хромомолибденовые (20ХМА, 30ХМА) очень прочные, хорошо сваривающиеся, штампуемые, используемые для осей, роторов.

Хромомарганцевокремнистые стали — хромансиль (25ХГСА, 30ХГСА), которые заменяют хромомолибде - новую сталь и значительно дешевле ее.

Хромоникелевые (12Х2Н4А, 20ХН3А), очень прочные и пластичные; применяются для изготовления коленчатых валов, поршней, деталей турбин.

Хромоникелевольфрамовые, хромоникелеванадиевые и другие стали марок 40ХН2МА, 13Х3НФА, 45ХН2МФА; применяют для высоконагруженных деталей машин: зубчатых колес, шатунов, Деталей турбин и т. д.

Стали конструкционные подшипниковые. Особенностью эксплуатации подшипников являются высокие локальные нагрузки. В связи с этим к чистоте стали предъявляются чрезвычайно высокие требования, особенно по неметаллическим включениям карбидной неоднородности. Обеспечение высокой статической грузоподъемности достигается применением в качестве материала для подшипников заэвтектоидных легированных хромом сталей, обработанных на высокую твердость. Сталь ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ.

Стали конструкционные рессорно-пружинные. Общее требование, предъявляемое к рессорно-пружинным сталям, — обеспечение высокого сопротивления малым пластическим деформациям (предел упругости) и релаксационной стойкости (сопротивление релаксации напряжений). 14ХН4А, 38Х2Н5М, 20ХН3А, 50ХФА,

55С2. Пружины, рессоры, упорные шайбы, тормозные ленты, фрикционные диски, шестерни, фланцы, корпуса подшипников, зажимные и подающие цанги и другие детали, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости, и детали, работающие без ударных нагрузок.

Инструментальные стали предназначены для изготовления инструментов 4-х типов: режущих, измерительных, штампов холодного деформирования и штампов горячего деформирования. Важнейшее условие работоспособности инструментов – высокая износостойкость, а так же высокая твердость (в 2-3 раза большей, чем у обрабатываемого материала), прочностью и теплостойкостью (т.е. способностью сохранять высокую твердость при повышенных температурах, т.к. происходит нагрев режущей кромки). Для сталей теплостойкость определяется сопротивлением разупрочнению при отпуске (т.е. максимальная температура, до которой сохраняется мартенситная структура). Для штампов важна ударная вязкость. У10А, У11, У11А, У8ГА, 55Х7ВСМФ, 5ХВ2СФ, 5ХНВ, 5ХНВС, 6ХЗМФС, 8ХФ, 9Г2Ф,....

Конструкционные стали по структуре преимущественно относятся к перлитному или мартенситному классу. По свойствам и структуре в отожженном состоянии легированные стали мало отличаются от углеродистых. Наиболее высокий комплекс механических свойств легированных сталей достигается при применении к ним термообработки. В отличие от углеродистых, легированные стали имеют более высокую прокаливаемость.

Различают следующие виды конструкционных сталей: строительные (ГОСТ 19281-89), цементуемые и улучшаемые (ГОСТ 4543-71), рессорно-пружинные (ГОСТ 14959-79).

Строительные стали используются для изготовления различных металлических конструкций (ферм, емкостей для хранения газообразных и жидких продуктов и т.д.). Эти стали содержат углерод в небольшом количестве (0,12-0,22%) и легирующие элементы, наиболее эффективно упрочняющие феррит (Si, Mn, Ni, Cr). Применяются они преимущественно в состоянии поставки (после горячей прокатки без термообработки).

Благодаря низкому содержанию углерода строительные стали обладают высокой пластичностью, обеспечивающей их технологичность при выполнении операций холодной гибки, а также хорошей свариваемостью. Широкое практическое применение получили стали: **09Г2, 10Г2С1, 10ХСНД** и др.

Цементуемые легированные стали применяются для изготовления деталей, работающих в условиях поверхностного износа и значительных механических нагрузок. Содержание углерода в этих сталях колеблется в пределах 0,10-0,25%. Термическая обработка после цементации проводится по режимам, принятым для цементуемых изделий. Легирующие элементы и низкое содержание углерода в цементуемых сталях обеспечивают после закалки и низкотемпературного отпуска высокую прочность сердцевины изделий в сочетании с достаточно высокой пластичностью. Цементуемые легированные стали: **15Х, 20Х, 20ХН, 18ХГТ, 12ХНЗА, 12Х2Н4А** и др.

Улучшаемые легированные стали содержат от 0,2 до 0,5% углерода и до 7-8% легирующих элементов. Наиболее распространенными являются хромистые, хромокремнемарганцевые, хромоникелевые, хромоникелемолибденовые, хромоникелевомолибденованадиевые и др. Термическая обработка этих сталей состоит из закалки и высокого отпуска (550-650 °С). Структура стали после такой обработки (улучшения) – сорбит. Широкое применение получили улучшаемые стали: 40Х, 40ХНМ, 38ХНЗМФА и др.). Выбор конкретных сталей для определенного назначения производится, исходя из их прочности и прокаливаемости.

Рессорно-пружинные легированные стали, используемые для изготовления пружин, рессор и других подобных деталей, должны обладать высоким пределом упругости и пределом выносливости в сочетании с удовлетворительной пластичностью. Сочетание перечисленных свойств этих сталей достигается повышенным содержанием в них углерода (0,45-0,75%), введением в состав легирующих элементов и применением после закалки среднетемпературного отпуска (350-520 °С) для получения структуры троостита. Рессорно-пружинные легированные стали: **65Г, 60С2А, 50ХФ, 60С2Н2Ф** и др.

Стали для режущего инструмента разделяются на две группы. В первую группу входят стали, не обладающие, подобно углеродистым инструментальным сталям, теплостойкостью (красностойкостью). Инструменты из таких сталей могут работать только при относительно низких скоростях резания, обуславливающих разогрев режущей кромки до температур не выше 200-250 °С. Основное назначение легирующих элементов состоит в увеличении прокаливаемости и уменьшением чувствительности к перегреву при закалке. По структуре в отожженном состоянии большинство сталей этой группы относится к эвтектоидным. Термообработка инструмента состоит из закалки и последующего низкого отпуска (140-180 °С). Твердость после термообработки должна быть не ниже 62HRC. К этой группе принадлежат стали: **X, 9XC, XBG**, и др. Стали этой группы используют также для изготовления измерительного инструмента.

Ко второй группе относятся быстрорежущие стали, обладающие высокой теплостойкостью (красностойкостью). Они применяются для изготовления режущих инструментов, работающих при высоких скоростях резания. Основными легирующими элементами в быстрорежущих сталях являются: вольфрам (5,5-18,5%), хром (3,8- 4,5%), ванадий (1,0-2,6%). Отдельные марки содержат повышенное количество ванадия (до 5,1%), кобальт (5-10,5%) и молибден.

Обозначение марок быстрорежущей стали состоит из букв и цифр. Первая буква «Р» означает, что сталь относится к группе быстрорежущих, цифра за буквой «Р» указывает среднее содержание вольфрама в процентах. Среднее содержание в стали элемента в процентах обозначается цифрой, следующей за буквой: например, ванадия цифрой после буквы «Ф», кобальта – цифрой после буквы «К», молибдена – цифрой, следующей за буквой «М».

Быстрорежущие стали по структуре принадлежат к ледебуритному (карбидному классу). Термообработка инструмента из этих сталей состоит из закалки в масле с высоких температур, значительно превышающих критические точки (для более полного растворения вторичных карбидов в аустените) и последующего трехкратного отпуска при температурах, обеспечивающих высокую твердость и теплостойкость (550-570 °С).

В отдельных случаях инструменты из быстрорежущей стали после закалки подвергают обработке холодом для уменьшения количества остаточного аустенита. Твердость инструмента после термообработки составляет 63-65 HRC. Применяемые стали: **P9, P18, P12, P9Ф6, P6M5** и др.).

Для скоростной обработки металлов применяют инструмент, оснащенный **твердыми сплавами** (ГОСТ 3882-74). По сравнению с быстрорежущими сталями рабочая температура резания инструмента из твердых сплавов может быть увеличена до 800-1000 °С.

Основой всех твердых сплавов являются прочные карбиды металлов, не разлагающиеся и не растворяющиеся при высоких температурах. Особенно важны для твердых сплавов карбиды вольфрама, титана, тантала, хрома, частично марганца. Карбиды металлов слишком хрупки и часто тугоплавки, поэтому для образования твердого сплава зёрна карбидов связываются подходящим металлом; в качестве связки используют кобальт (иногда никель или молибден).

Изделия из твердых сплавов получают методами порошковой металлургии (спеканием при температуре 1500-2000 °С). После чего они поддаются только обработке шлифованием или физико-химическим методам обработки (лазер, ультразвук, травление в кислотах и др). Порошковые твердые сплавы закрепляются на оснащаемом инструменте методами пайки или механическим креплением.

Твердосплавные инструменты пригодны для обработки закаленных сталей и таких неметаллических материалов, как стекло, фарфор и т. п.

Наиболее распространенными твердыми сплавами являются ВК6, ВК8, Т15К6, ТТ7К12. В маркировке цифры после букв К и Т указывают количество кобальта и карбидов титана (тантала) соответственно, остальное - карбид вольфрама.

Штамповые стали, используемые для изготовления штампов, предназначенных для холодного деформирования, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью в сочетании с достаточно удовлетворительной пластичностью. Для штампов сложной формы, пуансонов и другого инструмента, испытывающего ударные нагрузки, используют доэвтектоидные стали (4XB2C, 5XB2C и

др.). Термическая обработка штампов состоит из закалки и отпуска при температуре 250-430 °С. Твердость после обработки составляет 48-56HRC.

Для штампов, работающих в условиях сильного износа, используются стали ледебуритного класса (X12M, X12Ф1). Твердость штампов после закалки и низкого отпуска лежит в пределах 60-63HRC.

Стали для штампов, предназначенных для горячего деформирования, должны обладать высокой прочностью при высоких температурах (жаропрочностью), способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования трещин (сопротивлением термической усталости), износостойкостью и достаточно высокой теплопроводностью. Стали этой группы по структуре в отожженном состоянии относятся к доэвтектоидным, и содержат в своем составе легирующие элементы, повышающие прокаливаемость и прочность стали при высоких температурах (Cr, W, Mo, V и др.). Для обеспечения достаточной вязкости отпуск штампов после закалки производят при более высоких температурах, чем отпуск штампов для холодного деформирования. Применяемые стали: **5ХНМ, ХГМ, 4Х2В5ФМ, 3Х2В8Ф** и др.

Коррозионностойкие стали. К коррозионностойким (нержавеющим) сталям относятся стали и сплавы, обладающие высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в различных электролитах (водных растворах солей, щелочей, кислот) и других агрессивных средах. Нержавеющие стали содержат в своем составе не менее 12% хрома. Высокая коррозионная стойкость подобных сталей обусловлена образованием на поверхности защитной пленки из оксидов хрома, препятствующей контакту между сталью и внешней агрессивной средой.

Нержавеющие стали разделяются на две основные подгруппы. К первой группе относятся хромистые нержавеющие стали со средним содержанием хрома 12, 17 и 25%, принадлежащие по структуре к мартенситному, мартенсито-ферритному и ферритному классам. С увеличением содержания хрома повышается коррозионная стойкость стали. Широкое применение нашли **12Х13** (мартенсито-ферритного класса) и сталь **20Х13** (мартенситного класса), используемые для изготовления лопаточного аппарата паровых турбин и компрессоров. Для работы в более агрессивных средах применяются стали: **20Х17Н2, 08Х17Т, 15Х25Т** и др.

Ко второй подгруппе относятся хромоникелевые нержавеющие стали. По структуре в зависимости от состава эти стали принадлежат каустенитному, аустенито-ферритному и аустенито-мартенситному классам. Широкое применение нашли стали этой группы: **08X18H9T, 08X18H10T, 12X18H9T** и др.

Для работы в сильных агрессивных средах применяются хромоникелевые стали с более высоким содержанием хрома и никеля, дополнительно легированные медью и молибденом (**10X17H13M2T, 06X23H8M3DT** и др.).

Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы. Для материалов, используемых при высоких температурах, основными характеристиками являются жаростойкость (окалиностойкость) и жаропрочность. Стали, обладающие высокой сопротивляемостью окислению (газовой коррозии) при высоких температурах называются жаростойкими.

К жаропрочным относятся стали, обладающие необходимой прочностью при высоких температурах. Жаропрочность достигается введением в состав стали легирующих элементов, повышающих прочность межатомных связей основного твердого раствора (феррита и аустенита), а также образующих вторичные упрочняющие фазы (карбиды, интерметаллиды), обладающие высокой термической стойкостью (устойчивостью против коагуляции при длительном воздействии высоких температур).

Жаропрочные стали и сплавы в зависимости от состава и температурной области применения разделяются на 4 основные группы.

К первой группе относятся перлитные жаропрочные стали, используемые для деталей с рабочей температурой до 570 °С.

Основными легирующими элементами этой группы являются хром, молибден, вольфрам, ванадий и в отдельных случаях титан, ниобий и бор в незначительных количествах. Термическая обработка сталей состоит в нормализации или закалки в масле с последующим высоким отпускком. Широкое практическое применение нашли стали: **12XMФ, 15X1M1Ф** (корпусные элементы турбин), **34XM1A, 25X2M1ФА, 20X3MBФА** (цельнокованные роторы), **25X1MФ** (крепежные детали) и др.

Вторую группу составляют **хромистые жаропрочные стали мартенситного класса**, содержащие 12% Cr и другие легирующие элементы (Mo, W, V, Nb, B) в сравнительно небольших количествах. Стали этой группы применяются для деталей, работающих при температурах до 560-600 °С. Термическая обработка – улучшение. Хромистые жаропрочные стали используются для изготовления лопаточного аппарата паровых и газовых турбин. Применяемые стали: 15X11МФ, 18X11МФ5, 20X12ВНМФ и др.

Третью группу составляют **хромоникелевые стали аустенитного класса**, дополнительно легированные молибденом, вольфрамом, ниобием, титаном и др. Они используются для деталей турбин, работающих при температурах до 700 °С (стали 08X16Н13М2Б, ХН35ВТ и др.). Термическая обработка жаропрочных аустенитных сталей состоит из нагрева до высоких температур (1050-1150 °С) с последующим быстрым охлаждением (аустенизации) и одноступенчатого или двухступенчатого отпуска (старения) в интервале температур 700-850 °С. В процессе отпуска из аустенита выделяются дисперсные частицы упрочняющих фаз (карбидов, интерметаллидов).

К четвертой группе относятся жаропрочные сплавы на никелевой основе, предназначенные для работы при температуре до 750-850 °С. Сплавы на никелевой основе принадлежат к сложнoleгированным сплавам, отличительными особенностями которых является сравнительно высокое содержание хрома (10-20%), а также наличие в составе алюминия и титана в умеренных количествах (1-6%). Алюминий и титан образуют интерметаллическое соединение $Ni_3(AlTi)$, являющееся основной упрочняющей фазой в подобных сплавах. Это соединение получило название γ' -фазы. Выделение высокодисперсных частиц этой фазы из твердого раствора происходит в процессе отпуска закаленных сплавов. В наиболее жаропрочных сплавах объемная доля упрочняющих фаз достигает 60% (расстояние между частицами составляет 200-400 Å). Дополнительное повышение жаропрочности достигается введением в состав сплава молибдена (3-4%), вольфрама (4-9%), ниобия (1-1,5%), кобальта (5-16%), а также бора и церия в незначительных количествах. Термообработка сплавов состоит из закалки в воде с температур 1150-1180 °С и последующего

длительного одноступенчатого отпуска (старения) при 750-800 °С или многоступенчатого старения. Основным достоинством сплавов является высокая жаропрочность, по показателям которой они превосходят жаропрочные стали всех рассмотренных групп. Применяемые сплавы ХН65ВМТ, ХН55ВМТК и др.

Ферритные криогенные стали. Широкое распространение в качестве материала для криогенной техники получили ферритные низкоуглеродистые железоникелевые стали, содержание 3,5-9 % Ni и менее 0,1 % углерода. Эти стали более технологичны и имеют более высокие прочностные свойства по сравнению с хромоникелевыми аустенитными сталями. Никель, уменьшая энергию взаимодействия дислокаций с атомами примесей внедрения в кристаллической решетке железа, эффективно снижает порог хладноломкости и повышает работу развития трещины в условиях вязкого разрушения. Чем больше содержание никеля в стали, тем ниже ее рабочая температура Ni = 3-4 % T = -120 °С, Ni=6-9 % T=-196 °С. Практическое применение для изготовления криогенного оборудования получили стали: ОН6 (6-7 % Ni, 0,03-0,06 % С) и ОН9 (8,5-9,5 % Ni, 0,06-0,07 % С). Эти стали обычно подвергают нормализации (Н) и двойной нормализации с отпуском (ДНО). Термическая обработка обычно указывается в маркировке: ОН9Н, ОН9ДНО.

Стали конструкционные теплоустойчивые. К теплоустойчивым конструкционным относятся стали, используемые в энергетическом машиностроении для изготовления котлов, сосудов, паронагревателей, паропроводов, а также в других отраслях промышленности для работы при повышенных температурах. Рабочие температуры теплоустойчивых сталей достигают 600-650 °С, причём детали из них должны работать без замены длительное время (до 10000-20000 ч.).

При давлениях 6 МПа и температурах до 400 °С используются углеродистые котельные стали (12К, 15К, 18К, 20К). Для деталей энергоблоков, работающих при давлении до 25.5 МПа и температурой до 585 °С применяются стали, легированные хромом, молибденом, ванадием. Содержание углерода 0.08-0.27 %. Термообработка этих сталей заключается в закалке или нормализации с обязательным высоким отпуском.

1.10 Магнитные стали и сплавы

Ферромагнетизмом (способностью в значительной степени сгущать магнитные силовые линии) обладают желе-зо, кобальт и никель. Эта способность характеризуется магнитной проницаемостью. У ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость достигает десятков и сотен тысяч единиц, для других материалов она близка к единице. Магнитные свойства материала характеризуются остаточной индукцией и коэрцитивной силой.

Магнитно-твердые стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов. Они имеют большую коэрцитивную силу. Это высокоуглеродистые и легированные стали, специальные сплавы. Углеродистые стали (У 10-У 12) после закалки имеют достаточную коэрцитивную силу ($H_c=5175$ А/м); но, так как они прокаливаются на небольшую глубину, их применяют для изготовления небольших магнитов. Хромистые стали по сравнению с углеродистыми прокаливаются значительно глубже, поэтому из них изготавливают более крупные магниты. Магнитные свойства этих сталей такие же, как и углеродистых. Хромокобальтовые стали (например, марки EX5K5) имеют более высокую коэрцитивную силу – $H_c=7166$ А/м. Магнитные сплавы, например ЮНДК24 (9% Al; 13,5% Ni; 3% Si, 24% Co; остальное железо), имеют очень высокую коэрцитивную силу – $H_c = 39810$ А/м, поэтому из них изготавливают магниты небольшого размера, но большой мощности.

Магнитно-мягкие стали и сплавы. Магнитно-мягкие стали и сплавы имеют малую коэрцитивную силу и большую магнитную проницаемость. К ним относят электротехническое железо и сталь, железоникелевые сплавы (пермаллой).

Электротехническое железо (марки Э, ЭА, ЭАА) содержит менее 0,04% С, имеет высокую магнитную проницаемость $M_a=(2,78-3,58) \cdot 10^9$ Гн/м и применяется для сердечников, полюсных наконечников электромагнитов и др. *Электротехническая сталь* содержит менее 0,05% С и кремний, сильно увеличивающий магнитную проницаемость. Электротехническую сталь по содержанию кремния делят на четыре группы: с 1% Si- марки Э11, Э12, Э13; с 2% Si- Э21, Э22; с 3% Si- Э31, Э32; с 4% Si - Э41-Э48. Вторая цифра (1-8) характеризует уровень электротехнических свойств.

Железоникелевые сплавы(пермаллой) содержат 45-80% Ni их дополнительно легируют Cr, Si, Mo. Магнитная проницаемость этих сплавов очень высокая. На-

пример, у пермаллоя марки 79НМ (79% Ni; 4% Mo) $\mu_a = 175,15 \cdot 10^9$ Гн/м. Применяют пермаллои в аппаратуре, работающей в слабых электромагнитных полях (телефон, радио).

Ферриты - магнитно-мягкие материалы, получаемые спеканием смеси порошков ферромагнитной окиси железа и окислов двухвалентных металлов (ZnO, NiO, MgO и др.). В отличие от других магнитно-мягких материалов у ферритов очень высокое удельное электросопротивление, что определяет их применение в устройствах, работающих в области высоких и сверхвысоких частот.

1.11 Сплавы с высоким электрическим сопротивлением

Их применяют для изготовления электронагревателей и элементов сопротивлений (резисторов) и реостатов. Сплавы для электронагревателей обладают высокой жаростойкостью, высоким электрическим сопротивлением, удовлетворительной пластичностью в холодном состоянии.

Указанным требованиям отвечают *железохромоалюминиевые сплавы*, например марок Х13Ю4 (0,15 % С; 12-15% Cr; 3,5-5,5% Al), ОХ23Ю5 (<0,05% С; 21,5-23,5% Cr; 4,6-5,3% Al), *никелевые сплавы*, например марок Х15Н60 - ферро-нихром, содержащий 25% Fe, Х20Н80- нихром. Стойкость нагревателей из железохромоалюминиевых сплавов выше, чем у нихромов. Сплавы выпускают в виде проволоки и ленты, применяют для бытовых приборов (сплавы Х13Ю4, Х15Н60, Х20Н80), а также для промышленных и лабораторных печей (ОХ23Ю5).

Сплавы с заданным коэффициентом теплового расширения. Они содержат большое количество никеля. Сплав 36Н, называемый инваром (<0,05% Cu 35-37% Ni), почти не расширяется при температурах от -60 до +100°C. Его применяют для изготовления деталей приборов, требующих постоянных размеров в интервале климатических изменений температур (детали геодезических приборов и др.).

Сплав 29НК, называемый *коваром* (<0,03% С; 28,5-29,5% Ni; 17-18% Co), имеет низкий коэффициент теплового расширения в интервале температур от -70° до +420°C. Его применяют для изготовления деталей, впаиваемых в стекло при создании вакуумно-плотных спаев.

1.12 Сплавы с заданными упругими свойствами

В ряде случаев требуется металл с постоянным, не изменяющимся с температурой, модулем упругости (Гука – E, Юнга – G). Такие сплавы применяются для пружин различных точных приборов, для камертонов и т.п. Их называют элинварами. Их состав на основе никеля, хрома и железа.

К таким сплавам относят сплав 40КХНМ (0,07-0,12% C; 15-17% Ni; 19-21% Cr; 6,4-7,4% Mo; 39-41% Co). Это высокопрочный с высокими упругими свойствами, немагнитный, коррозионостойкий в агрессивных средах сплав. Применяют его для изготовления заводных пружин часовых механизмов, витых цилиндрических пружин, работающих при температурах до 400°C. Элинвар марки Н35ХМВ (1,2 % углерода, никеля 35 %, хрома 9 %, молибдена 2 %, вольфрама 3 %) обеспечивает температурную погрешность хода часов порядка 0,5 с в сутки на 1°C. Сплав марки 42НХТЮ (0,05 % углерода, никеля 42 %, хрома 5,5 %) высокопрочный, и применяется для упругих элементов, работающих до температур 100°C.

1.13 Характеристика цветной металлургии

Цветная металлургия – отрасль металлургии, которая включает добычу, обогащение руд цветных металлов и выплавку цветных металлов и их сплавов. Все цветные металлы разделяются на несколько групп:

- тяжелые цветные металлы - Cu, Pb, Zn, Ni, Sn;
- легкие металлы - Al, Mg, Ti и др.;
- малые цветные металлы - Co, Sb, Bi, Hg, Cd;
- благородные металлы - Au, Ag, Pt и др.;
- редкие металлы - Li, Be, Zr, Nb, Ga, In;
- редкоземельные элементы (Y, La, Ce и др.).

Используют цветные металлы как в виде чистых металлов, так и в виде сплавов, в виде легирующих добавок, как покрытия для защиты изделий из коррозии, а также в виде порошков - в машиностроении, судостроении, авиации и ракетной технике, электро- и радиотехнике, электронике, в приборостроении и атомной технике и др. Масштабы производства цветных металлов различаются очень сильно – от превышающих десятки млн. тонн в год для Al или Cu до нескольких тонн (Re) и менее (для радиоактивных металлов).

1.14 Медные сплавы

Медь обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, прочностью вязкостью и коррозионной стойкостью. Структура решетки – кубическая гранцентрированная. $T_{\text{плав.}} = 1083 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{кип.}} = 2360 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Средний предел прочности зависит от вида обработки и составляет от 220 до 420 МПа, относительное удлинение – 4-60 %, твердость – 35-130 НВ, плотность – 8,94 г/см³.

Обладая замечательными свойствами, медь в то же время как конструкционный материал не удовлетворяет требованиям машиностроения, поэтому ее легируют, т. е. вводят в сплавы такие металлы, как цинк, олово, алюминий, никель и другие, за счет чего улучшаются ее механические и технологические свойства.

В чистом виде медь применяется ограниченно, более широко – ее сплавы. По химическому составу медные сплавы подразделяют на латуни, бронзы и медноникелевые, по технологическому назначению – на деформируемые, используемые для производства полуфабрикатов (проволоки, листа, полос, профиля), и литейные, применяемые для литья деталей.

В настоящее время медные сплавы широко используются в электромашиностроении, при строительстве линий электропередач, для изготовления оборудования телеграфной и телефонной связи, радио- и телевизионной аппаратуры. Из меди изготавливают провода, кабели, шины и другие токопроводящие изделия.

Латуни – сплавы меди с цинком и другими компонентами. Латуни, содержащие, кроме цинка, другие легирующие элементы, называются сложными, или специальными, и именуются по вводимым, кроме цинка, легирующим компонентам. Например: Л90 – это латунь, содержащая 90 % Cu, остальное – Zn; латунь алюминиевая ЛА77-2 – содержит 77 % Cu, 2 % Al, остальное – Zn и т. д. По сравнению с медью латуни обладают большой прочностью, коррозионной стойкостью и упругостью. Они обрабатываются литьем, давлением и резанием. Из них изготавливают полуфабрикаты (листы, ленты, полосы, трубы конденсаторов и теплообменников, проволоку, штамповки, запорную арматуру – краны, вентили, медали и значки, художественные изделия, музыкальные инструменты, сальфоны, подшипники).

Бронзы – сплавы на основе меди, в которых в качестве добавок используются олово (Sn), алюминий (Al), бериллий (Be), кремний (Si), свинец (Pb), хром (Cr) и другие элементы.

Бронзы подразделяются на безоловянные (БрА9Мц2Л и др.), оловянные (БрОЗц12С5 и др.), алюминиевые (БрА5, БрА7 и др.), кремниевые (БрКН1–3, БрКМц3–1), марганцевые (БрМц5), бериллиевые бронзы (БрБ2, БрБНТ1,7 и др.).

Бронзы используются для производства запорной арматуры (краны, вентили), различных деталей, работающих в воде, масле, паре, слабоагрессивных средах, морской воде.

Абиссинское золото – медный сплав, имитирующий золото по цвету; содержит 88 % меди, 11,5 % цинка и 0,5 % золота.

Французское золото – имитирующий драгметаллы бронзовый сплав, идущий на выделку художественных, галантерейных и отчасти ювелирных изделий; состоит из 58,3 % красной меди, 16,7 % олова и 25 % цинка и действительно имеет подобные золотому цвет и блеск.

Северное золото – медно-алюминиевый сплав золотистого цвета, также известный как жёлтый нордик. Состав: медь – 89 %, алюминий – 5 %, цинк – 5 %, олово – 1 %.

1.15 Алюминиевые сплавы

По распространенности в природе алюминий занимает третье место после кислорода и кремния и первое место среди металлов. По использованию в технике он занимает второе место после железа. В свободном виде алюминий не встречается, его получают из минералов – бокситов, нефелинов и алунитов, при этом сначала производят глинозем, а затем из глинозема путем электролиза получают алюминий. Механические свойства алюминия невысоки: сопротивление на разрыв – 50-90 МПа (5–9 кгс/мм²), относительное удлинение – 25-45 %, твердость – 13-28 НВ. В чистом виде алюминий применяется редко, в основном широко используются его сплавы с медью, магнием, кремнием, железом и т. д.

Алюминий первичный – получают путем обогащения глинозема. В природе металл в чистом виде не встречается ввиду его высокой химической активности. Со-

единяясь с другими элементами, он образует бокситы, нефелины и алуниты. Впоследствии из этих руд получают глинозем, а из него с помощью сложных химико-физических процессов - чистый алюминий: А0- А9, А95-А99.

Алюминий технический – называют материал с процентным содержанием инородных примесей менее 1%. Технические марки алюминия по ГОСТу 4784-97 характеризуются очень низкой прочностью, но высокой антикоррозионной стойкостью. Благодаря отсутствию в составе легирующих частиц на поверхности металла быстро образуется защитная оксидная пленка, которая отличается устойчивостью: АД, АД0, АДоч,.....

К деформируемому алюминию относят материал, который подвергают горячей и холодной обработке давлением: прокатке, прессованию, волочению и другим видам. В результате пластических деформаций из него получают полуфабрикаты различного продольного сечения: алюминиевый пруток, лист, ленту, плиту, профили и другие:

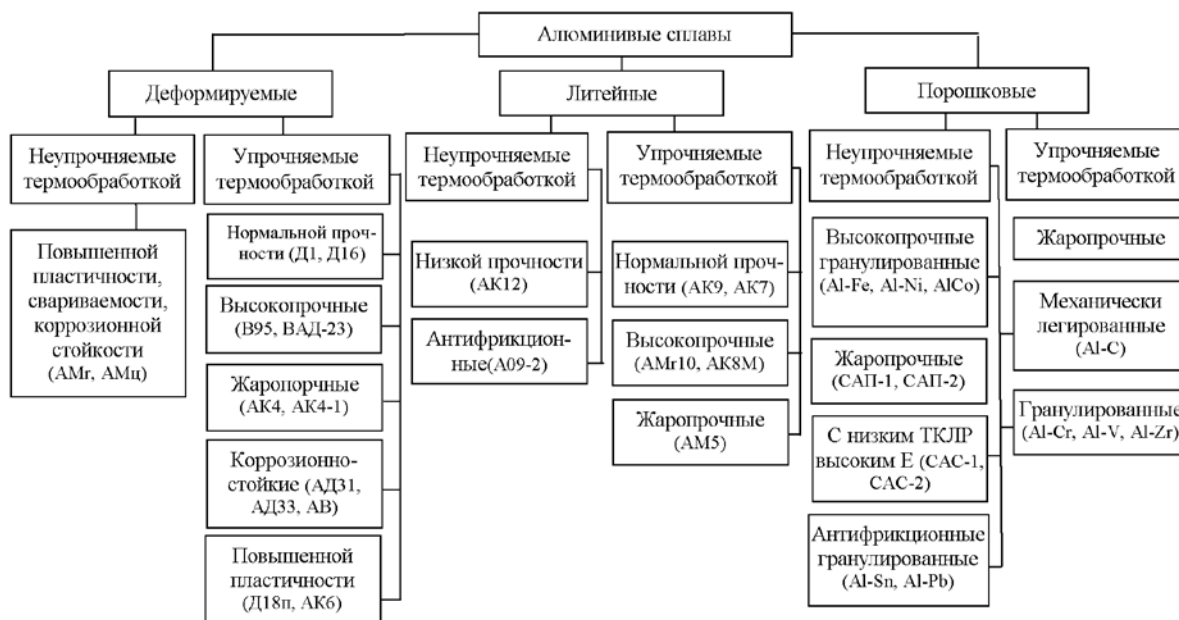
АК12 содержит 12 % кремния, остальное – алюминий; АК7М2П – 7 % кремния, 2 % меди, остальное – алюминий.

Литейные марки алюминия используются для производства фасонных изделий. Их главной особенностью является сочетание высокой удельной прочности и низкой плотности, что позволяет отливать изделия сложных форм без образования трещин: АМг5, АК8М, АЛ1,...

На качество изготавливаемых изделий оказывает влияние и то, какие имеет алюминий физические свойства. И применение низкосортных сортов материала не ограничивается созданием полуфабрикатов. Очень часто он используется для раскисления стали – удаления из расплавленного железа кислорода, который растворен в нем и повышает тем самым механические свойства металла. Для проведения данного процесса чаще всего применяются марки : АВ86, АВ88, АВ92,.....

Наиболее широко применяется в различных отраслях промышленности сплав алюминия с кремнием – силумин, который изготавливается четырех марок – СИЛ–00, СИЛ–0, СИЛ–1 и СИЛ–2. Кроме алюминия (основа) и кремния (10–13 %), в этот сплав входят: железо – 0,2–0,7 %, марганец – 0,05-0,5 %, кальций – 0,7-0,2 %, титан

– 0,05-0,2 %, медь – 0,03 % и цинк – 0,08 %. Из силуминов изготавливают различные детали для автомобилей, тракторов, пассажирских вагонов. Алюминиевые деформируемые сплавы в чушках, предназначенные для обработки давлением и при получении других алюминиевых сплавов, нормируются определенными стандартами.



Сплавы для обработки давлением состоят из алюминия (основа), легирующих элементов (медь – 5 %, магний – 0,1–2,8 %, марганец – 0,1-0,7 %, кремний – 0,8-2,2 %, цинк – 2-6,5 % и небольшого количества других примесей). Марки этих сплавов: ВД1, АВД1, АВД1-1, АКМ, из алюминиевых сплавов изготавливают полуфабрикаты – листы, ленты, полосы, плиты, слитки, слябы.

Алюминиевые лигатуры - вспомогательный сплав, применяемый для введения в жидкий металл легирующих элементов: AlB3, AlCo10, AlSr5, AlNi10,....

Кроме того, цветная металлургия производит алюминиевые антифрикционные сплавы, применяемые для изготовления монометаллических и биметаллических подшипников методом литья. В зависимости от химического состава стандартом предусмотрены следующие марки этих сплавов: АО3-7, АО9-2, АО6-1, АО9-1, АО20-1, АМСТ. Стандартом также определены условия работы изделий, изготовленных из этих сплавов: нагрузка от 19,5 до 39,2 МН/м² (200–400 кгс/см²), температура от 100 до 120 °С, твердость – от 200 до 320 НВ.

1.16 Титановые сплавы

Титан имеет малую плотность $4,5 \text{ г/см}^3$, тугоплавок (температура плавления $1665 \text{ }^\circ\text{C}$), весьма прочен и пластичен. На поверхности его образуется стойкая окисная пленка, за счет которой он хорошо сопротивляется коррозии в пресной и морской воде, а также в некоторых кислотах. При температурах до $882 \text{ }^\circ\text{C}$ он имеет гексагональную плотно упакованную решетку, при более высоких температурах – объемно – центрированный куб. Механические свойства листового титана зависят от химического состава и способа термической обработки. Предел прочности его – $300\text{-}1200 \text{ МПа}$ ($30\text{-}120 \text{ КГС/мм}^2$), относительное удлинение – $4\text{-}10 \text{ \%}$. Вредными примесями титана являются азот, углерод, кислород и водород. Они снижают его пластичность и свариваемость, повышают твердость и прочность, ухудшают сопротивление коррозии.

При температуре свыше $500 \text{ }^\circ\text{C}$ титан и его сплавы легко окисляются, поглощая водород, который вызывает охрупчивание. При нагревании выше $800 \text{ }^\circ\text{C}$ титан энергично поглощает кислород, азот и водород, эта его способность используется в металлургии для раскисления стали. Он служит легирующим элементом для других цветных металлов и для стали.

Имеет широкое применение в авиа-, ракето- и судостроении. Из титана и его сплавов изготавливают полуфабрикаты: листы, трубы, прутки и проволоку. Основными промышленными материалами для получения титана являются ильменит, рутил, перовскит и сфен (титанит). Технология получения: сначала вырабатывают титановую губку, а затем путем переплавки в вакуумных печах из нее производят ковкий титан.

В зависимости от химического состава и механических свойств стандартом установлены следующие марки губчатого титана: ТГ–90, ТГ–100, ТГ–110, ТГ–120, ТГ–130. В обозначении марок буквы «ТГ» означают – титан губчатый, «Тв» – твердый, цифры означают твердость по Бринеллю. В губчатый титан входят примеси: железо – до $0,2 \text{ \%}$, кремний – до $0,04 \text{ \%}$, никель – до $0,05 \text{ \%}$, углерод – до $0,05 \text{ \%}$, хлор – до $0,12 \text{ \%}$, азот – до $0,04 \text{ \%}$, кислород – до $0,1 \text{ \%}$. Для изготовления различных полуфабрикатов (листы, трубы, прутки, проволока) предназначены титан и титановые сплавы, обрабатываемые давлением.

В зависимости от химического состава стандарт предусматривает следующие их марки: ВТ1–00, ВТ1–0, ОТ4–0, ОТ4–1, ОТ4, ВТ5, ВТ5–1, ВТ6, ВТ20, ВТ22, ПТ–7М, ПТ–7В, ПТ–1 м. Основные компоненты: алюминий – 0,2–0,7 %, марганец – 0,2–2 %, молибден – 0,5–5,5 %, ванадий – 0,8–5,5 %, цирконий – 0,8–3 %, хром – 0,5–2,3 %, олово – 2–3 %, кремний – 0,15–0,40 %, железо – 0,2–1,5 %. Железо, кремний и цирконий в зависимости от марки сплава могут быть основными компонентами или примесями.

1.17 Цинковые сплавы

Цинк кристаллизуется в гексагональной системе и обладает различной способностью к деформациям, что зависит от ориентации отдельных кристаллов по отношению к деформирующим силам. Цинк хорошо поддается обработке давлением и отличается хорошей коррозионной стойкостью, он имеет и относительно удовлетворительные механические свойства, но низкий предел ползучести. Большой недостаток цинка и цинковых сплавов – склонность к изменению своих размеров и свойств со временем. Кроме этого, цинковые сплавы обладают очень низкой коррозионной стойкостью.

Стандарт устанавливает также марки цинка и области их применения: ЦВ00 (содержание цинка – 99,997 %) – для научных целей, получения химических реактивов, изготовления изделий для электротехнической промышленности; ЦВО (цинка – 99,995 %) – для полиграфической и автомобильной промышленности; ЦВ1, ЦВ (цинка – 99,99 %) – для производства отливок под давлением, предназначенных для изготовления деталей особо ответственного назначения, для получения окиси цинка, цинкового порошка и чистых реактивов; ЦОА (цинка 99,98 %), ЦО (цинка 99,975 %) – для изготовления цинковых листов, цинковых сплавов, обрабатываемых давлением, белил, лигатуры, для горячего и гальванического цинкования; Ц1С, Ц1, Ц2С, Ц2, Ц3С, Ц3 – для различных целей.

В промышленности широко применяются цинковые сплавы: латуни, цинковые бронзы, сплавы для покрытия различных стальных изделий, изготовления гальванических элементов, типографские и др. Цинковые сплавы в чушках для литья нормируются стандартом. Эти сплавы используются в автомобиле и приборостроении, а

также в других отраслях промышленности. Стандартом установлены марки сплавов, их химический состав, определены изготавливаемые из них изделия:

- 1) ЦАМ4–10 – особо ответственные детали;
- 2) ЦАМ4–1 – ответственные детали;
- 3) ЦАМ4–1В – неответственные детали;
- 4) ЦА4О – ответственные детали с устойчивыми размерами;
- 5) ЦА4 – неответственные детали с устойчивыми размерами.

Цинковые антифрикционные сплавы, предназначенные для производства монometаллических и биметаллических изделий и полуфабрикатов методами литья. Марки сплавов: ЦЦМ 9-1,5Л; ЦАМ 10-5Л. Первая цифра означает среднее содержание Al, вторая Cu. Содержание Mg 0,03-0,06 %. Механические свойства: прочность в обеих марках не менее 245 МПа; относительное удлинение не менее 1 % для ЦАМ 9-1,5Л и 0,4% для ЦАМ 10-5Л; НВ соответственно не менее 95 и 100. Сплавы марок ЦАМ 9-1,5Л и ЦАМ 10-5 ч, предназначенные для изготовления цинковых антифрикционных сплавов, изготавливают в виде чушек. Содержание примесей в чушках меньше, чем в сплавах.

1.18 Магниевые сплавы

Магниевые сплавы – сплавы на основе магния; разделяются на литейные и деформируемые. Из литейных магниевых сплавов изготавливают литые детали, из деформируемых – прессованные и катаные полуфабрикаты, поковки и штамповки. Литейные и деформируемые магниевые сплавы пригодны для работы при криогенных, нормальных и повышенных температурах, наиболее жаропрочные из них – до 350-400 °С.

Магниевые сплавы являются самым легким конструкционным металлическим материалом. Удельный вес их в зависимости от состава находится в пределах 1,76-2,0 г/см³, примерно в 4 раза меньше стали и в 1,5 раза меньше алюминия и его сплавов. Использование магниевых сплавов позволяет уменьшить вес и значительно повысить жесткость конструкций. Относит, жесткость при изгибе двутавровых балок равного веса и одинаковой ширины для стали равна 1, для алюминия – 8,9, а для магния – 18,9.

Магниевые сплавы отлично обрабатываются режущим инструментом, вдвое быстрее, чем алюминий и в десять раз быстрее, чем углеродистые стали. Однако при работе с магниевыми сплавами необходимо соблюдать правила противопожарной безопасности. Недостаток магниевых сплавов – пониженная коррозионная стойкость по сравнению с алюминиевыми сплавами, а также высокий коэффициент линейного расширения, который на 10-15% выше, чем у алюминиевых сплавов.

Магниевые сплавы легируют алюминием, цинком, марганцем, цирконием, редкоземельными элементами, торием и др. металлами. Большая группа сплавов разработана на основе системы Mg-Al-Zn с добавками марганца. К ней относятся широко применяемые высокопрочные сплавы: литейный сплав МЛ15 ($\sigma_B = 23-26$ кг/мм², $\delta = 5-10$ %); деформируемые сплавы МА2-1 для листов и плит ($\sigma_B = 25-28$ кг/мм², $\delta = 8-16$ %), МА5 для прессованных изделий ($\sigma_B = 28-32$ кг/мм², $\delta = 4-12$ %).

Высокопрочные сплавы на основе системы Mg-Zn-Zr марок МЛ12 и МЛ15 предназначаются для литья ($\sigma_B = 22$ и 21 кг/мм², $\delta = 5$ и 3 % соответственно), а ВМ65-1 – для прессован, полуфабрикатов и штамповок ($\sigma_B = 30-32$ кг/мм², $\delta = 8-12$ %). Отливки из сплавов с цирконием имеют более равномерные механические свойства, чем из сплавов с алюминием, близкие к свойствам отдельно отлитых образцов (сплавы МЛ9, МЛ 10, МЛН, МЛ12, МЛ14, ВМЛ1, ВМЛ2, МЛ 15). Редкоземельные металлы и торий значительно повышают прочность магниевых сплавов при повышенных температурах. Магниевые сплавы литейные с неодимом при комнатной температуре имеют механические свойства на уровне высокопрочных магниевых сплавов. Сплавы с добавками смеси редкоземельных металлов (МЛН – для литья, ВМ17 – для деформируемых полуфабрикатов) и неодима (МЛ9, МЛ10 – для литья и МАИ – для деформируемых полуфабрикатов) пригодны для длительной (100-часовой) работы при температурах до 250° и кратковременной (5 час.) до 350°.

На основе системы Mg-Th разработаны жаропрочные магниевые сплавы – литейные МЛ14, ВМЛ1 и деформируемые МА13 (для листов, прессован, и штампован, полуфабрикатов) и ВМД1 (прессован, изделия, штамповки), которые могут применяться длительно при 300-370° и кратковременно при 400-450°С.

К наиболее вредным примесям, попадающим в магниевые сплавы из шихты и в процессе плавления, относятся никель, железо, кремний и медь, снижающие коррозионную стойкость. В исключительных случаях в присутствии неодима и марганца небольшая добавка никеля (до 0,25%) вводится для повышения жаропрочности (сплав МАИ).

Бериллий и кальций обычно содержатся в магнии в ничтожных количествах ($\text{Be} < 0,0001\%$, $\text{Ca} \sim 0,0015\%$). В качестве легирующих добавок кальций (до 0,5%) вводится в нек-рые сплавы (МЛ 7-1, МА9) для повышения жаропрочности, а бериллий (до 0,05%) в сплавы, идущие на оболочки ядерного топлива с целью повышения сопротивления окисляемости. Их также используют в качестве технологических добавок для снижения окисляемости сплавов в расплавленном состоянии, в этом случае содержание ограничивается. Бериллий укрупняет зерно и может поэтому вызывать снижение механических и технологических свойств при содержании в литейных сплавах более 0,002%, а в деформирован, более 0,02%. В сплавы типа МЛ5 иногда вводится до 0,1% Са для уменьшения микрорыхлоты, т. к. Са повышает растворимость водорода в твердом магнии.

Магниевые сплавы широко применяются в автомобильной, тракторной промышленности, из них изготавливаются картеры двигателей, маслосборники, коробки передач, диски колес и другие детали; в электротехнике и радиотехнике для корпусов приборов, телевизоров, деталей электродвигателей; в оптической промышленности для корпусов биноклей, фотоаппаратов; в текстильной промышленности для изготовления бобин, шпулек, катушек и др.; в полиграфической – для матриц, клише, валиков и др. деталей; в судостроении (для протекторов), в авиационной и ракетной технике и во мн. др. областях народного хозяйства.

ТЕМА 2. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Керамика – это многокомпонентный, гетерогенный материал, получаемый спеканием высокодисперсных минеральных частиц (оксидов, карбидов, нитридов и др.). Керамика обычно представляет собой сложную многофазную систему. В ее со-

ставе различают кристаллическую, стекловидную и газовую фазы (как правило, в виде закрытых пор).

Кристаллическая фаза представляет собой определенные химические соединения или твердые растворы (рис.1.1.). Эта фаза составляет основу керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других ее основных свойств. Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла, связывающих кристаллическую фазу. Обычно керамика содержит 1-10% стекло фазы, которая снижает механическую прочность и ухудшает тепловые показатели. Однако стеклообразующие компоненты облегчают технологию изготовления изделий. Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики; по этой фазе керамику подразделяют на плотную, без открытых пор и пористую. Наличие даже закрытых пор нежелательно, так как снижается механическая прочность материала.

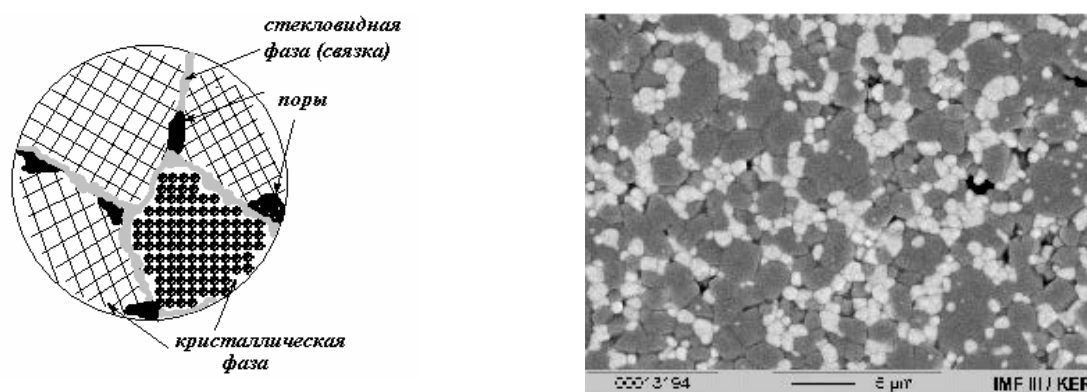


Рис.2.1. Структура керамики.

2.1 Изготовление керамических материалов

Керамическая технология предусматривает следующие основные этапы: получение исходных порошков, консолидацию порошков, т.е. изготовление компактных материалов, их обработку и контроль изделий. При производстве высококачественных керамических материалов с высокой однородностью структуры используют порошки исходных материалов с размером частиц до 1 мкм. Процесс получения столь высокой степени дисперсности требует больших затрат энергии и является одним из основных этапов керамической технологии.

Технологическая схема керамического производства в качестве обязательных включает в себя следующие операции:

- тонкое измельчение и тщательное смешивание исходных компонентов;

- пластификация массы и образование формовочного полуфабриката;
- формование заготовок из пластифицированной массы;
- спекание изделий (высокотемпературный обжиг).

Измельчение производят механическим путем с помощью мелющих тел, а также распылением измельчаемого материала в жидком состоянии, осаждением на холодных поверхностях из парогазовой фазы, виброкавитационным воздействием на частицы, находящиеся в жидкости, с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и другими методами.

Для сверхтонкого помола (частицы менее 1 мкм) наиболее перспективны вибрационные мельницы, или аттриторы. Консолидация керамических материалов состоит из процессов формования и спекания. Различают три основные группы методов формования:

1. Прессование под действием сжимающего давления, при котором происходит уплотнение порошка за счет уменьшения пористости;
2. Пластичное формование выдавливанием прутков и труб через мундштук (экструзия) формовочных масс с пластификаторами, увеличивающими их текучесть;
3. Шликерное литье для изготовления тонкостенных изделий любой сложной формы, в котором для формования используют жидкие суспензии порошков.

При переходе от прессования к пластичному формованию и шликерному литью увеличиваются возможности изготовления изделий сложной формы, однако усложняется процесс сушки изделий и удаления пластификаторов из керамического материала. Поэтому для изготовления изделий сравнительно простой формы предпочтение отдается прессованию, а более сложной - экструзии и шликерному литью.

При спекании отдельные частицы порошков превращаются в монолит и формируются окончательные свойства керамики. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой. При изготовлении керамических материалов применяют печи для спекания при атмосферном давлении, установки горячего изостатического прессования (газостаты), прессы горячего прессования с усилием прессования до 1500 кН. Температура спекания в зависимости от состава может составлять 2000... 2200 °С.

Часто применяют совмещенные методы консолидации, сочетающие формование со спеканием, а в некоторых случаях – синтез образующегося соединения с одновременным формованием и спеканием. Обработка керамических материалов и контроль ее качества являются основными составляющими в балансе стоимости керамических изделий.

По некоторым данным, стоимость исходных материалов и консолидации составляет всего лишь 11 % (для металлов 43 %), в то время как на обработку приходится 38 % (для металлов 43 %), а на контроль 51 % (для металлов 14 %).

К основным методам обработки керамических материалов относят термическую обработку и размерную обработку поверхности. Термическую обработку керамических материалов производят с целью кристаллизации межзеренной стеклофазы. При этом на 20...30 % повышаются твердость и вязкость разрушения материала. Большинство керамических материалов с трудом поддаются механической обработке. Поэтому основным условием керамической технологии является получение при консолидации практически готовых изделий. Для доводки поверхностей керамических изделий применяют абразивную обработку алмазными кругами, электрохимическую, ультразвуковую и лазерную обработки. Эффективно применение защитных покрытий, позволяющих устранить мельчайшие поверхностные дефекты - неровности, риски и т.д.

2.2 Свойства и применение керамических материалов

По дисперсности частиц (поликристаллов) с учетом пористости, газо- и водопроницаемости керамика образует следующую классификацию:

- плотная керамика, со спекшимися поликристаллами (с водопоглощением меньше 5 %), имеющим блестящий раковистый излом и не пропускающим воду; сюда относится: фарфор, плитка, многие виды технической керамики;

- пористая керамика, с большим межзеренным пространством (с водопоглощением больше 5 %), имеющим тусклый землистый излом, и при отсутствии глазури пропускающим газ и воду; сюда относится: фаянсовые изделия, кирпич, керамические блоки, облицовочная плитка и др.

В зависимости от зернистости керамика делятся на:

- тонкую керамику - это фаянс, майолика, фарфор, техническая керамика и др.
- грубую керамику - это кирпич, канализационные трубы и др.

Эти виды керамики также могут быть глазурированные и неглазурированные.

По производственно-отраслевому признаку и областям применения выделяют следующие виды керамики:

- строительная керамика - предназначенная для кладки зданий, сооружений; которая в свою очередь делится на: стеновую (кирпич, блоки, керамические камни); облицовочную - плитка для наружной и внутренней облицовке стен и полов; санитарно-техническую (раковины, унитазы, канализационные трубы);

- огнеупорные материалы, огнеупоры ($t=1580\text{ }^{\circ}\text{C}$) - изделия, применяемые для кладки промышленных печей, топок, аппаратов, работающих при высоких температурах, в том числе фарфоровой и фаянсовой посуды;

- химически стойкая керамика - предназначенная для применения в агрессивных средах, стойкая к кислотам, щелочам, расплавам;

- тонкая керамика - хозяйственная и лабораторная фарфоровая и фаянсовая посуда, художественная, декоративная и другие разновидности изделий;

- техническая и специальная керамика - применяемая в энергетике, авиационной, ракетно-космической, атомной и электронно-вычислительной технике, радиоэлектронике и автомобилестроение;

По практическому предназначению техническая керамика делится на:

- конструкционную; сюда относят материалы для самолето-, ракетостроения, для двигателей внутреннего сгорания и др. целей;

- функциональную - это сверхпроводящая керамика; полупроводниковая, лазерная, керамическое ядерное горючее (U_2O_3) и др.

В современном машиностроении применение керамических материалов постоянно увеличивается. Они многообразны по химическому составу и физико-механическим характеристикам. Керамические материалы могут работать при высоких температурах: 1600...2500 °C (жаропрочные стали - 800...1200 °C, молибден - 1500 °C, вольфрам - 1800 °C), они имеют плотность, в 2...3 раза меньшую, чем у жаропрочных материалов, твердость, близкую к твердости алмаза, отличные диэлек-

трические характеристики, высокую химическую стойкость. Запасы исходных материалов для производства керамики на земле неисчерпаемы. Из керамических материалов изготавливают детали газотурбинных и дизельных двигателей, тепловыделяющие элементы ядерных реакторов, легкую броню и элементы теплозащиты космических кораблей, тонкостенные поплавки и контейнеры для глубоководной техники, режущие пластины и оснастку для горячего деформирования металлов, плунжеры и уплотнительные кольца в насосах для перекачки агрессивных сред, элементы особо точных гироскопов и платы ЭВМ, подшипники, постоянные магниты и т.д.

Применение керамических материалов в автомобильных двигателях позволит поднять рабочую температуру в цилиндрах с 1200 до 1600 °С, при этом сократить потери теплоты, снизить расход топлива, улучшить эксплуатационные характеристики. При изготовлении изделий из керамических материалов нельзя просто заменять металлические детали на керамические. Особо должны учитываться условия их работы и действующие нагрузки, поскольку все детали выполняются целиком, и это может снизить прочность всей конструкции. Кроме того, она не имеет пластической деформации и обладает низкой ударной вязкостью. Сформулированы основные требования, которые следует учитывать при проектировании керамических деталей. В нагруженных зонах керамическая деталь не должна иметь концентраторов напряжений. Практически не используют в керамических конструкциях болтовые соединения, в них стараются не сверлить отверстия, делать уступы, проточки, чтобы избежать микротрещин. В местах контакта керамики с металлом устанавливают демпфирующие прокладки.

Керамика имеет теплоемкость в 2 раза большую, чем металл, что вызывает тепловые деформации и напряжения. Крайне желательно, чтобы температура керамической детали по всему объему была бы одинаковой. Наиболее благоприятно воспринимаются напряжения сжатия. При отсутствии нагрузки в керамических деталях не должны сохраняться остаточные напряжения его полимеризации. В настоящее время используют керамические материалы на основе нитрида кремния - реакционно-связанный, спеченный и горячепрессованный нитриды кремния с легирующими добавками. Реакционно-связанный нитрид кремния имеет относительно низкую по

сравнению с другими материалами прочность, но изготовленные из него детали сложного профиля дают стабильно малую усадку.

Горячепрессованный нитрид кремния обладает максимальной прочностью. Свойства керамических материалов существенно зависят от рабочих параметров и технологии их изготовления. Разработаны составы керамик, которые по своим эксплуатационным характеристикам могут заменять жаропрочные стали, но разработки в области составов и технологии их получения продолжаются. Принципиальными недостатками керамических материалов являются их хрупкость и сложность обработки. Керамические материалы плохо работают в условиях механических или термических ударов, а также при циклических условиях нагружения. Им свойственна высокая чувствительность к надрезам. В то же время керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, превосходной коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, что позволяет с успехом использовать их в качестве элементов тепловой защиты.

При температурах выше 1000 °С, керамические материалы прочнее любых сплавов, в том числе и суперсплавов, а их сопротивление ползучести и жаропрочность выше. К основным областям применения керамических материалов относятся режущий инструмент, детали двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей и др.

Керамические материалы специального назначения. К керамическим материалам специального назначения относят сверхпроводящую керамику, керамику для изготовления контейнеров с радиоактивными отходами, броневой защиты военной техники и тепловой защиты головных частей ракет и космических кораблей.

Ударопрочные броневые керамические материалы. Впервые эти материалы были использованы в авиации армии США во время войны во Вьетнаме. С тех пор непрерывно растет применение армиями разных стран брони из керамических материалов в комбинации с другими материалами для защиты сухопутных боевых машин, кораблей, самолетов и вертолетов. Одновременно наблюдается рост производства композиционной брони для индивидуальной защиты сил охраны правопорядка, обусловленный ростом преступности и актов терроризма.

По своей природе керамические материалы хрупкие. Однако, при высокой скорости нагружения, например, в случае взрывного удара, когда эта скорость превышает скорость движения дислокаций в металле, пластические свойства металлов не будут играть никакой роли и металл будет таким же хрупким, как и керамика. В этом конкретном случае керамические материалы существенно прочнее металла.

Важными свойствами керамических материалов, обусловившими их применение в качестве брони, являются высокие твердость, модуль упругости, температура плавления (разложения) при плотности, меньшей плотности материалов в 2...3 раза. Сохранение прочности при нагреве позволяет использовать керамические материалы для бронепрожигающих снарядов.

Радиопрозрачные керамические материалы. Для развития современной радио-, электронной и вычислительной техники необходимы материалы на основе оксида алюминия, нитридов бора, кремния, имеющие рабочую температуру до 3000 °С, обладающие стабильными значениями диэлектрической проницаемости и малыми диэлектрическими потерями с тангенсом угла диэлектрических потерь.

К таким материалам относят чистый оксид алюминия, горячепрессованный нитрид бора, керамические материалы ТСМ 303 и АРП-3, спеченный нитрид бора, ситалл Д-2, кварцевые керамические материалы, чистый нитрид кремния и др.

ТЕМА 3. ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Метод порошковой металлургии в последние годы прочно вошел во все сферы техники. С его помощью производят различные материалы, имеющие уникальные функциональные характеристики. Сегодня из них изготавливаются конструкционные элементы машин и механизмов, металлорежущий и породоразрушающий инструмент, подшипники и прочие компоненты узлов трения, детали электротехнического оборудования и оснащения атомных реакторов, магниты, охладители испарительного типа, множество других незаменимых изделий промышленного назначения. Повсеместное распространение получил в последнее время также способ нанесения на металлические поверхности защитных покрытий путем напыления и наплавления.

Технологическими достижениями в сфере ПМ обусловлено создание порошковой продукции исключительных функциональных качеств, при наиболее выгодных экономических характеристиках, способствующих ресурсо- и энергосбережению. В последние годы ПМ развивается особенно бурно в плане разработки как инновационных технологий, так и новейших порошковых материалов.

Современные порошковые материалы по видам применения условно подразделяют на следующие функциональные категории:

- конструкционные (включая группы металлов и их сплавов, металлокерамических твердых сплавов и минералокерамики);
- пористые (включая группы фильтрующих, триботехнических, «потеющих» и пеноматериалов);
- электротехнического назначения;
- специальные материалы для ядерной энергетики и др.

Все они по-своему востребованы, а потому нуждаются в более подробном рассмотрении.

3.1 Конструкционные порошковые материалы

Конструкционными называют материалы металлического, неметаллического и композиционного генеза, сочетающие в себе комплекс свойств, обеспечивающих возможность применения в машиностроительных отраслях для производства наиболее ответственных узлов и агрегатов.

Порошковые материалы конструкционного назначения – самая распространенная продукция ПМ. Потребность в них сегодня достигает 65% общей востребованности. Обладая набором высоких механических характеристик, они повсеместно используются в машиностроении для производства высоконагруженных шестерен, звездочек, зубчатых колес, червячных пар, клапанов и седел к ним, муфт, фланцев, эксцентриков, накладок, заглушек, храповиков, гаек, ограничителей, кулачков, шайб, крышек, корпусов подшипников, компонентов насосного оборудования и измерительного инструмента, различных дисков, втулок, деталей множества других элементов технических устройств.

Основным требованием, предъявляемым к материалам данной категории, является сочетание повышенных физикомеханических свойств и экономичности. Изделия из конструкционных материалов подразделяются на малонагруженные, средненагруженные и высоконагруженные, а по типу материала – продукцию на основе черных (стали/чугуны), цветных (сплавы Al, Mg, Ti, Cu и др.) и тугоплавких металлов (W, Mo, Nb, Ta и др.), а также полученную из твердых сплавов металлокерамического генеза, безметаллической порошковой керамики и композитных армированных материалов.

Правильность выбора конструкционных материалов прямо зависит от того, насколько верно учтены особенности их применения в технологическом и эксплуатационном аспектах, последний из которых обусловлен наличием подходящего химсостава и необходимых физико-механических свойств.

К физико-механическим свойствам, зависящим от внутренней структуры и химсостава материала, относят значения: прочности; плотности; твердости; тепло-электропроводности; теплоемкости; T° плавления; пластичности/вязкости/упругости; хрупкости.

К технологическим свойствам, определяющим степень способности материала поддаваться термомеханической обработке, относят значения: деформируемости (ковкости); свариваемости; обрабатываемости резанием и давлением; обрабатываемости термическими способами; обрабатываемости методами литья.

К эксплуатационным (служебным) свойствам, востребованным в тех или иных рабочих условиях, относят значения: сопротивляемости износу; устойчивости к воздействию коррозии; устойчивости к температурным факторам (хладостойкость, жаростойкость, жаропрочность и т.п.).

3.2. Конструкционные металлические материалы

По признаку технологического исполнения материалы данной группы подразделяются на подгруппы деформируемых, литейных и спеченных, что отображается в их маркировке.

Стали – это поликомпонентные железуглеродистые сплавы с концентрацией С до 2,15 %. Стали могут быть углеродистыми (высокоуглеродистыми при концен-

трации $C \leq 0,31\%$, среднеуглеродистыми при $C \leq 0,61\%$, высокоуглеродистыми при $C > 0,61\%$,) или легированными (низколегированными с суммарной концентрацией легирующих компонентов $\leq 2,51\%$, среднелегированными, соответственно, $2,51 \dots 10,01\%$, высоколегированными, соответственно, $> 10,01\%$).

Чугуны – это поликомпонентные железоуглеродистые сплавы с концентрацией $C > 2,15\%$, при затвердении образующие эвтектику. Чугуны принято классифицировать по степени их графитирования. В рамках данной классификации различают классы белых чугунов, графитированных чугунов (серых – СЧ, высокопрочных – ВЧ, ковких – КЧ), а также т. наз. половинчатых чугунов с отбеленной поверхностной и внутренней серочугунной структурой. В ГОСТ 28378-89 приводятся данные о наиболее востребованных марках чернометаллических конструкционных порошковых материалов и сфере их практического использования.

К разряду **конструкционных сплавов цветных металлов** относят (сообразно наименованию основного компонента) группы алюминиевых, магниевых, медных, титановых и некоторых других сплавов. В свою очередь, их подразделяют на легкометаллические и тяжелометаллические сплавы, удельный вес которых составляет, соответственно, ≤ 4505 кг/м³ и > 4505 кг/м³. К классу легких причисляют сплавы на базисе Al, Mg, Ti, к классу тяжелых – на основе Cu, Cu-Ni, Cu-Zn (латуни), Cu-Sn (оловянистые бронзы), Sn-Pb (баббиты) а также благородных Au, Pt и Ag.

Тугоплавкие металлы — класс химэлементов (металлов), характеризующихся очень высокой T° плавления и износоустойчивостью. К классу тугоплавких причисляют элементы 5 периода Периодической таблицы – Nb и Mo; а также элементы 6 периода – Ta, W и Re. T° плавления каждого из них превышает 2010°C при относительной химической инертности и высоких плотностных параметрах, что служит важнейшим показанием к промышленному применению во многих производственных отраслях.

3.3 Эрозионно-стойкие металлические материалы

Данная группа металлических материалов обладает набором свойств, получение которых в сплавах не представляется возможным. Их производят на базисе чистых тугоплавких металлов или С в форме композиций, в частности, пропитывая

каркас из W или C расплавами Cu/Ag. Компоненты механизмов из устойчивых к эрозии материалов могут функционировать в режиме температур, превышающих 2600 0С. В процессе работы Cu (Ag) подвергаются испарению, благодаря чему снижается интенсивность теплопотока, влекущая за собой улучшение условий эксплуатации вольфрамовой или углеродной каркасной матрицы.

По мере увеличения связующих межзеренных сил возрастают расходы на изготовление конечной продукции, зато снижается степень вероятности воздействий на материал негативных факторов со стороны наружной среды и минимизируются затраты на защитные мероприятия. Порошки, выступающие в роли исходных компонентов для ПМ, в этом плане находятся как бы на промежуточной ступени между фазами жидкости и твердого тела, обладая, в общем объеме зерен, свойством текучести, а в составе каждого из отдельных зерен – способностью к деформированию.

Вот почему группа эрозиостойких материалов сочетает в себе широкий набор полезных качеств, стабилизирующих их рабочие характеристики в экстремальных эксплуатационных режимах. Наглядное тому подтверждение – турбины, где едва ли не самым нагруженным компонентом является выполняемый из эрозиостойкого материала вкладыш сопла, бесперебойно функционирующий в диапазоне поверхностных рабочих температур 3550-3650°С.

К категории конструкционных порошковых материалов относятся и керамические (спеченные), подразделяемые, в свою очередь, на металлокерамику и минералокерамику.

3.4 Конструкционные металлокерамические материалы

К данной группе конструкционных материалов относятся отличающиеся сложной структурой металлокерамические твердые сплавы (керметы), содержащие в своем составе более 50% (по объему) твердозернистой фазы (карбиды, бориды, оксиды, нитриды различных металлов), а также используемое в качестве матрицы для удержания зерен пластичное связующее в виде чистых металлов (никель, кобальт, тугоплавкие металлы). Керметы применяют для производства активных компонентов металлорежущего, штамповочного, бурового инструмента. Физикомеханические

и другие эксплуатационные свойства керметных ТС подробно описаны в предыдущей главе данного раздела.

Металлокерамические твердые сплавы – один из наиболее распространенных классов конструкционных порошковых материалов, в ходе получения которых потенциал ПМ реализуется во всей его широте, поскольку речь идет о создании методом безотходной технологии сложноструктурных соединений компонентов с резко различающимися значениями T° плавления и уникальным набором физикомеханических свойств. Твердые сплавы находят применение в инструментальном производстве, кузнечно-прессо-штамповочном и буровом оборудовании. Показатели плотности керметов (керамики с матричным металлическим связующим) достигают $3,97 \text{ г/см}^3$, а твердости (HRA) – 93 ед.

Твёрдые сплавы совершенно незаменимы при изготовлении металлорежущего и контрольно-измерительного инструментария, функциональных вставок волоочильных фильер, прессоштамповочных матриц и пуансонов. В сфере легкого, среднего и тяжелого машиностроения широко используются детали с твердосплавным армированием. Так, в текстильной отрасли применяют твёрдосплавные направляющие кольца и прочие трущиеся компоненты; в сфере ПМ из твёрдых сплавов изготавливают размольные шары для шаровых мельниц и детали для оснащения литейных прессов.

3.5 Высокотемпературные конструкционные материалы

К разряду высокотемпературной порошковой металлокерамики, получаемой в большинстве случаев только методами ПМ, принадлежат сплавы на базе жаростойких металлов (W, Mo, Nb, Ta, Zr, Re, Ti).

Производство изделий из жаропрочных конструкционных материалов во многом определяют темпы дальнейшего расширения круга эксплуатационных возможностей современных систем и агрегатов для космической, авиационной, судостроительной, электротехнической, радиоэлектронной, химической и станкостроительной индустрии. Что не представляется возможным без обеспечения специальных функциональных свойств, среди которых одним из важнейших является именно термостойкость.

3.6 Конструкционные минералокерамические материалы

Повышение твёрдостных параметров подвергаемых обработке заготовок вызвало необходимость расширить диапазон применяемых режущих материалов от твёрдосплавных до минералокерамических и прочих сверхтвёрдых соединений, получаемых посредством ПМ.

Минералокерамические материалы – группа неорганических безметаллических соединений, отличающихся весомыми преимуществами в сравнении с группами металлов и керметов. Их характеризуют оптимальные соотношения параметров прочность/плотность и жесткость/упругость, а также устойчивость к коррозии наряду с непревзойденными прочностными показателями при эксплуатации в высокотемпературном режиме.

Минералокерамику, структурно включающую в свой состав кристаллиты, соединенные стекловидным аморфным связующим, получают преимущественно на базисе порошковых оксидов и высокотвердых безоксидных карбидных, боридных, нитридных и силицидных тугоплавких композиций, а также подобных соединений Al, Ti, Zr и ряда других металлов. Минералокерамические материалы являются высокопрочностными, термостойкими, износоустойчивыми. Минералокерамика имеет плотность в диапазоне 4,2 ... 4,6 г/см³ и твёрдость (HRA) в пределах 92 ... 94 ед.

Минералокерамические материалы по маркам условно подразделяют на 3 группы:

1. Оксидную, состоящую из оксидов Al, Ti (99,2%) с незначительными примесями оксида Mg и прочих химэлементов. К данной группе причисляют марки ВО-13, ЦМ-332 и ВШ-75.
2. Оксидно-карбидную из оксида Al (61...80%), а также карбидов и оксидов тугоплавких металлов. К ней причисляют марки В0-3 и ВОК-60 (ГОСТ 25003-81).
3. Нитридную из нитридов Si (до 97,1%) и тугоплавких минералов с добавками оксида Al и ряда других включений. К ней относят кортинит ОНТ-20 и силинит-Р.

Свойства минералокерамических материалов регламентируются по ГОСТ Р 50151-92.

Минералокерамику чаще всего применяют с целью изготовления рабочих компонентов режущего инструментария, которым производят получистовую и чистовую обработку (в режиме безударных нагрузок и скоростей обработки до 8100 мм/мин на неинтенсивных подачах) сталей углеродистой и легированной групп (включая закалённые и улучшенные), а также чугунов, цветометаллических и тугоплавких сплавов.

Металлокерамику для режущего инструментария выполняют в форме сменных пластинок, конфигурационно сходных с твердосплавными аналогами. Такие пластинки отличают высокие значения термостойкости (1210...1410 °С), твердостных показателей (30010...33010 МПа), износоустойчивости и стойкости к воздействию агрессивных химических сред, что обуславливает возможность высокоскоростной обработки.

В сравнении с твердосплавными, минералокерамические пластины обеспечивают возможность обработки чернометаллических заготовок во вдвое более интенсивном скоростном режиме. К тому же, поскольку минералокерамика почти не сродственна металлам, при их обработке инструментами из данных материалов практически исключен риск слипания с обрабатываемыми поверхностями.

К группе минералокерамики по свойствам причисляют также корунды. Корунды незаменимы при изготовлении износоустойчивых насадок к породоразрушающим долотам гидромониторного типа, насосных горловин, нитеводных устройств ткацкого оборудования. Применяют корунды и в электротехнической отрасли при изготовлении компонентов гироскопных подшипников. Весьма результативным оказывается использование корундов для изготовления рабочих кромок грунтопланировочных машин.

3.7 Композитные дисперсноупрочненные и металловолоконные материалы

Поликомпонентные конструкционные материалы, структурно являющиеся композициями с пластичноматричной основой, армированной металловолоконными либо мелкодисперсными наполнителями, так и именуют композитами.

Объединение в одно структурное целое химэлементов с различными наборами свойств обуславливает получение инновационного материала, обладающего набором эксплуатационных характеристик, в количественном и качественном отношении в разы превышающих аналогичные параметры каждого из отдельных компонентов. Большинство композитов по своим физикомеханическим свойствам выгодно отличаются от традиционных конструкционных материалов, являясь при этом, что немаловажно, намного более легкими. Применение композитоматериалов позволило минимизировать вес и габариты конструкций при сопоставимых либо даже лучших функциональных параметрах.

Исходным материалом металломатрицы обычно служат Al, Mg, Ni и их сплавы, в качестве армирующего компонента используются материалы в виде волокон либо порошков из мелкозернистых (тонкодисперсных) термостойких частиц, не подверженных растворению в металле матрицы (дисперсноармированные материалы). Металломатрица увязывает армоволокна (дисперсные зерна) в единый прочный монолит.

Подобные композиты можно получить путем пропитывания волоконных пучков металлическими расплавами, или миксации и последующего спекания материала металлоосновы с мелкозернистым порошковым наполнителем.

Дисперсноармированные металлокомпозиты по функциональному признаку являются изотропными, обладая набором свойств, одинаково распространяемых по всем направлениям. Добавки 6-12% армирующих наполнителей (тугоплавких оксидных, нитридных, боридных, карбидных порошков) позволяют существенно повысить сопротивляемость матричного каркаса разноплановым нагрузочным воздействиям, увеличить степень термостойкости композитного соединения в сравнении с исходной матрицей. Дисперсноупрочненные композитные материалы с металломатрицей изготавливают путем ввода порошка наполнителя в металлический расплав или методами ПМ.

Композиты с волоконным армонаполнителем по принципу упрочнения подразделяют на прерывистые, с примерно равным соотношением длины и диаметра волоконных нитей, и недискретные, с волокном непрерывной структуры. При этом

\emptyset волоконных нитей может варьироваться в широких пределах (от десятых долей до нескольких сот мкм.). Чем большим значением выражается соотношение длины волоконных нитей к их \emptyset , тем выше будет прочность композита.

Композиты, в отличие от всех иных конструкционных материалов, имеют повышенные на 55-95 % показатели предельной сопротивляемости/упругости/жесткости и пониженную склонность к растрескиванию. Использование композитов позволяет увеличить конструкционную жесткость и минимизировать металлоемкость производимой из них конечной продукции.

Набор полезных качеств композитоволоконных материалов определяется свойствами волокна; основная же функция матрицы заключается в перераспределении напрягающих сил между нитями. Вот почему показатели прочности/упругости волокон должны существенно превышать аналогичные параметры матричного каркаса. Жесткие армоволокна, демпфируя возникающие в композиции нагрузочные напряжения, усиливают прочностные свойства нитей, распределяя их соответственно направлению, в котором нити ориентированы.

Для армирования матриц на базисе Al и Mg применяют карбидо-нитридо-, боридо- и оксидоволокна, имеющие высокие значения коэффициента прочности и модуля упругости. Довольно часто в качестве армоволокна используется тонкая стальная проволока.

Армирование титаноматричных композитов выполняется с применением проволоки из Mo, а также сапфировых, кремнеборидных и титанокарбидных волокон.

Повысить значение термостойкости никелевоматричных композитов удастся путем армирования проволокой из W или Mo. Металловолоконные композиты являются востребованными и тогда, когда необходимо добиться высоких значений тепло-электропроводности.

Композиты на металлооснове при высоких значениях механической и жаропрочности, одновременно являются малопластичными, что способствует минимизации разрушений трещинного и хрупкостного генеза.

Композитные дисперсно- и волоконноармированные конструкционные материалы широко применяют в ракето-, авиа-, судостроении, многих других машиностроительных отраслях.

3.8 Пористые порошковые материалы

Характерная особенность данной категории порошковых материалов состоит в наличии в них большого количества пор, равномерно распределенных по всему объему, что дает возможность обеспечения необходимых функциональных характеристик.

По основным свойствам пористые материалы можно подразделить на подкатегории: фильтрующих; капиллярных.

Пористые материалы отличаются разнообразием физикохимического состава исходного сырья и применяемых производственных технологий, по которым они изготавливаются. Этим обусловлен широкий диапазон значений степени пористости, который может варьироваться в пределах от 2-3 % до 95-98 %. Степень пористости существенно влияет на проявление структурных, физических, технологических и эксплуатационных свойств конечной продукции из данных материалов. На комплекс функциональных характеристик, которым обладают те или иные пористые изделия, помимо этого, воздействуют факторы формы, состояния поверхности и распределения зерен исходных порошков во всем объеме по размерным параметрам.

К категории пористых относят классы фильтрующих, «потеющих», пенных и триботехнических порошковых материалов.

3.8.1. Фильтрующие пористые материалы

Пористые фильтры (степень пористости 45-55%), применяемые для механической очистки различных жидкостей и газов от частиц посторонних включений, составляют значительную долю продукции, выпускаемой из пористых порошковых материалов. Они изготавливаются методом формовки (формопрессование с различными усилиями или свободная засыпка в формы) с последующим спеканием бронзового, никелевого, титанового, вольфрамового, молибденового порошка, а также порошков нержавеющей стали и тугоплавких композиций. Рабочий температурный диапазон составляет от -270 до $+1000$ °С. Методами ПМ в числе прочих изготавли-

вают фильтрующие элементы, степень пористости которых, а значит, и очищающую способность, можно изменять и даже регулировать в зависимости от круга конкретных задач.

Определяющими критериями качества пористых фильтроматериалов являются: характер пористости; степень проницаемости; тонкость очистки; грязеёмкость; капиллярность.

Характер пористости. Различают пористость наружную (откр. поры) и внутреннюю (закр. поры). При этом в наружной пористости проявляется сочетание пор сквозного и несквозного (тупикового) характера. Степенью сквозной пористости определяется интенсивность пропускаемого потока очищаемой среды – критерий, именуемый скоростью очистки.

Степенью проницаемости называют показатель, определяющий пропускную способность фильтрующего элемента и выражаемый количественным значением интенсивности фильтруемого потока, проходящего за единицу времени через единицу рабочей площади при стабильной силе давления. Степень проницаемости увеличивается по мере возрастания степени пористости и количества сквозных наружных пор в сравнении с количеством тупиковых.

Тонкость очистки (фильтрации) – показатель, количественно характеризующий качество процесса очистки фильтруемой среды от посторонних включений (загрязнений). Общая очищающая способность фильтра определяется соотношением значений абсолютной и номинальной тонкости фильтрации, а также коэффициентом полноты очистки.

Абсолютной тонкостью фильтрации называют значение показателя наибольшего размера пропускаемых сквозь фильтр загрязняющих частиц, а номинальной тонкостью – их наименьшего размера. Коэффициентом полноты очистки характеризует количественное значение уменьшения массы загрязнений в фильтруемой среде при её единоразовом пропускании сквозь фильтрующий элемент.

Грязеёмкость – количественный показатель массы загрязняющих включений, которую способна задержать единица площади фильтра во временном интервале увеличения силы давления от начальной до предельной.

Критерий капиллярности характеризует в количественном выражении особенности процесса взаимодействия пористого фильтрующего элемента с очищаемыми средами. Величина потенциала капиллярности (для жидкостей) определяется произведением наибольшей высоты, на которую способна подняться жидкость в данном пористом теле, на величину ускорения свободного падения.

Спекаемые фильтрующие элементы производят из металлопорошков однородной дисперсии и требуемого химсостава. Зерна при этом могут по своей форме быть сферичными и несферичными. Важнейшим достоинством фильтрующих элементов из несферичных порошков является повышенная механическая прочность, достигаемая благодаря более плотному взаимодействию зерен произвольной конфигурации, чем у сферичных порошков, округлые зерна которых могут вступать лишь в точечный контакт. Тем не менее, спеченные пористые фильтры чаще всего изготавливают из сферичных порошков, поскольку такие изделия характеризуются гораздо большей степенью проницаемости, поддаваясь, к тому же, регулированию и восстановлению.

Порошковые фильтры имеют целый ряд преимуществ перед непорошковыми аналогами, среди которых основными являются:

- несложное изготовление;
- повышенная прочность;
- лучшие очищающие свойства;
- высокие значения жаростойкости, теплопроводности, сопротивления абразивному износу;
- равномерное распределение фильтрации по всей площади фильтрующего элемента.

По форме фильтрующие элементы из спеченных порошковых материалов могут являть собой диски, пластинки, цилиндры, втулки, конусы и фасонные изделия более сложной конфигурации. Для изготовления бронзовых фильтров применяют, по преимуществу, порошки со сферичными зёрнами, получаемые распылением расплава. T° спекания заготовок может быть в пределах 855-955 °С при длительности процесса 35... 65 мин. Из бронзовых порошков крупной дисперсии (\varnothing зерен 55-135

мкм) производят фильтры, с помощью которых осуществляют грубую очистку; из мелкодисперсных порошков (\varnothing зерен 1,8-30,5 мкм) – фильтры, способные осуществлять тонкую очистку.

Использование бронзовых фильтров распространено во множестве промышленных отраслей. С их помощью очищают от посторонних частиц размерами 4,5 – 210 мкм горюче-смазочные материалы для ДВС и двигателей на реактивной тяге, различные газы и кислотощелочные среды, парафиновые расплавы и т.д.

Никелевые пористые фильтры производят (путем формовки-спекания в температурном режиме 1050 – 1150 °С) из порошков, имеющих электролитическое либо карбонильное происхождение. Помимо фильтрующих элементов, из них изготавливают также группу пористых электродов для никель-кадмиевых и щелочных аккумуляторов.

Широко востребованными являются порошковые фильтры из нержавеющей стали, которые, в сравнении с никелевыми, более устойчивы к коррозии, имея, к тому же, меньшую стоимость. Первичные заготовки производят формопрессованием или прокатыванием, после чего спекают в продолжение 2,5-3,5 час. при 1210-1255 °С. Для производства таких фильтров используются порошки сталей марок X17H2, X18H9, X30 и некоторых других.

Фильтры данного типа применяются в металлургии: с их помощью очищают от механических примесей жидкое литье и горячие доменные/мартеновские газы. Нередко их используют в качестве противопожарной преграды на участках автогенной сварки и обработки металлов газопламенным методом, а также в емкостях для легковоспламеняющихся и взрывоопасных жидкостей.

Титановые пористые фильтры изготавливают из порошков карбонильного генеза, \varnothing зерен которых не превышает 61 мкм. (с применением наполнителя), а в некоторых случаях – из электролизного порошка с \varnothing зерен до 1,2 мм (наполнитель не применяют). Спекание осуществляют в специальных газовых средах при 955 – 1155 °С в продолжение 1,6-2,6 час. Востребованность пористотитановых фильтров объясняется наличием таких полезных функциональных качеств, как высокая стойкость в воздействию коррозии при фильтровании агрессивных жидкостей и газов в соче-

тании с высокой удельной прочностью. Значение тонкости фильтрации для фильтров из пористого Ti может составлять $\leq 5,2$ мкм.

Технология производства спеченных пористых фильтров в каждом случае является избирательной. В зависимости от особенностей условий фильтрации учитывают необходимые значения тонкости очистки, степени проницаемости, пропускной способности, прочности и размерных параметров.

Фильтры, размеры которых невелики, производят, спекая свободно засыпанный в формы исходный порошок. Формы подвергают постоянной вибрации, чтобы спекаемое содержимое равномерно распределялось по всему их объему. При этом сферичность и размеры частиц сохраняются, что обуславливает наивысшую степень проницаемости материала.

Традиционным методом производства спеченных пористых фильтров является деформирование порошка прессованием. Для изготовления фильтров высокой степени пористости (55-76 %) и повышенных прочностных характеристик в состав подвергаемой прессованию порошковой шихты вводится ряд специальных добавок, обеспечивающих усиление прочности без ущерба для пористости.

Сегодня пористые фильтрующие элементы применяются повсеместно. Их используют на всех промышленных предприятиях с целью недопущения вредных выбросов в атмосферу, для очищения природных и сточных вод, на АЭС и теплоэлектростанциях. Коррозиестойчивые фильтры применяют для очистки кислото-щелочных растворов, питьевой воды и т.д.

3.8.2 «Потеющие» пористые материалы

К «потеющим» причисляют пористые материалы, сквозь поры которых к функциональной внешней поверхности изделия принудительно (под определенным давлением) подаются рабочие жидкости или газы. За счет эффекта испарения поверхность охлаждается.

Возможности применения «потеющих» материалов с целью регулировать температуру поверхностей чрезвычайно широки. Продукция из них может использоваться при создании условий как для недопущения перегрева, (в частности, турбинных лопаток), так и для разрешения проблем обратного характера, когда, напри-

мер, крылья самолета или лопасти подъемного вертолетного винта покрываются слоем «потеющего» медноникелевого материала, сквозь поры которого просачиваются мельчайшие капельки антифриза, равномерно растекающегося по всей площади поверхности и сводящего на нет эффект обледенения. При этом расход антифриза снижается чуть ли не в половину.

Поверхностное испарительное охлаждение с применением «потеющих» материалов – едва ли не самый эффективный способ снижения температуры нуждающихся в этом технических устройств, элементов строительных конструкций, других объектов хозяйственного назначения. Научно доказан и экспериментально подтвержден тот факт, что охлаждение испарением более продуктивно, нежели осуществляемое в равноценных системах по конвекционному или пленочному принципу. Так, использование паровых турбин с лопатками, охлаждаемыми посредством «потеющих» материалов, обеспечило возможность повышения температуры рабочего пара с 845 до 1250 °С и увеличения полезной мощности на 15-20 %.

Степень проницаемости материалов из «потеющей» металлокерамики прямо пропорциональна степени их пористости и силе давления, под которым подается хладагент. Изготавливаются они на базе порошков Cu, Ni, нихромов и нерж. сталей с порами, Ø которых может достигать 9,5...12,5 мкм при степени пористости до 35%. Конечная продукция из них (листы, полосы, ленты, конусы, втулки и т.д.) производится путем прессоформования либо прокатки и последующего спекания получаемых заготовок.

3.8.3. Тепловые трубы из пористых материалов

Наряду с «потеющими» широкую популярность в промышленной сфере обрели пористые порошковые материалы, именуемые капиллярно-пористыми. В них рабочая жидкость также транспортируется к наружной поверхности сквозь поровые каналы, но уже не принудительно, а под воздействием естественных капиллярных сил, поскольку диаметр капиллярных пор в разы меньший в сравнении с диаметром пор «потеющих» материалов. С появлением материалов капиллярно-пористой структуры появилась возможность создания изделий, проницаемых для одних жидкостных сред и непроницаемых для прочих, с осуществлением в капиллярах пор фа-

зовых преобразований, сопровождаемых теплопоглощением либо, напротив, тепловыделением. Наличие данных свойств обусловило применение капиллярно-пористых материалов в самых разных технических отраслях, например, в конструктивных элементах теплообменной аппаратуры.

Одним из самых перспективных направлений в этом аспекте стало создание так называемых тепловых труб, способных стабилизировать термополе в установках различного назначения и обеспечить наличие оптимальных изотермичных условий для обработки различных заготовок.

Так, применение низкотемпературных теплотруб, используемых в электротехнике для того, чтобы охлаждать роторы/статоры электродвигателей и электрогенераторов, а также обмотку трансформаторных сердечников, обеспечило повышение их мощностных показателей почти в полтора раза. Все чаще применяются теплотрубы с целью охлаждения тяжелых высоковольтных автоматов замыкания-размыкания цепи. Теплотрубы, наряду с паровыми камерами, имеют существенные достоинства перед традиционными теплопередающими элементами в виде, например, теплообменников циркуляционного типа: в них отсутствуют подвижные детали, в работе они не создают шума и не нуждаются в расходе электроэнергии на перекачивание теплоносителя из конденсационной в испарительную зону, имеют небольшую массу и отличаются незначительным термосопротивлением в сравнении с металлостержнями сопоставимых габаритных параметров.

3.8.4. Высокопористые пеноматериалы

Пеноматериалы – материалы высокой степени пористости (95,5-98,5 %), обуславливающей малые значения их плотности. К примеру, плотность пеновольфрама вшестеро меньше, нежели плотность вольфрама (соответственно, 3,1 г/см³ и (19,32 г/см³). Такие материалы имеют пенопластовую основу (на базе поливинилхлоридов, полистиролов и т.п.) армированную прочным металловолокном. Используют их, главным образом, как легкие теплоизолирующие наполнители в авиастроительной и судостроительной отраслях.

3.8.5. Триботехнические пористые материалы

Триботехническими (от греч. «трибос» – «трение») называют пористые материалы, используемые для изготовления пар трения. Группа триботехнических материалов, в свою очередь, подразделяется на подгруппы антифрикционных материалов, обеспечивающих наименьшее сопротивление при взаимодействии трущихся поверхностей, и фрикционных материалов, которые, напротив, применяются с целью сделать силу трения максимальной.

Проблема трения и сопутствующего ему изнашивания находится в центре внимания инженеров-материаловедов не только в силу многообразия проявлений данного явления, но и его непреходящего практического значения во всех производственных сферах.

Триботехнические характеристики материалов

Изнашивание – процесс, заключающийся в отделении частиц материала с поверхности изделия, из которого оно изготовлено, а также накопление деформационных последствий, постепенно приводящее к изменению форморазмеров.

Износ – результат изнашивания, исчисляемый конкретными величинами (длина, объем, масса и т.п.).

Износостойкость – характеристика материала, проявляющаяся в его сопротивляемости изнашиванию в тех или иных обстоятельствах трения, исчисляемая величиной, обратной скорости изнашивания.

Прирабатываемость (обкатка) – способность трущихся поверхностей к улучшению путем взаимосглаживания своих контактных характеристик в начальном периоде трения, сопровождаемая уменьшением коэффициента трения, и, как следствие, замедлением изнашивания и снижением тепловыделения. Лучшая прирабатываемость наблюдается у материалов, менее стойких к износу, а потому, чтобы улучшить прирабатываемость, на износостойкие трущиеся поверхности нередко наносят слой специального прирабочного материала.

Влияние пористости материалов на триботехнические характеристики

Триботехнические характеристики материалов подлежат регулированию путем повышения или снижения коэффициента трения. Поры являются своеобразны-

ми резервуарами, заполненными входящим в состав материала смазывающим компонентом (различным в зависимости от сферы применения), выдавливающимся из объема материала по мере изнашивания и поступающий в зону трения для регенерации смазочной пленки. Самовыдавливание смазывающего компонента осуществляется также по мере фрикционного нагревания и теплорасширения материала. По мере охлаждения излишек смазки вновь впитывается пористым слоем.

Антифрикционные пористые материалы Пористые антифрикционные материалы (ГОСТ 26614-85) изготавливают методом формопрессования с последующим спеканием из металлопорошков на основе Fe, Cu и Ti, а также боридных, карбидных и оксидных композиций со смазывающей пропиткой из свинца, графита, дисульфида молибдена, сернистого цинка, селенидов, фторопластов и других мягких наполнителей. Степень пористости таких материалов может быть различной, варьируясь в диапазоне 15-35 %.

Большинство изделий из порошковых антифрикционных материалов – самосмазывающиеся (смазывающий компонент содержится в порах матричной основы). Оптимальную структуру антифрикционных материалов в виде твердой матричной основы с заполняющим ее мягким смазывающим компонентом – возможно получить лишь с применением метода ПМ. Изготавливаемая таким образом продукция способна обеспечить стабильно малые показатели трения благодаря идеальной прирабатываемости, высоким характеристикам износостойчивости/теплопроводности, оптимальной вязкости в режиме ударных нагрузок и сопротивляемости схватывающему эффекту. Данные материалы применяются как для производства деталей пространственной конфигурации, так и в виде функциональных покрытий, наносимых на поверхность специальных подложек.

Из антифрикционных материалов – достойной альтернативы традиционным чистометаллическим сплавам – выпускают, в частности, широкий ассортимент подшипников скольжения.

Различия в назначении и функционировании обуславливают потребность в использовании подшипниковых изделий из пористой металлокерамики с теми или иными значениями пористости. Для эксплуатации в экстремальных условиях (высо-

коскоростной режим с возможными ударными нагрузками), требующих наличия особенно прочных опор, применяют изделия из мелкодисперсных порошков с невысокой степенью пористости (до 22%). В средненагруженном режиме рекомендовано использовать пористоподшипниковую продукцию из порошков среднего зерна (порист. 22-28%). Для эксплуатации в шадящем режиме нужны изделия из порошков крупной дисперсии (порист. 28-35%). Чем выше показатель пластичности и ниже степень пористости металлопорошка, тем ближе он по набору функциональных свойств к компактному металлу.

В оптимальном температурном диапазоне (150-180 °С), при слабых нагрузках и приемлемом количестве дополнительной смазки (около 2,5 капель/мин. на 1 см²) подшипники в железграфитовом исполнении с пористостью 22-28% нормально функционируют в следующих режимах. Для подшипников со степенью пористости 16-21 % значения допустимых нагрузок повышают в сравнении с рекомендованными на 22-32%. При эксплуатации подшипников в режиме скоростей $v < 1$ м/сек применяют консистентную смазку, в высокоскоростном режиме – негустое минеральное масло.

При высокотемпературных условиях (до 280 °С) металлокерамические подшипники на железграфитовой пористой основе могут эксплуатироваться в режиме невысоких скоростей ($v < 0,11$ м/сек) с использованием графитосмазки.

Применение самосмазывающихся подшипников из пористого железграфита возможно лишь в условии малой нагруженности и небольших скоростей, когда $pv \leq 1$ кГм/см²/сек.

Подшипники скольжения из пористой металлокерамики обычно представляют собой цилиндрические втулки и поставляются уже подготовленными к монтажу.

Применение антифрикционных материалов обусловило возможность повышения надежности и долговечности пар трения, замены дорогостоящих подшипников качения имеющими весьма умеренную цену подшипниками скольжения, а также недешевых традиционных баббитов и бронз – недорогими железграфитовыми псевдосплавами. Возможность пропитывания материалов основы твердыми смазочными наполнителями позволило применять пористые подшипники в случаях, когда

применение жидкой смазки не представляется возможным, к примеру, в оборудовании для фармацевтической промышленности, или при эксплуатации в режиме высоких температур.

Фрикционные порошковые материалы (ГОСТ 17359-82) при степени пористости 10-13% имеют высокие показатели коэффициента трения, износо/тепло/коррозионной стойкости, прочности, прирабатываемости. Поэтому их используют в составе технических устройств, предназначенных для передачи или рассеивания кинетической энергии (тормозов, фрикционных муфт, демпферов и др.). Результативность эксплуатации фрикционных материалов во многом зависит от показателей коэффициента трения и износоустойчивости. Широкие возможности ПМ позволяют получать современные фрикционные материалы с различными наборами заданных функциональных свойств.

Как и антифрикционные, фрикционные материалы также являются пористыми композитами, хотя в практическом отношении и выполняют прямо противоположную функцию.

Они состоят из металлических и неметаллических компонентов для деталей, работающих в масле (75%) и при сухом трении, в виде, соответственно, металлической основы (стальной, чугуновой, медно-никелевой и т.д.),

При этом металлокомпоненты позволяют добиться высоких значений теплопроводности и прирабатываемости, а безметаллические составляющие (SiO_2 , Al_2O_3 , графит и др.) способствуют увеличению силы трения и минимизируют возможность заедания вследствие схватывания. К наиболее востребованным маркам антифрикционных материалов причисляют: ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А, СМК-80, МК-5, МК-263. Первые 3 марки разработаны для сильнонагруженных тормозов, муфт сцепления летательных аппаратов и дорожной техники военного назначения. Марка СМК-80 используется в составе тормозов и муфт сцепления большегрузной автотехники (например, карьерные самосвалы грузоподъемностью свыше 70 т.).

Самыми же распространенными являются марки МК-5 и МК-263 на латунно-бронзовой основе, предназначенные для эксплуатации в условиях тяжелых и средних нагрузок при температуре поверхности трения не свыше 550-650 °С. Из мате-

риалов данных марок производят широчайший ассортимент дисков сцепления и тормозных колодок, которыми комплектуют автотракторную технику и спецтехнику строительного и дорожно-строительного назначения.

В последнее время для автомашин, тракторов, малой и средней грузоподъемности все чаще используются фрикционные материалы на полимерной основе.

3.9. Электротехнические порошковые материалы

Несмотря на то, что некоторые из таких материалов можно причислить к конструкционным, а некоторые – к пористым, по ряду основных эксплуатационных свойств их целесообразно выделить в отдельную категорию. Электротехническая порошковая металлокерамика по большей части представляет собой псевдосплавы сложнокомпонентной структуры, получать которые можно только методами ПМ. Они востребованы при изготовлении электроконтактных групп, постоянных магнитов, ферритов, прочих токопроводящих материалов и диэлектриков.

Группа электротехнических материалов подразделяется на подгруппы:

- электроконтактных (металлических, металлографитовых, металлооксидных и металлокарбидных), из которых производят контакты скользящего и разрывного типов;
- магнитомягких из сплавов типа Fe-Ni, Fe-Si-Al, Fe-Cr-Al и нек. др. ферросплавов;
- магнитотвёрдых из сплавов типа Fe-Al (альни), Fe-Al-Ni-Co (альнико), Fe-Al-Mg-Co (магнико);
- магнитодиэлектриков из карбонильного Fe, пермаллоя Fe-Ni(45-85%), альсифера (Fe –Al(5.5%)-Si(9,5)), ферритов (Fe_3O_4 с включением NiO, MgO, MnO, ZnO).

3.9.1. Контактные электротехнические материалы

Химсостав и сферы применения электротехнических композиционно-контактных металлокерамических материалов регламентированы ГОСТ 3884-67. В свою очередь, их подразделяют на материалы для контактов разрывного и скользящего типа. Разрывные контакты применяются для многократных циклов (до нескольких миллионов) замыкания-размыкания электроцепей. Им присущи высокие

показатели износоустойчивости, эрозиостойкости при электродуговом воздействии, механической прочности, электропроводности, они не обгорают и не склонны к самопривариванию. При этом значения контактного сопротивления должны быть минимальными, а критические показатели силы тока и дугообразующего напряжения – максимальными.

Чистых металлов, способных в равной мере соответствовать перечисленным требованиям, в природе нет, поэтому разрывные контакты изготавливают только посредством ПМ, применяя, в частности, способы: формопрессования и спекания готовых изделий из металлопорошка или миксов требуемого химсостава; штампования из металло/керамо/проката, прессования заготовок пористых тугоплавких матриц с последующей их пропиткой металлами, имеющими меньшую T° плавления.

Для получения набора требуемых функциональных характеристик и в целях экономии дефицитных цветметаллических ресурсов металло/керамо/контакты часто выполняют многослойными, причем каждый слой представлен материалом определенного химсостава. Многослойные разрывные контакты получают путем спекания заготовок, спрессованных из порошков различного состава, загруженных в прессформу в виде последовательно засыпаемых слоев.

Контактами разрывного типа комплектуют как слаботочную, так и высоковольтную аппаратуру (в этом случае применяются разрывные контакты со спеченной вольфрамовой матрицей, пропитанной более легкоплавкими Cu или Ag).

Скользящие контакты (электрощетки) производят из сплавов на базе порошков Cu, Ag, Ni, Fe с добавлением графита, нитрида В, а также сульфидов (с целью минимизации силы трения); они применяются при изготовлении электродвигателей, электрогенераторов, потенциометров, токосъемной и другой электротехнической аппаратуры.

Контакты скользящего типа используются для подвода/отведения тока на коллекторах различных электроустановок, включая: тяговые двигатели постоянного тока с пониженным напряжением, зарядные генераторы с пониженным напряжением, асинхронные двигатели любых мощностных групп с подъемными щетками, предна-

значенные для эксплуатации в режиме высокой окружной скорости и плотности тока; асинхронные двигатели любых мощностных групп со щетками постоянного налегания.

Кроме того, скользящими контактами также комплектуют: контактные кольца к одноякорным преобразователям, эксплуатируемым в режиме высоких окружных скоростей, высокой и средней плотности тока; кольца возбуждения синхронных и электродвигателей/электрогенераторов любых мощностных групп и напряжений, эксплуатируемых в режиме средних окружных скоростей.

Металлокерамические контактные электрощетки изготавливают с применением методов ПМ из микса порошков Cu, Ag и др. металлов. Применяются также порошковые углеграфитные материалы, нередко с присадками Pb, Sn и других смягчающих добавок, с тем, чтобы снизить степень жесткости материала и одновременно повысить его вибростойкость и устойчивость к распылению. Включения графита минимизируют возможность налипания и взаимосваривания металлических частиц, снижают степень окисляемости, помогают понизить коэффициенты износа и трения. Самыми востребованными являются контакты скользящего типа из меднографитных и бронзографитных композиционных материалов.

3.9.2. Магнитные электротехнические материалы

С применением методов ПМ осуществляют получение электротехнических материалов, из которых производят постоянные магниты. Благодаря наличию постоянных магнитных свойств, а также потому, что основой каждого из них является железо (Fe), эти материалы называют также ферромагнитными.

Исходными материалами для изготовления металлокерамических магнитов служат сплавы на базе Fe с добавками легирующих присадок в виде соединений Ni, Co, Al и ряда других металлов. Микс порошков подвергают формопрессованию, затем – спеканию, а в заключение спеченные заготовки закаливают-отпускают либо проводят их намагничивание иными способами термического воздействия. Степень пористости таких материалов должна быть минимальной, так как по мере возрастания пористости снижаются магнитные свойства..

Магниты из ферромагнитной металлокерамики применяют в аппаратуре связи, медприборах, системах зажигания ДВС, полюсах электродвигателей постоянного тока и т.д. Конечная продукция из магнитных материалов представляет собой пластины, полосы, втулки, кольца, изделия других конфигураций.

Порошковые магниты превосходят аналоги, изготавливаемые традиционными способами, по целому ряду функциональных параметров, основными из которых являются более точный химсостав и повышенная однородность эксплуатационных характеристик.

Спеченные магнитоматериалы подразделяют на магнитомягкие (в т.ч. магнитодиэлектрики), характеризующиеся высокими показателями магнитопроницаемости и невысокими – коэрцитивной силы*, а также магнитотвердые, отличающиеся напротив, малыми показателями магнитопроницаемости и высокими – коэрцитивной силы. В качестве исходных порошковых компонентов магнитомягких ферромагнетиков используются чистое железо (карбонильн. или электролитич. генеза), а также порошковые сплавы Fe с Ni и Co (пермаллои, перминвары и др.). Особую группу составляют порошковые ферромагнетики на основе ферритов – спеченных в кислородной среде магнитных композиционных материалов из мелкодисперсных порошковых смесей оксидов Fe с оксидами двухвалентных металлов — MnO, MgO, ZnO, NiO и др. Ферритам присущи очень высокие значения удельного сопротивления, более чем в 1000 раз превышающие аналогичный показатель для Fe.

Разновидностью магнитомягких материалов являются магнитодиэлектрики. Структурно они представляют собой многокомпонентные соединения из слоистого материала-ферромагнетика, изготавливаемого на основе альсифера, карбонильн. железа или пермаллоев (железоникелевых сплавов), разделенных тонкими промежуточными изолятора-диэлектрика (жидк. стекла, бакелита, шеллака, синтетических смол). Содержание последних в магнитодиэлектриках находится в пределах от 4,5 до 16%. Существуют также магнитодиэлектрики, изготавливаемые из мягких ферромагнетиков.

Магнитотвердые (магнитожесткие) порошковые материалы производят из сплавов (типа альни, альнико, магнико, кунико, кунифе и др.), близких по химсоста-

ву к литым. Добиться высоких показателей магнитосвойств позволяют и магнитотвердые композиции из редкоземельных химэлементов и Co (типа RCo, где R – Sm, Pr, Ce).

После спекания магнитотвердых сплавов проводят их термообработку. При изготовлении магнитов из мелкодисперсных порошков (\varnothing зерен до 0,6 мкм) их масса в сравнении с магнитами литого генеза снижается вдвое, что немаловажно для практических целей. Применение порошковых магнитотвердых сплавов вместо литых позволяет увеличить выход конечной продукции более чем на 80% .

Ферромагнитные материалы востребованы в различных сферах современной электротехники. Продукция из магнитомягких материалов используется в трансформаторных устройствах, электродвигателях, электрогенераторах, слаботочной аппаратуре и т.д. Из магнито жестких материалов изготавливается обширная номенклатура постоянных магнитов универсального назначения (обычно массой ≤ 100 г.), применяемых в составе электродвигателей и других электротехнических устройства, где необходимо наличие постоянного магнитного поля.

Ферримагнетики, сочетая в себе ферромагнитные и полупроводниковые свойства, получили распространение в радиотехнике и электронике. Они, в частности, находят широкое применение в качестве ферритовых матриц высокочастотной радиоэлектронной аппаратуры (в т.ч. телевизионной) и измерительной техники, компонентов стационарных и мобильных компьютерных устройств и т.п.

3.9.3. Аморфные магнитоматериалы

Новый класс порошковых магнитоматериалов – это т. наз. аморфные материалы, которые применяют, в частности, при изготовлении магнитных экранов, трансформаторных сердечников и электронной аппаратуры. Аморфные металлические сплавы (АМС) производят путем почти мгновенного (в скоростном режиме $10^5 \dots 10^6$ 0С/с) замораживания расплавов (напр. Fe₄₀N₄₀P₁₀B₈O) при обязательном условии наличия в них определенной концентрации аморфизирующих неметаллических химэлементов в виде B, P, Si, C, либо металлических соединений. Соответственно, класс АМС условно подразделяют на подклассы «металла-неметалла» и «металла-металла». Наиболее промышленно-востребованными являются магнитомягкие

аморфные сплавы первого из этих подклассов на базе металлов-ферромагнетиков Fe, Ni и Co, в сочетании с аморфизаторами в виде различных композиций неметаллических элементов.

В структурном отношении АМС напоминают замерзшую жидкую субстанцию. Процесс затвердения столь стремителен, что атомы сплава как бы «замирают» в положениях, занимаемых ими при жидкой консистенции расплава. Аморфоструктуру характеризуют отсутствие кристаллоанизотропии, межблоковых и межзеренных границ, прочих структурных недостатков, присущих поликристаллическим сплавам.

Благодаря своей необычной структуре АМС проявляют ряд уникальных магнито-, механико- электросвойств, а также повышенную коррозиестойкость. Помимо высоких значений магнитомягкости — таких, что электромагнитные потери в АМС оказываются намного более меньшими, нежели в кристаллосплавах — данные материалы проявляют чрезвычайно высокую механотвердость и механопрочность на растяжение, нередко имея почти нулевой коэффициент теплорасширения, а величина их удельного электросопротивления втрое-вчетверо превышает аналогичное значение для Fe и ферросплавов.

Перечисленных выше примеров вполне достаточно, чтобы создать представление о широте возможностей практического применения порошковых материалов в различных технических сферах, подробное перечисление которых здесь вряд ли целесообразно. Тем не менее, факт остается фактом: потребность в таких материалах возрастает буквально день ото дня, обуславливая постоянное совершенствование уже существующих и разработку новых.

ТЕМА 4. СТЕКЛА

Стекло – твердый гомогенный (однородный) застывший сплав различных оксидов, не имеющий кристаллической структуры, аморфное изотропное тело, механические свойства которого постоянны во всех направлениях. Свойства стекла зависят от сочетания входящих в его состав компонентов.

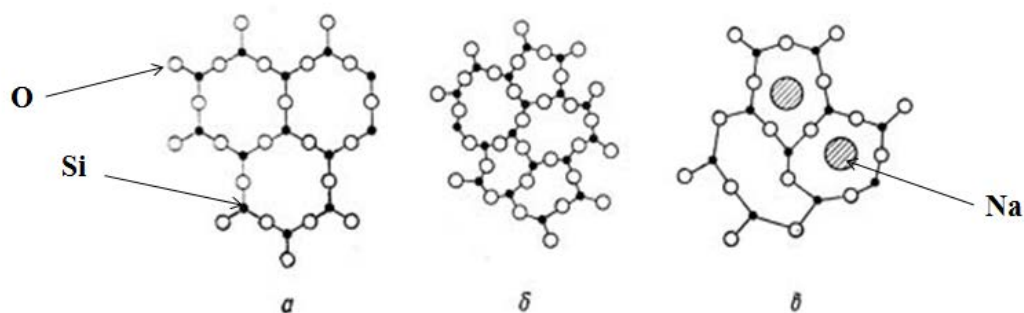


Рис.4.1. Кристаллическая структура SiO_2 (а), аморфная структура SiO_2 (б).

Аморфная SiO_2 отличается от кристаллической структуры кварца SiO_2 пространственной беспорядочной сетки, каркас которой образуют $[\text{SiO}_4]$ - структурные элементы. В этот каркас входят прочие составные части стекла (рис.4.1.в.) (модификаторы сетки, такие как щелочи, щелочноземельные металлы и т. д.).

Неорганические стекла классифицируются по виду стеклообразующего вещества, виду модификаторов, технологии изготовления и назначению.

По виду стеклообразующего вещества неорганические стекла делятся на силикатные (SiO_2), алюмосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), боросиликатные ($\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), алюмоборосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$), алюмофосфатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$), халькогенидные (например, $\text{As}_{31}\text{Ge}_{30}\text{Se}_{21}\text{Te}_{180}$), галогенидные и другие стекла.

По виду модификаторов различают щелочные, бесщелочные и кварцевые неорганические стекла. Прочность щелочных стекол под действием влаги уменьшается вдвое, так как вода выщелачивает стекло. При этом, образуются щелочные растворы, которые расклинивают стекло, вызывая появление микротрещин в поверхностном слое.

По технологии изготовления неорганическое стекло может быть получено выдуванием, литьем, штамповкой, вытягиванием в листы, трубки, волокна и др. Стекло выпускается промышленностью в виде готовых изделий, заготовок и отдельных деталей.

По назначению неорганические стекла делятся на техническое, строительное и бытовое (стеклотара, посудное, бытовое и др.).

Техническое стекло по области применения делится на электротехническое, транспортное; оптическое, светотехническое, термостойкое, тугоплавкое, легкоплавкое, химико-лабораторное и др.

Электротехническое стекло. Высокие значения удельного электросопротивления, большая электрическая прочность (16–50 кВ/мм), низкие значения диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta=0,0018\text{--}0,0175$) и сравнительно высокая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon=3,5\text{--}16$), которая повышается при увеличении концентрации PbO или BaO. При нагреве в интервале температур 200–400 °С удельное электросопротивление уменьшается в 108–1010 раз, что связано с увеличением подвижности щелочных ионов, и стекло теряет свои изолирующие свойства. Оксиды тяжелых металлов – свинца и бария уменьшают подвижность ионов и снижают потери.

При впаивании металла в стекло, при сваривании стекол разного состава в стекле появляются термические напряжения из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения. Если температурные коэффициенты обоих материалов близки, то спаи стекла с материалом называются согласованными спаями, а если различны – несогласованными спаями.

Как диэлектрик используют для колб осветительных ламп и радиоламп, в электровакуумных устройствах, для изоляторов, для герметизации интегральных схем. Так, в виде тонкой (до 3–4 мкм) пленки стекло используют в качестве прочной, нетрескающейся и теплостойкой изоляции на металлических проводах и термopарах. Халькогенидное стекло используется для герметизации полупроводниковых приборов. Электропроводящие (полупроводниковые) стекла: халькогенидные и оксидные ванадиевые – находят широкое применение в качестве термисторов, фотосопротивлений.

Электротехнические стекла в зависимости от величины температурного коэффициента линейного расширения разделяются на платиновые (С89-2), молибденовые (С49-1) и вольфрамовые (С38-1). Каждая группа стекол используется для согласованных сплавов с Mo, W и сплавами Fe-N. В марке электротехнического стекла указывается значение температурного коэффициента линейного расширения.

Транспортное стекло. В машиностроении эффективно применяется как конструкционный материал при условии нейтрализации хрупкости, что достигается его закалкой, как правило, в воздушном потоке.

Специфическими свойствами стекол являются их оптические свойства: светопрозрачность, отражение, рассеяние, поглощение и преломление света. Коэффициент преломления таких стекол составляет 1,47–1,96, коэффициент рассеяния находится в интервале 20–71.

Разновидностями транспортного стекла являются триплексы и термопан, применяемые для остекления в транспортных средствах, скафандрах.

Триплексы – композиционный материал, получаемый из двух листов закаленного силикатного (или органического) стекла толщиной 2–3 мм, склеенных прозрачной эластичной полимерной (обычно из поливинилбутираля) пленкой. При разрушении триплекса образовавшиеся неострые осколки удерживаются на полимерной пленке.

Термопан – трехслойное стекло, состоящее из двух листов закаленных стекол и воздушного промежутка между ними. Эта воздушная прослойка обеспечивает теплоизоляцию.

Оптическое и светотехническое стекло. Оптические свойства стекол зависят от их окраски, которая определяется химическим составом стекол, а также от состояния поверхности изделий. Оптические изделия должны иметь изотропную, свободную от напряжений структуру, которую получают отжигом, и гладкие полированные поверхности.

Обычное неокрашенное листовое стекло пропускает до 90 %, отражает примерно 8 % и поглощает около 1% видимого и частично инфракрасного света; ультрафиолетовое излучение поглощается почти полностью. Кварцевое стекло является прозрачным для ультрафиолетового излучения. Светорассеивающие стекла содержат в своем составе фтор. Стекло с большим содержанием PbO поглощает рентгеновские лучи.

Оптические стекла, применяемые в оптических приборах и инструментах, подразделяют на кроны, отличающиеся малым преломлением ($n_d=1,50$), и флинты ($n_d=1,67$) – с высоким содержанием оксида свинца.

Термостойкое и тугоплавкое стекло. «Пирекс» – термостойкое стекло на основе SiO_2 (80,5%) с повышенным содержанием B_2O_3 (12%), Na_2O (4%), а также оксидами алюминия, калия и магния. «Мазда» – тугоплавкое стекло на основе SiO_2 (57,6%) с оксидами алюминия (25%), кальция (7,4%), магния (8%) и калия. «Пирекс» и «Мазда» используются для изготовления изделий, использующихся при повышенных температурах эксплуатации: оболочки термометров, смотровые стекла и др.

Легкоплавкое стекло. Эти стекла изготавливают на основе PbO (70%) с добавлением B_2O_3 (20 или 68,8%) с добавлением ZnO (28,6%) и Na_2O (2,6%); используются для изготовления эмалей, глазури и припоев для спаивания стекла.

Строительное стекло выпускают следующих видов: листовое, облицовочное и изделия и конструкции из стекла.

Листовое стекло изготавливают из стеклянной массы, в состав которой входят 71–73% SiO_2 , 13,5–15% Na_2O , до 10% CaO , до 4% MgO и до 2% Al_2O_3 . Масса 1 м² листового стекла 2–5 кг. Светопропускание – не менее 87%.

Листовое стекло вырабатывают трех сортов и в зависимости от толщины шести размеров (марок): 2; 2,5; 3; 4; 5 и 6 мм. Сорт листового стекла определяется наличием дефектов, к которым относятся: полосность – неровность на поверхности; свиль – узкие нитевидные полоски; пузыри – газовые включения и др. Ширина листов стекла 250–1600 мм, длина 250–2200 мм.

Промышленностью вырабатываются также специальные виды листового стекла: витринное (полированное), теплопоглощающее, увиолевое (пропускающее 25–75% ультрафиолетовых лучей), закаленное, архитектурно-строительное и др.

Листовое стекло – основной вид стекла, используемый для остекления оконных и дверных проемов, витрин, наружной и внутренней отделки зданий.

Облицовочное стекло применяют для отделки фасадов и внутренних помещений здания. К потребительским свойствам такого стекла относятся высокая декора-

тивность (яркие цвета, блестящая поверхность), большая атмосферостойкость и долговечность. К группе облицовочных стекол относятся:

Стемалит – листовый строительный материал из закаленного полированного (толщиной 6–12 мм) стекла, покрытого с внутренней стороны непрозрачной (глухой) керамической краской. Покрытие защищается со стороны помещения тонким слоем алюминия, нанесенным в вакууме. Применяется для внутренней и наружной облицовки зданий;

Марблит – листовый строительный материал толщиной 12 мм из цветного глушеного стекла с полированной лицевой поверхностью и рифленой тыльной, может имитировать мрамор;

Стеклоэмаль – изготавливается из отходов листового стекла (стеклянная эмаль), наплавляемых на поверхность стекла, нарезанного на требуемые размеры (150x150, 150x70 мм при толщине 3–5 мм);

Стекломозаика – ковровая мозаика в виде мелких квадратных плиток (20x20 или 25x25 мм) из непрозрачного (глушеного) цветного стекла, выложенных в однотонные или мозаичные ковры;

Смальта – кубики или пластинки толщиной 10 мм из цветной глушеной стекломассы, полученные отливкой или прессованием; применяется для изготовления мозаик.

Изделия и конструкции из стекла. К наиболее распространенным изделиям и конструкциям из стекла в строительной промышленности относятся:

Стеклоблоки – полые блоки из двух отформованных половинок, сваренных между собой. Светопропускание – не менее 65%, светорассеяние – около 25% (светорассеяние повышают рифлением внутренней стороны блоков), теплопроводность – 0,4 Вт/(м·К). Применяются для заполнения световых проемов в наружных стенах и устройства светопрозрачных покрытий и перегородок;

Стеклопакеты – два-три листа стекла, соединенных по периметру металлической рамкой (обоймой), между которыми создана герметически замкнутая воздушная полость. Применяются для остекления зданий;

Стеклопрофилит – крупногабаритные строительные панели из про-фильного стекла, изготавливаемые методом непрерывного проката коробча-того, таврового, швеллерного и полукруглого профилей. Стеклопрофилит может быть армированным и неармированным, бесцветным и цветным. Применяется для устройства светопрозрачных ограждений зданий и сооружений.

Стекловолокно – волокнистый материал, получаемый из расплавленной стекломассы. Наиболее широко применяются бесщелочное алюмо-боросиликатное Е-стекло, а также высокопрочное стекло на основе оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO . Диаметр стекловолокна колеблется от 0,1 до 300 мкм. Форма сечения может быть в виде крута, квадрата, прямоугольника, треугольника, шестиугольника. Выпускаются и полые волокна. По длине волокно делится на штапельное (от 0,05 до 2–3 м) и непрерывное. Плотность стекловолокна 2400–2600 кг/м³. Прочность элементарных стеклянных волокон в несколько десятков раз выше объемных образцов стекла: прочность на растяжение достигает 1500–3000 МПа для непрерывных волокон диаметром 6–10 мкм. Стеклово-локно имеет высокие тепло-, электро- и звукоизоляционные свойства, оно термо- и химически стойко, негорюче, не гниет.

Поверхность стеклянных волокон при транспортировке и различных видах переработки замазывают для предотвращения истирания, так как от состояния поверхности волокон зависит их прочность. Из стекловолокна изготавливают стекловату, ткани и сетки, а также нетканые материалы в виде жгутов и холстов, стеклома-тов.

Стекловата – материал из стеклянных волокон, диаметр которых для изготовления теплоизоляционных изделий не должен превышать 21 мкм. Структура ваты должна быть рыхлой – количество прядей, состоящих из параллельно расположенных волокон, не более 20% по массе. Плотность в рыхлом состоянии не должна быть более 130 кг/м³. Теплопроводность – 0,05 Вт/(м·К) при 25 °С. Стеклянную вату из непрерывного волокна применяют для изготовления теплоизоляционных материалов и изделий при тем-пературах изолируемых поверхностей от -200 до +450°С.

Стекловата из супертонкого волокна имеет плотность 25 кг/м³, тепло-проводность 0,03 Вт/(м·К), температурах эксплуатации от -60 до +450°С, звуко-поглощение 0,65–0,95 в диапазоне частот 400–2000 Гц. Стекловата из супертонкого волокна, а также изделия на ее основе используются в строительстве в качестве звукоизоляционного материала.

Стекломаты (АСИМ, АТИМС, АТМ-3) – материалы, состоящие из стекловолокон, расположенных между двумя слоями стеклоткани или стеклосетки, простеганной стеклонитками. Они применяются при температурах 60–600°С в качестве армирующих элементов в композиционных материалах.

Стеклорубероид и стекловолок – рулонные материалы, получаемые путем двухстороннего нанесения битумного (битумно-резинового или битумно-полимерного) вяжущего вещества, соответственно, на стекловолокнистый холст или стекловолок и покрытия с одной или двух сторон сплошным слоем посыпки. Сочетание биостойкой основы и пропитки с повышенными физико-механическими свойствами позволяет достичь долговечности для стеклорубероида около 30 лет.

В зависимости от вида посыпки, предотвращающей слипание при хранении в рулонах, и назначения стеклорубероид выпускают следующих марок: С-РК (с крупнозернистой посыпкой), С-РЧ (с чешуйчатой посыпкой) С-РМ (с пылевидной или мелкозернистой посыпкой). Применяют стеклорубероид для верхнего и нижнего слоев кровельного ковра и для оклеенной гидроизоляции.

Гидростеклоизол – гидроизоляционный рулонный материал, предназначенный для гидроизоляции железобетонных обделок туннелей (марка Т), пролетных строений мостов, путепроводов и других инженерных сооружений (марка М).

Гидростеклоизол состоит из стеклоосновы (тканой или нетканой сетчатой, дублированной стеклохолстом), покрытой с обеих сторон слоем битумной массы, в которую входят битум, минеральный наполнитель (около 20%) с молотым тальком, магнезитом, а также пластификатором. Отличается помимо высокой водонепроницаемости хорошими прочностными показателями при растяжении в продольном на-

правлении. Он выдерживает разрывную нагрузку при высшей категории качества 735 Н. Теплостойкость – 60–65 °С, температура хрупкости – от -20 до -10°С.

Гидростеклоизол наклеивают без применения мастик – равномерным плавлением (например, используя пламя газовой горелки) его поверхности.

Пеностекло (ячеистое стекло) – ячеистый материал, получаемый спеканием тонко измельченного стекольного порошка и порообразователя. Вырабатывают из стекольного боя либо используют те же сырьевые материалы, что и для производства других видов стекла: кварцевый песок, известняк, соду и сульфат натрия. Порообразователями могут быть кокс и известняк, антрацит и мел, а также карбиды кальция и кремния, выделяющие при спекании углекислый газ, образующий поры.

Пеностекло имеет специфическое строение – в материале стенок крупных пор (0,25–0,5 мм) содержатся мельчайшие микропоры, что обуславливает малую теплопроводность (0,058–0,12 Вт/(м·К)) при достаточно большой прочности, водостойкости и морозостойкости. Пористость различных видов пеностекла составляет 80–95%; плотность 150–250 кг/м³; прочность 2–6 МПа. Обладает высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами. Пеностекло – несгораемый материал с высокой (до 600 °С) теплостойкостью. Легко обрабатывается (пилится, шлифуется); оно хорошо склеивается, например, с цементными материалами.

Щиты из пеностекла применяют для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий (стен, перекрытий, кровель и др.), в конструкциях холодильников (изоляция поверхностей с температурой эксплуатации до 180 °С), для декоративной отделки интерьеров. Из пеностекла с открытыми порами изготавливают фильтры для кислот и щелочей.

Стеклопор получают путем фануляции и вспучивания жидкого стекла с минеральными добавками (мелом, молотым песком, золой ТЭС и др.). Выпускается трех марок: СЛ $\rho_0=15-40$ кг/м³, $\lambda=0,028-0,035$ Вт/(м·К); Л $\rho_0=40-80$ кг/м³, $\lambda=0,032-0,04$ Вт/(м·К); $\rho_0=80-120$ кг/м³, $\lambda=0,038-0,05$ Вт/(м·К).

В сочетании с различными связующими веществами стеклопор используют для изготовления штучной, мастичной и заливочной теплоизоляции. Наиболее эффективно применение стеклопора в ненаполненных пенопластах, так как введение

его в пенопласт позволяет снизить расход полимера и значительно повысить огнестойкость теплоизоляционных изделий.

Армированное стекло – конструкционное изделие, получаемое методом непрерывного проката неорганического стекла с одновременным закатыванием внутрь листа металлической сетки из отожженной хромированной или никелированной стальной проволоки. Это стекло имеет предел прочности при сжатии 600 МПа, повышенную огнестойкость, безосколочно при разрушении, светопропускаемость – более 60%. Может иметь гладкую, кованую или узорчатую поверхность, быть бесцветным или цветным. Армированное стекло применяют для остекления фонарей верхнего света, оконных переплетов, устройства перегородок, лестничных маршей и др.

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) – искусственный материал на основе неорганического стекла, получаемый путем полной или частично управляемой кристаллизации в них. Термин «ситаллы» образован от слов: «стекло» и «кристаллы». По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганического стекла они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой. В состав ситаллов входят: оксиды – Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO и др.; нуклеаторы (катализаторы кристаллизации) – соли светочувствительных металлов – Au , Ag , Cu , являющиеся коллоидными красителями и присутствующие в стекле в виде тонкодисперсных частиц. Нуклеаторы являются дополнительными центрами кристаллизации. Они должны иметь кристаллическую решетку, подобную выщеляющимся из стекла кристаллическим фазам, и способствовать равномерной кристаллизации всей массы; глушители (плохо растворимые частицы) – фтористые и фосфатные соединения.

Структура ситаллов мелкокристаллическая, однородная, характеризуется отсутствием пористости. Средний размер кристаллитов в ситаллах 1–2 мкм. Содержание кристаллической фазы – не менее 40–50%. Кристаллиты срастаются между собой или связаны прослойками остаточного аморфного стекла. Количество стеклофа-

зы не превышает нескольких процентов. Беспорядочная ориентация кристаллитов приводит к отсутствию в ситаллах анизотропии.

Регулируя режимы термообработки, можно изменять степень кристаллизации и размеры кристаллов, что отражается на свойствах изделия. Свойства ситаллов изотропны и в основном определяются фазовым составом и их структурой. Основными свойствами ситаллов являются: плотность 2400–2950 кг/м³, температура размягчения 1250–1350 °С, низкая теплопроводность 2–7 Вт/(м·К), температурный коэффициент линейного расширения $(7-300) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\sigma_{сж}=7-2000 \text{ МПа}$, $\sigma_{в}=112-160 \text{ МПа}$, $\sigma_{изг}=7-350 \text{ МПа}$, модуль Юнга 84–141 ГПа, хрупкость (при ударной вязкости 4,5–10,5 кДж/м²), микротвердость – 7000– 10500 МПа, высокая износостойкость, газонепроницаемость и нулевое водопоглощение.

По внешнему виду ситаллы могут быть непрозрачными (глухими), прозрачными, а также окрашенными (темного, коричневого, серого, кремового и светлого цветов). Прочность их зависит от температуры: до 700–780 °С она снижается незначительно, а при более высоких температурах быстро падает. Жаропрочность ситаллов составляет 800–1200 °С.

Причина особо ценных свойств ситаллов заключается в их исключительной мелкозернистости и почти идеальной поликристаллической структуре. В них совершенно отсутствует всякая пористость. Усадка материала при его переработке незначительна. Большая абразивная стойкость делает их малочувствительными к поверхностным дефектам.

Детали из ситаллов соединяют друг с другом и другими материалами с помощью стеклокристаллического цемента с последующей термической обработкой при 400–600°С, клеев и замазок на основе эпоксидной смолы и жидкого стекла, металлизацией с последующей пайкой.

Ситаллы классифицируют в зависимости от способа производства, от характера исходных материалов и по назначению.

Ситалловые изделия получают, как правило, путем плавления стекольной шихты специального состава, охлаждения расплава до пластического состояния и

последующего формования методами стекольной или керамической технологии (вытягивание, выдувание, прокатка, прессование), а затем ситаллизацией. Такие изделия получают также порошковым методом спекания.

По характеру исходных материалов и свойств выделяют: петроситаллы, шлакоситаллы и технические ситаллы. Разновидностью ситаллов являются ситаллопласты – композиционные материалы, получаемые на базе пластических масс (фторопластов) и ситаллов.

Петроситаллы получают на основе габбро-норитовых, диабазовых и других горных пород, шлакоситаллы – из металлургических или топливных шлаков. Технические ситаллы изготавливают на основе искусственных композиций из различных химических соединений – оксидов, солей.

По назначению ситаллы делятся на конструкционные (строительные и машиностроительные), технические, радио-, электро- и фототехнические. На основе ситаллов получают различные клеи для склеивания металла, стекла, керамики. Наиболее широкое распространение в строительстве получили шлакоситаллы и пеношлакоситаллы.

Шлакоситаллы – ситаллы из огненно-жидких металлургических шлаков. Плотность – 600–2700 кг/м³; $\sigma_{сж}$ =250–550 МПа, $\sigma_{изг}$ =65–130 МПа, модуль упругости $E=11 \cdot 10^4$ МПа, рабочие температуры – до 750 °С, водопоглощение практически равно нулю; высокие кислото- и щелочестойкость.

Изделия из шлакоситалла дешевы и отличаются высокой долговечностью. Эти изделия используются для лестничных ступеней, плиток полов, внутренних перегородок, как кровельный и стеновой материал, для облицовки ответственных частей гидросооружений, а также в дорожном строительстве в качестве плит для тротуаров, дорожных покрытий. Листовой шлакоситалл (можно получать любого цвета) используется как декоративно-отделочный материал для наружной и внутренней облицовки сооружений. Шлакоситаллы могут быть получены любыми цветами, а по долговечности они конкурируют с базальтами и гранитами.

Пеношлакоситалл – вспененный шлакоситалл с ячеистой структурой. Эффективный теплоизоляционный материал с незначительным водопоглощением и малой

гигроскопичностью. Рабочие температуры – до 750 °С Пеношлакоситаллы используют для утепления стен и звукоизоляции помещений, а также для изоляции трубопроводов теплотрассы и промышленны печей.

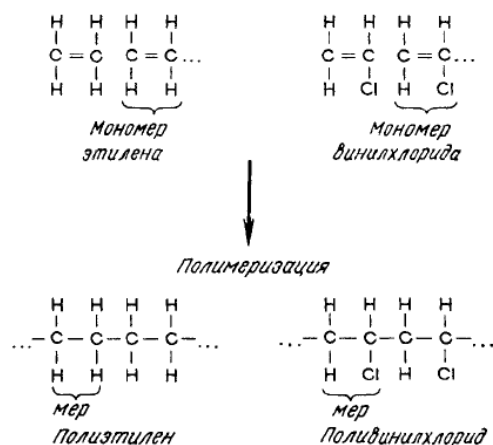
В машиностроении ситаллы применяют для изготовления подшипников, деталей двигателей, труб, жаростойких покрытий, лопастей компрессоров, точных калибров металлорежущих станков, метрологических мер длины, фильер для вытягивания синтетического волокна, абразивов для шлифования; в химическом машиностроении – пар трения плунжеров, деталей химических насосов, реакторов, мешалок, запорных клапанов. Радио- и электротехнические ситаллы используются для изготовления подложек, оболочек, плато, сетчатых экранов, антенны обтекателей и др., а также как жаростойкие покрытия для защиты металлов от действия высоких температур. Фототехнические ситаллы применяются для изготовления сетчатых экранов телевизоров, дорожных знаков, зеркал телескопов, для замены фото эмульсий диапозитивов, на шкалах приборов и др. Разрешающая способность и качество изображения у фотоситаллов выше, чем у обычных фотоэмульсий.

Техническое стекло по области применения делится на электротехническое, транспортное, оптическое, светотехническое, термостойкое, тугоплавкое, легкоплавкое, химико-лабораторное и др.

ТЕМА 5. ПЛАСТМАССЫ

Пластмассы – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу.

Полимерами называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных мало молекулярных звеньев (мономеров) одинакового строения.

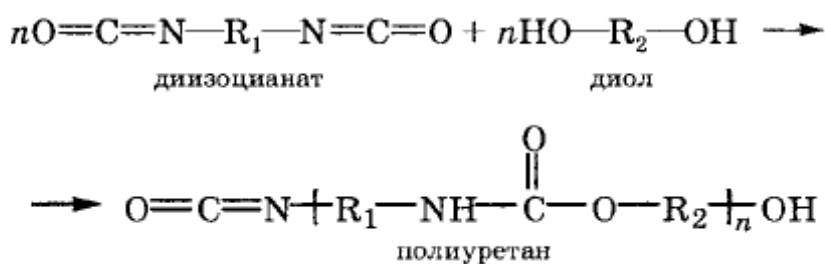


Различают природные и синтетические полимеры. К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, шерсть и т. д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе соединения маломолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных цепей - полимеризацией. В зависимости от способа образования высокомолекулярных синтетических соединений различают полимеры, получаемые либо в процессе поликонденсации, либо в результате реакции присоединения.

Поликонденсация - это ступенчатая реакция, заключающаяся в соединении большого количества одинаковых мономеров или двух различных групп мономеров в макромолекулы (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлороводород, диоксид углерода, метиловый спирт и др.). С помощью реакции поликонденсации получают полиамиды, полиэстеры, фенопласты, аминопласты, поликарбонаты, полисульфоны, силиконы и другие полимеры.



Полиприсоединение - процесс образования полимера в результате реакции множественного присоединения иономеров, содержащих предельные реакционные группы к мономерам, содержащим непредельные группы (двойные связи или активные циклы). В отличие от поликонденсации полиприсоединение протекает без выделения побочных продуктов.



По составу полимеры, используемые в пластмассах, делятся на органические и элементоорганические.

Органические полимеры, составляющие наиболее обширную группу соединений, состоят из атомов углерода, водорода, кислорода, азота, серы и галогенов.

Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи, кроме перечисленных, атомы кремния, титана, алюминия и других элементов, сочетающихся с органическими радикалами. В природе таких соединений нет. Это чисто синтетические полимеры. Их характерными представителями являются кремнийорганические соединения, основная цепь которых построена из атомов кремния и кислорода.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур: линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную с большими молекулярными группами и специфическими геометрическими построениями.

Для макромолекул полимеров с линейной (а) структурой характерна высокая гибкость. Полимеры с линейно-разветвленной (б) структурой помимо основной цепи имеют боковые ответвления. К типичным полимерам с линейной структурой относится полиэтилен, с линейно-разветвленной - полиизобутилен и полипропилен.

Молекула полимера с лестничной структурой (в) состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Полимеры с лестничной структурой, к которым относятся, например, кремнийорганические полимеры, характеризуются повышенной термостойкостью, жесткостью, они нерастворимы в органических растворителях.

Полимеры с пространственной структурой (г) образуют при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении. В результате такого соединения

макромолекул образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки или пространственная сетчатая структура. Полимеры с пространственной структурой обладают большей жесткостью и теплостойкостью, чем полимеры с линейной структурой, которые являются основой конструктивных неметаллических материалов.

По фазовому составу полимеры представляют собой системы, состоящие из кристаллических и аморфных областей. Кристаллическая форма полимеров способствует повышению их твердости, прочности, модуля упругости и других механических характеристик, одновременно снижая гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость, делает полимер более эластичным, т. е. способным к большим обратимым деформациям.

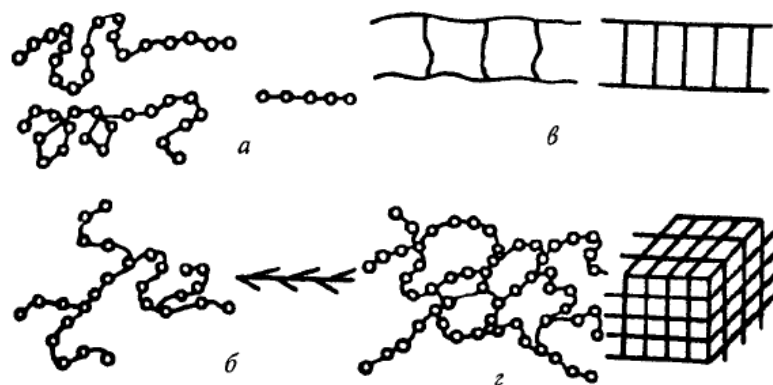


Рис.5.1. Различные типы структур полимеров: а - линейная; б - линейно-разветвленная; в - лестничная; г – пространственная сетчатая.

Пластмассы состоят из нескольких компонентов: связующего вещества, наполнителя, пластификатора, стабилизатора, отвердителя. Обязательным компонентом является связующее вещество.

Наполнителями служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплостойкость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании.

Пластификаторы представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Растворяясь в полимере, пластификаторы повышают его способ-

ность к пластической деформации. Их вводят для расширения температурной области высокоэластического состояния, снижения жесткости пластмасс и температуры хрупкости.

Стабилизаторы вводят в пластмассы для повышения долговечности. Светостабилизаторы предотвращают фотоокисление, а антиокислители - термоокислительные реакции.

Отвердители изменяют структуру полимеров, влияя на свойства пластмасс. Чаще используют отвердители, ускоряющие полимеризацию. К ним относятся оксиды некоторых металлов, уротропин и др.

Для пластмасс характерны следующие свойства:

- низкая плотность;
- не подвержены электрохимической коррозии;
- большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;
- высокие диэлектрические свойства;
- хорошая окрашиваемость в любые цвета;
- механические свойства широкого диапазона;
- антифрикционные свойства;
- высокие теплоизоляционные свойства;
- высокие адгезионные свойства;
- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) - литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений или в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является:

- невысокая теплостойкость (до 100-120 °С);
- низкая твердость;
- склонность к старению;
- ползучесть;
- нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяются на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные пластмассы изготавливают на основе термопластичных полимеров, которые при нагреве размягчаются и плавятся, а при охлаждении затвердевают. При этом материал не претерпевает химических превращений, что делает процесс плавления-затвердевания полностью обратимым. Термопластичные полимеры имеют линейную или линейно-разветвленную структуру макромолекул. Между молекулами действуют слабые силы и нет химических связей. Изделия из термопластичных полимеров изготавливают литьем под давлением в водоохлаждаемые формы, прессованием, экструзией, выдуванием и другими способами.

Таблица 5.1

Типы термопластичных пластмасс и их области применения

Тип пластмассы	Интервал рабочих тем-р, °С	Область применения
Полиэтилен [-CH ₂ -CH ₂ -] _n	-70...+70	Упаковка, ненагруженные детали машин и оборудования, футляры, покрытия, фольги
Полистирол [-CH ₂ -CH(C ₆ H ₅)-] _n	-40...+65	Оборудование радиотехники и фотографии, электроизоляция, теплоизоляционные материалы (пенополистирол)
Полипропилен [-CH ₂ -CH(CH ₃)-] _n	-20...+130	Трубы, детали автомобилей, элементы холодильников, емкости, упаковка
Поливинилхлорид [-CH ₂ -CHCl-] _n	-40...+70	Химическое оборудование, трубы, профили, детали машин, элементы насосов и вентиляторов, упаковка, покрытие полов, искусственная кожа, оконные рамы и т. п.
Политетрафторэтилен (тефлон) [-CF ₂ -CF ₂ -] _n	-265...+260	Химическая, электротехническая, машиностроительная (подшипники) промышленность

Полиэтилен имеет линейную структуру макромолекул: [-CH₂-CH₂-] и является продуктом полимеризации этилена. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. По способу изготовления различают полиэтилен низкой плотности (0,918...0,930 г/см³), получаемый полимеризацией при высоком давлении (ГОСТ 16337-77Е), и полиэтилен высокой плотности (0,946...0,970 г/см³), получаемый по-

лимеризацией при низком давлении (ГОСТ 16338-85Е). Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности 75...95%, но, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Разрушающее напряжение при растяжении полиэтилена низкой плотности составляет 10...17 МПа, полиэтилена высокой плотности - 18...35 МПа. Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства, практически не поглощает влагу. Он стоек к действию кислот, щелочей и растворителей, нетоксичен, легко сваривается, технологичен (поддается экструзии, литью, напылению, заливке и т.д.), стоит недорого и сочетает высокую прочность с пластичностью. Недостатком полиэтилена является склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей.

Полиэтилен (ГОСТ 25951-83, ГОСТ 20477-86, ГОСТ 10354-82) выпускают в виде пленок толщиной 0,03...0,30 мм, шириной 1400 мм и длиной 30 м, а также в виде листов толщиной 1...6 мм и шириной до 1400 мм. Полиэтилен применяют для изоляции электропроводов и кабелей, в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, для защиты от коррозии магистральных нефте- и газопроводов, в качестве заменителя стекла, для изготовления предметов домашнего обихода, для защиты металлов от коррозии. Полиэтиленовые трубы могут работать при температурах до -60 °С, они не подвержены почвенной коррозии. Из полиэтилена изготавливают крышки подшипников, уплотнительные прокладки, детали вентиляторов и насосов, гайки, шайбы, полые изделия вместимостью до 200 л, тару для хранения и транспортировки кислот и щелочей.

Полипропилен (ТУ 6-05-1105-78) является производным этилена. Макромолекула полипропилена имеет следующую химическую формулу: $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]$. По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую механическую прочность и жесткость, большую теплостойкость и меньшую склонность к старению. Разрушающее напряжение при растяжении полипропилена достигает 25...40 МПа. Недостатком полипропилена является его невысокая морозостойкость (-20 °С). Детали из полипропилена изготавливают штампованием, литьем под давлением, пневматическим и вакуумным прессованием; полипропилен можно сваривать, напылять на металл, ткань, картон.

Полипропилен легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках. Полипропилен применяют для изготовления антикоррозионной футеровки резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, а также для изготовления деталей, применяемых при работе в агрессивных средах.

Из полипропилена изготавливают части кузовов автомобилей, корпуса аккумуляторов, прокладки, трубы, фланцы, водонапорную арматуру, пленки, пленочные покрытия бумаги и картона, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздушных систем, рабочие детали вентиляторов, насосов, уплотнения, детали приборов и автоматов точной механики, кулачковые механизмы, детали бытовой радиоаппаратуры, холодильников, стиральных машин, изоляцию проводов и кабелей. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки.

Полистирол (ГОСТ 20282-86Е) относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс. Его макромолекула имеет следующую формулу: $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]$. Полистирол — твердый, жесткий, бесцветный, прозрачный, аморфный полимер, легко окрашиваемый в различные цвета. Обладает высокой водостойкостью, хорошей химической стойкостью в растворах солей, кислот и щелочей. По сравнению с другими термопластами более стоек к радиации. Недостатками полистирола являются повышенная хрупкость при ударных нагрузках, склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость. Интервал рабочих температур - 40...+ 65 °С. Полистирол применяют для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры, предметов домашнего обихода, детских игрушек, трубок для изоляции проводов, пленок для изоляции электрических кабелей и конденсаторов, открытых емкостей (лотки, тарелки и др.), прокладок, втулок, светофильтров, деталей электропылесосов (колодки, щелевые сопла, прокладки, ручки), мебельной фурнитуры, конструктивных изделий с антистатическими свойствами. Ударопрочным полистиролом (механическая смесь полистирола с каучуком) облицовывают пассажир-

ские вагоны, салоны автобусов и самолетов. Из него изготавливают крупногабаритные детали холодильников, корпуса радиоприемников, телефонных аппаратов и др.

Полистирол применяют для изготовления деталей машин и аппаратов, непосредственно контактирующих с пищевыми продуктами (молоком и молочными продуктами, вином, коньяком, шампанским и др.), а также для изготовления тары и упаковки. Его используют для изготовления пористых материалов.

В числе различных синтетических материалов широкое распространение получили так называемые *газонаполненные пластики*. Эти материалы разделяются на *пенопласты* и *поропласты*. У пенопластов микроскопические ячейки, наполненные газом, не сообщаются между собой, и плотность таких материалов, как правило, менее $0,3 \text{ г/см}^3$. Ячейки у поропластов сообщаются между собой, и их плотность несколько выше. Пенопласты и поропласты выпускают на основе полистиролов, поливинилхлорида и различных эфирных полимеров. Пенопласт применяют в качестве теплоизоляционного слоя в конструкциях судовых трюмов, кузовов автофургонов, холодильных камер на объектах мясомолочной и рыбной промышленности.

Пенополистирол получают из эмульсионного полимера прессовым и беспрессовым методами. Пенополистиролы могут работать при температурах до $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Недостатком пенополистирола является присутствие в нем горючего порообразователя, например, изопентана. Уменьшить или вовсе устранить эту опасность удастся введением антипиренов, например, оксида сурьмы. Пенополистирол применяется в различных отраслях промышленности как термо- и звукоизоляционный материал, в пищевой промышленности — для изоляции трюмов для хранения продуктов питания при температуре $-15...-35 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности пенополистирола близок к теплопроводности воздуха. Благодаря хорошим амортизационным свойствам и малой плотности пенополистирол используют в качестве упаковочного материала. Для производства изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, используют обычно суспензионный полистирол.

Пластмассы на основе поливинилхлорида (ГОСТ 5960-72, ГОСТ 9639-71, ГОСТ 9998-80, ГОСТ 16214-86, ГОСТ 16272-79) имеют хорошие электроизоляционные свойства. Они стойки к воздействию химикатов, не поддерживают горения, ат-

мосферо-, водо-, масло- и бензостойки. Поливинилхлорид имеет химическую формулу $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]$. Непластифицированный поливинилхлорид называется **винипластом**. Винипласты имеют высокие механическую прочность и упругость, но сравнительно малопластичны. Винипласты стойки к воздействию почти всех минеральных кислот, щелочей и растворов солей. Их недостатками являются склонность к ползучести, низкая ударная вязкость, малая теплостойкость, резкая зависимость от температуры.

Винипласт выпускают в виде листов, прутков или труб. Винипластовые детали хорошо механически обрабатываются и свариваются. Из него изготавливают трубы для транспортирования воды, агрессивных жидкостей и газов, коррозионно-стойкие емкости, защитные покрытия для электропроводки, детали вентиляционных установок, теплообменников, шланги вакуум-проводов, защитные покрытия для металлических емкостей, изоляцию проводов и кабелей. Поливинилхлорид используют для получения пенопластов, линолеума, искусственной кожи, объемной тары, товаров бытовой химии, вибропоглощающих материалов в машиностроении и на всех видах транспорта, водо-, бензо- и антифризостойких трубок, прокладок и т.д.

Фторопласты (ГОСТ 21000-81, ГОСТ 10007-80Е, ГОСТ 14906-77, ГОСТ 25428-82) - полимеры фторпроизводных этиленового ряда. Фторопласты имеют предел прочности: при растяжении 15...35 МПа; при изгибе - 10...15 МПа; относительное удлинение при разрыве 250...350 %. Наиболее широкое распространение получил фторопласт-4, или **политетрафторэтилен (тефлон)**. Он имеет структурную формулу $[\text{CF}_2-\text{CF}_2-]$. Он характеризуется высокими плотностью (2,1...2,3 г/см³), термо- и морозостойкостью. Интервал рабочих температур при эксплуатации изделий из фторопласта-4 составляет -269...+260 °С. Пленка из него не охрупчивается даже в среде жидкого гелия. Фторопласты широко применяют в электро- и радиотехнической промышленности, а также для изготовления химически стойких труб, кранов, мембран, насосов, подшипников, деталей медицинской техники, коррозионно-стойких конструкций, тепло- и морозостойких деталей (втулок, пластин, дисков, прокладок, сальников, клапанов), для облицовки внутренних поверхностей различных криогенных емкостей.

Полиамиды (ГОСТ 10589-87, ГОСТ 17648-83) включают группу известных термопластичных пластмасс (таких как *нейлон*, *капрон* и др.). Макромолекула полиамида состоит из амидной $-NH-CO$ и метиленовой $-CH_2$ групп и имеет общий вид $[-NH-CO-(CH_2)-]$, где метиленовые группы повторяются от 2 до 100 раз. Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение (более 400 МПа), ударопрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок. Они имеют низкий коэффициент трения и могут использоваться в качестве подшипников, как без смазки, так и при применении смазочных материалов. Полиамиды используют для изготовления конструкционных и электроизоляционных изделий (зубчатые передачи, уплотнительные устройства, втулки, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, жиров и углеводов; технические изделия и товары культурно-бытового назначения, антифрикционные покрытия металлов).

Полиуретаны (ТУ 6-05-221-479-79) - наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопластичные полимеры. Полиуретаны содержат уретановую группу $[-NH-COO-]$. Они характеризуются высокими модулем упругости, износостойкостью, вязким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, атмосферостойкостью, а также стойкостью к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до -70 °С. Волокна из полиуретана малогигроскопичные и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

Поликарбонат (ТУ 6-06-68-89, ТУ 6-06-95-90) - термопластичный полимер на основе дифенилпропана, выпускаемый под названием *дифлон*. Поликарбонат характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, он не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается, стоек к световому старению и действию окислителей даже при нагреве до 120 °С. Это один из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крыш-

ки, клапаны и другие детали, сосуды для транспортировки фруктовых соков, молока, вин и т.д. Его можно использовать в криогенной технике для работы в среде жидких газов. Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются введением в них армирующих волокон. Хорошо зарекомендовали себя наполненные стекловолокном полипропилен, полистирол и некоторые другие термопласты. Термопласты, армированные стекловолокном, имеют более высокие механические свойства и обеспечивают неизменность формы изделий в условиях повышенных температур. Производство таких термопластичных материалов с каждым годом растет на 25...30 %. Их применяют при изготовлении самых различных деталей в электронной и электротехнической промышленности, оптическом и точном приборостроении, автомобилестроении, текстильном машиностроении и т.д.

Термореактивные пластмассы изготавливают на основе термореактивных полимеров, которые до нагрева имеют линейную структуру, а при нагреве размягчаются, затем в результате протекания химических реакций приобретают пространственную структуру и превращаются в твердое вещество, сохраняя и в дальнейшем высокую твердость. Последующий нагрев не размягчает. Готовый термореактивный полимер не плавится и не растворяется, поэтому в отличие от термопластичного не может подвергаться повторной переработке.

Основу всякого реактопласта составляет химически затвердевающая термореактивная смола - связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители и растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу.

Таблица 5.2

Типы термореактивных пластмасс и их области применения

Тип пластмассы	Прочность при растяжении, МПа	Интервал рабочих тем-р, °С	Область применения
Фенопласт (фенол-формальдегид)	30	-60...+140	Мало нагруженные детали, корпуса приборов, панели, электроизоляционные дета-

			ли
Аминопласт (карбамидо-формальдегид или меламино-формальдегид)	80	-60...+130	Детали осветительной аппаратуры, электротехнические и электроизоляционные детали, изделия бытового назначения
Волокнит (смола + волокна хлопка)	50	-60...+200	Шкивы, маховики, втулки, диски, кожухи, детали с повышенными антифрикционными свойствами
Асболокнит (смола+волокна асбеста)	60	-60...+200	Теплоизоляция
Стекловолокнит (смола+стекловолокно)	80-500	-60...+200	Электротехнические детали, корпуса приборов, кузова машин
Текстолит (смола+хлопчатобумажная ткань)	95	-40...+160	Шестерни, втулки, подшипники скольжения, конструкционные и электроизоляционные детали

К пластмассам с порошковыми наполнителями относятся *фенопласты* (ГОСТ 5689-79) и *аминопласты* (ГОСТ 9359-80). Из них изготавливают не силовые конструкционные и электроизоляционные детали (рукоятки, детали приборов, кнопки и т.д.), различные вытяжные и формовочные штампы, корпуса сборочных и контрольных приспособлений, литейные модели и другую оснастку.

Фенопласты — термоупрочняемые пластмассы. Неупрочненные смолы получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. Существует два основных типа фенолформальдегидных смол: *новолаки* и *резолы*. Для получения пластмассы с хорошими потребительскими свойствами в новолаки добавляют субстанцию (обычно уротропин), которая при нагревании разлагается с выделением формальдегида. Формальдегид, добавляемый к новолаковой смоле, образует упрочняющиеся гидроксиметильные группы. Упрочнение термопластов в основном происходит в интервале температур 140...180 °С, но, благодаря соответствующим добавкам кислот, некоторые резолы можно отверждать уже при 25 °С и выше. Резолы получают в спиртовых средах, применяя избыток формальдегида. Продукт содержит гидроксиды

метиленовую группу. Во время нагревания происходит необратимое упрочнение (реакция образования сетчатой структуры), поэтому резола прессуют в формах.

Упрочненные фенолформальдегидные смолы чаще носят название **бакелитов**. Эта пластмасса хорошо обрабатывается механически инструментами для обработки металла и может полироваться. Бакелит из новолака имеет большую термостойкость (100...150 °С) чем бакелит из резола, но худшие диэлектрические свойства. Бакелит трудногорюч, а после извлечения из пламени сразу гаснет. Горящий бакелит дает желтый цвет пламени, коптящий в зависимости от вида наполнителя. Остаток, извлеченный из пламени, твердый, разбухший, потрескавшийся и обугленный. В процессе горения выделяются фенол и формальдегид с характерным запахом. Бакелит стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, а также большинства органических растворителей. Из бакелита изготавливают изделия галантереи (пуговицы, пепельницы), электротехнические элементы (вилки, розетки), корпуса радио- и телефонных и аппаратов, детали стиральных машин, защитные шлемы, корпуса аккумуляторов, плиты, лаки, клеи.

Аминопласты являются термоупрочняемыми пластмассами. К ним относятся карбамидоформальдегидные смолы и меламиноформальдегидные смолы. Неупрочненную смолу получают при поликонденсации формальдегида с карбамидом (карбамидоформальдегидная смола) или меламином (меламиноформальдегидная смола). Эти смолы имеют реактивные группы, которые под влиянием нагрева (или кислотных катализаторов) способны к упрочнению (приобретают пространственную сетчатую структуру). Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего (смолы) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

Волокниты применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.).

Асбоволокниты обладают хорошими фрикционными (тормозными) свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической проницаемости уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

Стекловолокониты негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолоконитов применяют для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т.п.). Стекловолокониты имеют высокие физико-механические характеристики, их применяют для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокониты могут работать при температуре 60...+200 °С и имеют предел прочности при разрыве 80...500 МПа. В качестве связующих смол волоконитов и стекловолоконитов применяются полиэстеровые и эпоксидные смолы. Перед отверждением смола имеет вид густого сиропа золотистого цвета. Отверждение проводят в форме при комнатной температуре после добавления инициатора (обычно сверхоксид бензола или гидроксид циклогексана) в количестве около 4 %. Механические свойства отвержденного продукта зависят от строения исходной смолы и способа ее отверждения. Изделие может быть гибким, эластичным или твердым и хрупким. Твердые изделия можно подвергать механической обработке инструментами по дереву, а также полировать.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) используют при изготовлении мебели, для внутренней облицовки пассажирских поездов, судов, самолетов, при строительстве — в качестве облицовочного материала. Древесно-слоистые пластики обладают хорошими антифрикционными свойствами. В некоторых случаях они заменяют высокооловянистую бронзу, баббит, текстолит. Химическая стойкость ДСП не очень высока, но выше, чем у обычной древесины. Теплостойкость ДСП достигает 140 °С. Их недостатком является набухание, обусловленное поглощением воды.

Стеклотекстолитами (ГОСТ 10292 -74Е, ГОСТ 12652-74) называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконистых материалов. Их характеризуют высокие тепло- и хладостойкость, стойкость к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокие механические свойства. Стеклотекстолиты

применяют для изготовления крупногабаритных изделий, радиотехнических и электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200 °С и кратковременно - при 250 °С.

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками. Резина (от лат. *resina* «смола») состоит из смеси каучука $(C_5H_8)_n$ (основа), наполнителя (сажа, оксид кремния, оксид титана, мел, барит, тальк), размягчителя (канифоль, вазелин), противостарителя (парафин, воск) и агентов вулканизации (сера, оксид цинка).

С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серой (до 30-50 %) получают твердую резину (эбонит). Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами. В резину используют следующие типы каучуков: натуральный (НК), бутадиеновый синтетический (СКБ), изопреновый синтетический (СКИ), бутадиен-нитрильный (СКИ), силоксановый (СКТ), фторкаучук (СКФ), бутадиен метилстирольный (СКМС), бутадиенстирольный (СКС).

Таблица 5.3

Типы резин и их области применения

Наименование группы резин	Состав (каучуки и ингредиенты)	Назначение, характеристика	Область применения
Общего назначения	НК, СКИ, СКД, СКС и др.	Для эксплуатации при t -рах от -50 до 160° С в отсутствие масел, топлив и агрессивных сред	Шины, РТИ, транспортные ленты, приводные ремни, амортизаторы, резиновая обувь и др.
Теплостойкие	СКТ, СКФ, БК, СКЭП, АК	Для длительной эксплуатации при температурах 150-200° С и выше	Теплостойкие РТИ

Морозостойкие	СКС, НК, СКИ, СКС в комбинации с СКД, СКТ и др.	Для эксплуатации при температурах до -60° С и ниже	Морозостойкие РТИ
Стойкие к действию химических агрессивных сред	СКС, СКЭП, СКЭПТ, БК, ХК, СКН, ХСПЭ, СКФ, СКТ и др.	Для длительной эксплуатации в контакте с кислотами, щелочами, окислителями, паром и т. п.	Гуммирование химической аппаратуры, уплотнители, шланги и др. РТИ
Диэлектрические	Диэлектрические марки СКИ, СКД, СКС, СКЭП(Т), БК, СКТ с использованием минеральных наполнителей и неполярных пластификаторов	Для работы в условиях высоких напряжений; обладают малыми диэлектрическими потерями	Изоляция проводов и кабелей, специальные перчатки, обувь, ковры и др.
Электропроводящие	НК, СКС, СКН, ХК и др. с использованием ацетиленовой сажи и графита	Для токопроводящих покрытий, нагревательных элементов, печатных схем	Антистатические РТИ, обувь, покрытия, защитная одежда, мед. изделия, кабели дальней связи и др.
Радиационностойкие	СКУ, СКС, СКИ, СКН, ХК и др. с использованием антирадов	Для работы под действием рентгеновских лучей и ионизирующих излучений	Детали рентгеновской аппаратуры, защитная одежда и др.

ТЕМА 6. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционный материал – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ).

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые упрочнителями. Они имеют высокую прочность, твердость, и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые (рис. 6.1).

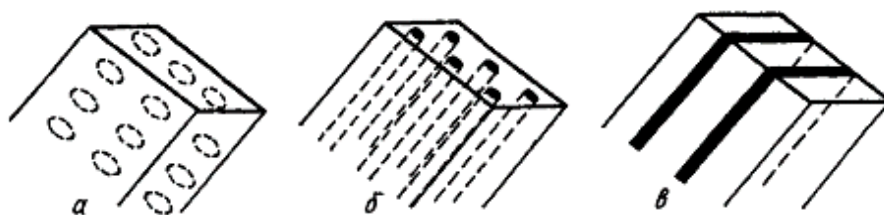


Рис.6.1. Типы упрочняющих наполнителей КМ.

Механическое поведение композиции определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик.

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композиции, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, наличие границ раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала, и в композициях, в отличие от однородных металлов, повышение статической прочности приводит не к снижению, а, как правило, к повышению характеристик вязкости разрушения.

6.1 Волокнистые композиционные материалы

Часто композиционный материал представляет собой слоистую структуру, в которой каждый слой армирован большим числом параллельных непрерывных во-

локон. Каждый слой можно армировать также непрерывными волокнами, сотканными в ткань, которая представляет собой исходную форму, по ширине и длине соответствующую конечному материалу. Нередко волокна сплетают в трехмерные структуры.

Прочность композиционных (волокнистых) материалов определяется свойствами волокон; матрица в основном должна перераспределять напряжения между армирующими элементами. Поэтому прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Жесткие армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композиции при нагружении, придают ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон.

Композиционные материалы на металлической основе обладают высокой прочностью и жаропрочностью, в то же время они малопластичны. Однако волокна в композиционных материалах уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исчезает внезапное хрупкое разрушение. Отличительной особенностью волокнистых одноосных композиционных материалов являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения.

Основным недостатком композиционных материалов с одно и двумерным армированием является низкое сопротивление межслойному сдвигу и поперечному обрыву. Этого лишены материалы с объемным армированием.

6.2 Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

В отличие от волокнистых композиционных материалов в дисперсно-упрочненных композиционных материалах матрица является основным элементом, несущим нагрузку, а дисперсные частицы тормозят движение в ней дислокаций. Высокая прочность достигается при размере частиц 10-500 нм при среднем расстоянии между ними 100-500 нм и равномерном распределении их в матрице. Прочность и жаропрочность в зависимости от объемного содержания упрочняющих фаз не подчиняются закону аддитивности. Оптимальное содержание второй фазы для различных металлов неодинаково, но обычно не превышает 5-10 об. %.

Наиболее широко используют сплавы на основе алюминия – САП (спеченный алюминиевый порошок).

Плотность этих материалов равна плотности алюминия, они не уступают ему по коррозионной стойкости и даже могут заменять титан и коррозионно-стойкие стали при работе в интервале температур 250-500 °С. По длительной прочности они превосходят деформируемые алюминиевые сплавы. Длительная прочность для сплавов САП-1 и САП-2 при 500 °С составляет 45-55 МПа.

Большие перспективы у никелевых дисперсно-упрочненных материалов. Наиболее высокую жаропрочность имеют сплавы на основе никеля с 2-3 об. % двуоксида тория или двуоксида гафния. Матрица этих сплавов обычно твердый раствор Ni + 20 % Cr, Ni + 15 % Mo, Ni + 20 % Cr и Mo. Широкое применение получили сплавы ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью тория), ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния) и ВД-3 (матрица Ni +20 % Cr, упрочненная окисью тория). Эти сплавы обладают высокой жаропрочностью. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы, так же как волокнистые, стойки к разупрочнению с повышением температуры и длительности выдержки при данной температуре.

6.3 Стекловолокниты

Стекловолокниты – это композиция, состоящая из синтетической смолы, являющейся связующим, и стекловолокнистого наполнителя. В качестве наполнителя применяют непрерывное или короткое стекловолокно. Прочность стекловолокна резко возрастает с уменьшением его диаметра (в следствие влияния неоднородностей и трещин, возникающих в толстых сечениях). Свойства стекловолокна зависят также от содержания в его составе щелочи; лучшие показатели у бесщелочных стекол алюмоборосиликатного состава.

Неориентированные стекловолокниты содержат в качестве наполнителя короткое волокно. Это позволяет прессовать детали сложной формы, с металлической арматурой. Материал получается с изотопными прочностными характеристиками, намного более высокими, чем у пресс-порошков и даже волокнитов. Представителями такого материала являются стекловолокниты АГ-4В, а также ДСВ (дозирующиеся стекловолокниты), которые применяют для изготовления силовых электротехни-

ческих деталей, деталей машиностроения (золотники, уплотнения насосов и т. д.). При использовании в качестве связующего непредельных полиэфиров получают премиксы ПСК (пастообразные) и препреги АП и ППМ (на основе стеклянного мата). Препреги можно применять для крупногабаритных изделий простых форм (кузова автомашин, лодки, корпуса приборов и т. п.).

6.4 Карбоволокниты

Карбоволокниты (углепласты) представляют собой композиции, состоящие из полимерного связующего (матрицы) и упрочнителей в виде углеродных волокон (карбоволокон).

Высокая энергия связи С-С углеродных волокон позволяет им сохранить прочность при очень высоких температурах (в нейтральной и восстановительной средах до 2200 °С), а также при низких температурах. От окисления поверхности волокна предохраняют защитными покрытиями (пиролитическими). В отличие от стеклянных волокон карбоволокна плохо смачиваются связующим (низкая поверхностная энергия), поэтому их подвергают травлению. При этом увеличивается степень активирования углеродных волокон по содержанию карбоксильной группы на их поверхности. Межслойная прочность при сдвиге углепластиков увеличивается в 1,6-2,5 раза. Применяется вискеризация нитевидных кристаллов TiO_2 , Al_4N_3 , что дает увеличение межслойной жесткости в 2 раза и прочности в 2,8 раза. Применяются пространственно армированные структуры.

Связующими служат синтетические полимеры (полимерные карбоволокниты); синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (коксованные карбоволокниты); пиролитический углерод (пироуглеродные карбоволокниты).

6.5 Карбоволокниты с углеродной матрицей

Коксованные материалы получают из обычных полимерных карбоволокнитов, подвергнутых пиролизу в инертной или восстановительной атмосфере. При температуре 800-1500 °С образуются карбонизированные, при 2500-3000 °С графитированные карбоволокниты. Для получения пироуглеродных материалов упрочнитель выкладывается по форме изделия и помещается в печь, в которую пропускается газообразный углеводород (метан). При определенном режиме (температуре 1100 °С и

остаточном давлении 2660 Па) метан разлагается и образующийся пиролитический углерод осаждается на волокнах упрочнителя, связывая их.

Карбоволокнит с углеродной матрицей типа КУП-ВМ по значениям прочности и ударной вязкости в 5-10 раз превосходит специальные графиты; при нагреве в инертной атмосфере и вакууме он сохраняет прочность до 2200 °С, на воздухе окисляется при 450 °С и требует защитного покрытия. Коэффициент трения одного карбоволокнита с углеродной матрицей по другому высок (0,35-0,45), а износ мал (0,7-1 мкм на торможение).

6.6 Бороволокниты

Бороволокниты представляют собой композиции из полимерногосвязующего и упрочнителя – борных волокон.

Бороволокниты отличаются высокой прочностью при сжатии, сдвиге и срезе, низкой ползучестью, высокими твердостью и модулем упругости, теплопроводностью и электропроводимостью. Ячеистая микроструктура борных волокон обеспечивает высокую прочность при сдвиге на границе раздела с матрицей.

В качестве матриц для получения бороволокнитов используют модифицированные эпоксидные и полиимидные связующие. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1к предназначены для длительной работы при температуре 200 °С; КМБ-3 и КМБ-3к не требуют высокого давления при переработке и могут работать при температуре не выше 100 °С; КМБ-2к работоспособен при 300 °С.

Бороволокниты обладают высокими сопротивлениями усталости, они стойки к воздействию радиации, воды, органических растворителей и горюче-смазочных материалов.

6.7 Органоволокниты

Органоволокниты представляют собой композиционные материалы, состоящие из полимерного связующего и упрочнителей (наполнителей) в виде синтетических волокон. Такие материалы обладают малой массой, сравнительно высокими удельной прочностью и жесткостью, стабильны при действии знакопеременных нагрузок и резкой смене температуры. Для синтетических волокон потери прочности при текстильной переработке небольшие; они малочувствительны к повреждениям.

К органоволокнистым значениям модуля упругости и температурных коэффициентов линейного расширения упрочнителя и связующего близки. Происходит диффузия компонентов связующего в волокно и химическое взаимодействие между ними. Органоволокнистые устойчивы в агрессивных средах и во влажном тропическом климате; диэлектрические свойства высокие, а теплопроводность низкая. Большинство органоволокнистых может длительно работать при температуре 100-150 °С, а на основе полиимидного связующего и полиоксидазольных волокон – при температуре 200-300 °С.

В промышленности обычно применяют дисперсно-упрочненные композиты на алюминиевой и, реже, никелевой основах. Характерными представителями этого вида композитов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче, в ней повышается содержание оксида алюминия.

Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает в себя холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с содержанием Al_2O_3 6...9 % - и при комнатной температуре. Из них холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Эти материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Марки САП, применяемые в России, содержат 6...23 % Al_2O_3 . Различают САП-1 с содержанием 6... 9 %, САП-2 с 9...13 %, САП-3 с 13...18 % Al_2O_3 . С увеличением объемной концентрации оксида алюминия возрастает прочность композитов. Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации.

Характеристики прочности сплавов типа САП весьма стабильны. Испытания длительной прочности сплавов типа САП-3 в течение 2 лет практически не повлияли на уровень проявления их свойств, как при комнатной температуре, так и при нагреве до 500 °С. При 400 °С прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов. Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 500 °С. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

Синтегран. Слово «синтегран» означает синтетический гранит. Синтегран используют для изготовления инструмента, специальной оснастки, ответственных деталей и1080 измерительных комплексов, высокоточных и специальных станков (точность обработки которых составляет 0,001 мкм), шпал для метрополитена, изделий бытового и мемориального назначения, а также многих других деталей.

Поскольку состояние современного литейного производства не позволяет поставлять чугунные отливки конструктивных элементов металлорежущих станков требуемого качества, станкостроительные заводы вынуждены использовать при изготовлении станин станков альтернативные материалы. В частности, даже для изготовления станин универсальных станков стали использовать модифицированные бетоны.

Для изготовления элементов станков, обладающих особо высокой точностью и работающих в области высокочастотных колебаний (расточные, шлифовальные станки, станки для физико-химических методов обработки и др.), целесообразно использовать синтегран, который на данном этапе развития станкостроения является безальтернативным материалом.

Синтегран состоит из полимерного связующего и высоко-прочных минеральных наполнителей и заполнителей. Полимерное связующее состоит из смолы и отвердителя. От вида связующего, его содержания зависят свойства и физико-механические характеристики композита.

Наполнители — это мелкодисперсные порошки с размером частиц менее 100 мкм. При изготовлении синтеграна в качестве наполнителя используют кислотоустойчивый порошок марки ПК-1, который представляет собой помол переплава габбродиабазы и пироксенового порфита.

Заполнители — это различные фракции минерального вещества (щебня) с размерами зерен 6,3...20 мм. От вида, количества и размера фракций заполнителя зависят прочностные свойства материала. При изготовлении синтеграна используют щебень габбродиабазы.

Поводом для разработки синтеграна послужило то, что многие конструкции высокоточных станков, оснастки и инструмента, выполненные из металла, не соответствуют предъявляемым требованиям, а изготовление их из натурального камня, например гранита, весьма трудоемко и экономически невыгодно. Существуют конструкции, которые из натурального минерала выполнить технически невозможно.

Использование же синтеграна снимает перечисленные проблемы.

По сравнению с чугуном, который традиционно применяется при изготовлении несущих элементов станков, синтегран имеет ряд преимуществ:

- более высокие демпфирующие способности;
- высокая тепловая стабильность и нечувствительность к кратковременному перепаду температур;
- высокая временная стабильность геометрических размеров из-за малых внутренних напряжений;
- высокая стойкость к действию агрессивных сред;
- малая усадка, позволяющая изготавливать детали без последующей механической обработки;
- высокий коэффициент использования материала (практически равный 1);
- простота и малые габаритные размеры используемого оборудования, высокая производительность при малых энергозатратах;
- возможность полной автоматизации технологического процесса изготовления.

Замена изделий из чугуна на изделия из синтеграна позволяет значительно повысить точность изготавливаемых станков, измерительных комплексов и отдельных узлов и деталей, а также снизить трудовые и материальные затраты.

При производстве высокоточного оборудования в таких странах, как Германия, США, Франция, Швейцария, Великобритания и Япония целенаправленно используют материалы, аналогичные синтеграну, и серийно выпускают станки, измерительные комплексы, приспособления и оснастку с элементами, выполненными из композитов.

В зависимости от назначения различают три основных типа синтеграна:

- 1) для изготовления корпусных деталей станков — синтеграны, которые обладают высокой жесткостью, прочностью, стабильностью размеров и физико-механических характеристик во времени. К этому типу материалов не предъявляют дополнительные требования по высокой износостойкости, низкому коэффициенту трения и т.п., поскольку эти детали не подвергаются механической обработке, а их рабочие поверхности выполняют из других материалов;
- 2) изготовления корпусов инструмента и специальной оснастки, а также деталей измерительных машин и приборов — синтефаны, обладающие перечисленными свойствами, а также обладающие высокими износостойкостью и термостабильностью и возможностью механической обработки;
- 3) изготовления деталей оснастки и станков для физико-химических методов обработки — синтеграны, обладающие повышенной стойкостью к агрессивным средам, а также имеющие специальные свойства, например диэлектрические.

Кроме того, изготавливаемые детали отличаются друг от друга по размеру, массе, толщине стенок, что также влияет на состав синтегранов. Поскольку компонентами синтегранов являются наполнители, заполнители и полимерное связующее, то от их свойств и соотношения решающим образом зависят и свойства готового материала.

Слоистые стеклопластики на основе тканей называются *стеклотекстолитами*. Наиболее высокие механические характеристики имеют стеклотекстолиты на основе однослойных тканей сатинового переплетения. Применение многослойных

стеклотканей увеличивает межслоевую прочность пластика, упрощает сборку заготовки изделия, уменьшая число ручных операций. Такие композиты широко используют в судостроении, авиации, в космической технике, автомобилестроении, при изготовлении некоторых бытовых приборов. В качестве связующего используют как терморезактивные смолы (эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и др.), так и термопластичные.

Композиты на основе высокопрочных арамидных волокон — **органопластики** обладают высокими прочностными и упругими характеристиками, ударной вязкостью, высокой химической стойкостью, высокими теплоизоляционными и диэлектрическими свойствами, плохо горят и выделяют мало дыма.

Органопластики - самые легкие полимерные композиты, их плотность составляет 1250...1350 кг/м³. При изготовлении современных вертолетов с использованием органопластиков повышается их эксплуатационная надежность, производственный цикл сокращается примерно в 3 раза, достигается снижение массы агрегатов на 20...30 %, снижается трудоемкость и увеличивается ресурс их работы.

В пассажирских самолетах ТУ-204, ИЛ-96-300, ИЛ-114, ТУ- 334 органопластики использованы в панелях пола, деталях внешнего контура, обшивке салонов. Так, в самолете ТУ-204 масса органопластиков составляет примерно 3 т, в самолете ИЛ-96-300 - 1,5 т. Органопластики используют при изготовлении защитных экранов в корпусах вентиляторов турбореактивных двигателей, поскольку они могут выдерживать механический удар при столкновении самолета с птицей. Например, вентиляторы двигателей самолетов «Руслан» имеют защитные кольца диаметром 2,5 м и толщиной 45 мм, и могут выдерживать при скорости 300 м/с удар осколков массой до 1 кг.

Угленластики — композиты на основе высокопрочных углеродных волокон — наиболее перспективные композиты. Они обладают высокими прочностью и жесткостью, термостойкостью до 570 К, низким температурным коэффициентом линейного расширения, стойкостью к агрессивным средам. В них в качестве армирующих элементов применяют непрерывные волокна в виде нитей, жгутов, тканей или нетканых материалов. Матрицы изготавливают из эпоксидных, полиамидных,

полиэфирных или других смол. Углепластики используют в конструкциях современных самолетов, например «Руслан», Су-30МК, Су-34, С-37 «Беркут», МИГ-29, космических кораблей многоразового использования «Буран», что доказывает их высокую техническую эффективность и эксплуатационную. В автомобильной промышленности из углепластиков изготавливают элементы несущего кузова и подвески, передаточные узлы механизмов трансмиссии, силовые каркасы сидений, детали двигателей внутреннего сгорания, бамперы. Применение углепластиков позволяет снизить массу, повысить эксплуатационные характеристики автомобиля и снизить коррозию. Углепластики КМУ-3 применяют в конструкциях планеров «Нямунас», «Литува», малогабаритного беспилотного самолета-разведчика «Перо-1», дистанционно-пилотируемого летательного аппарата «Дятел-1», управляемого снаряда УС-К, легкого спортивного самолета СУ-26М и др. Например, использование углепластика КМУ-11 при изготовлении крыльев и других элементов самолета СУ-26М позволило снизить массу планера на 120 кг. Кроме того, упрощается технология изготовления, снижается расход топлива, повышаются летные характеристики самолета.

Слоистые композиционные материалы. Материалами основы композитов со слоистым строением служат пластмасса, металл или керамика. В качестве наполнителей применяют полимерные волокна, ленты из тканей, трикотажа и других материалов. Хорошо известные ламинаты изготавливают из смол, армированных полимерными волокнами или стеклотканью. Их широко применяют в строительстве, машиностроении, мебельной промышленности, спортивном снаряжении, предметах домашнего хозяйства и т.д. К этой же группе композитов относятся абляционные материалы для тепловой защиты ракет, изготовленные на базе феноло-формальдегидных смол с углеродным или стекловолокном. В этих материалах часто используют стеклоткань, которая при многослойном нанесении обеспечивает высокие механические свойства изделий, например тонкостенных труб, втулок и др. Встречаются композиты, в которых слоистым связующим являются алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольги, а слоями, определяющими специальные свойства и применение — керамические материалы, интерметаллидные соединения или другие металлы. Слоистые керамические композиты использу-

ют в экстремальных условиях. Компонентами этого типа композиционных материалов чаще всего являются керамические материалы, углерод и металлы, например, корунд, пиролитический графит, карбиды, оксиды, нитриды в композиции с алюминием, медью, титаном, никелем, кобальтом, танталом, железом. Такие материалы нашли применение в космических аппаратах, в которых теплоизоляционные силикатные плитки изготовлены из корунда, боросиликата, углеродных карборундовых ламинатов.

ТЕМА 7. КЛЕЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И ГЕРМЕТИКИ

Клеи и герметики относятся к пленкообразующим материалам. Это растворы или расплавы полимеров, а также неорганические вещества, наносимые на поверхность. После высыхания (затвердевания) образуются прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. Они могут быть в виде жидкостей, паст, замазок, пленок, порошка.

Склеивание - процесс образования адгезионного соединения (соединения двух частей или деталей материала), применяется как в производстве товаров народного потребления, так и в быту - наклеивание обоев, ремонт обуви, мебели, склеивание фарфора, кожи, тканей, герметизация швов и трещин строительных конструкций.

К клеящим материалам относят клеи, липкие ленты и клей-герметики.

Клеи - это адгезивы, которые применяют для соединения различных материалов за счет образования прочной связи пленки клея с поверхностями склеиваемых материалов. Наряду с традиционными клеями большое распространение получают клеи-герметики, служащие для уплотнения и защиты различных бытовых изделий и предметов от воздействия воды, воздуха, агрессивных сред и тепла.

Адгезионное соединение формируется за счет различных процессов:

— испарения органических растворителей или воды из клея-раствора, например, нитроцеллюлозного клея, силикатного клея;

— за счет химических реакций между компонентами клея, в частности за счет реакции сшивания макромолекул (эпоксидный клей);

— за счет охлаждения массы клея (клей-расплав).

Основным показателем качества клея является его адгезионная, или клеящая, способность, она определяется по прочности соединения двух стандартных образцов различными методами на сдвиг, скалывание, отслаивание.

Вязкость характеризует текучесть клея, от вязкости зависит сохранность клея. Определяется показатель вязкости по времени истечения определенного объема клея на приборах различной конструкции, называемых вискозиметрами. Клей не способен выполнять свою основную функцию — склеивание, если он теряет текучесть (кроме клея-расплава).

Универсальность — это способность клея склеивать широкий круг материалов различной природы, она определяется химическим составом клея. К универсальным клеям относят клеи на основе синтетических смол.

Химическая стойкость клея определяется отношением клеевого вещества к действию воды, кислот, щелочей, органических растворителей.

Термическая стойкость клеевого соединения характеризуется его стойкостью к перепадам температуры при кратковременном и длительном воздействии.

Безопасность клеев определяется безвредностью их компонентов для человека. Для клеев, содержащих цианоакрилаты на маркировке дается информация: «Цианоакрилат».

Сохраняемость клеев — способность клея сохранять свои функциональные свойства в заданных пределах в течение определенного времени. Это время называется сроком хранения клея и совпадает со сроком годности.

Для многокомпонентных клеев с отвердителями (например, эпоксидных) важным свойством является жизнеспособность — время в течение которого клей, полученный смешением отдельных упаковок, пригоден для использования непосредственно перед применением. Жизнеспособность многокомпонентных синтетических клеев обычно равна 1,5—2 ч и в зависимости от вида клея может быть от нескольких секунд (цианоакрилаты), минут до нескольких часов.

Состав клеев. В состав клеев входит основа клея и растворители. В качестве растворителей используются вода или органические соединения: ацетон, этиловый

спирт, бензин, хлорпроизводные, ароматические соединения. Пластификаторы (дибутилфталат, диоктилфталат) применяются для повышения пластичности и (или) эластичности клеевых составов.

По природе клеящего вещества клеи бывают природного, искусственного или синтетического происхождения, органической или неорганической природы. Природные клеи бывают животного, растительного происхождения и минеральные. Природные клеи (казеиновый и декстриновый) обладают низкой водостойкостью, однако их достоинство — гигиенические и экологические свойства. Они разрешены для использования в материалах, контактирующих с пищевыми продуктами (склеивание пакетов, пачек, коробок). Основой клеев животного происхождения являются белковые вещества: коллаген (в мездровом и костном клеях) и казеин (в казеиновом клее). Мездровый и костный клеи называют коллагеновыми клеями.

Основой распространенных клеев растительного происхождения является крахмал (картофельный, кукурузный) и продукты его переработки (декстрины). К минеральным клеям относят силикатный и асфальтобитумные клеи. Силикатный клей — это концентрированный водный раствор силикатов натрия и калия (растворимое или жидкое стекло) переменного состава.

К органическим клеям относятся композиции на основе природных и синтетических полимеров. Синтетические клеи получают на основе синтетических терморезактивных и термопластичных смол и каучуков. Синтетические клеи классифицируют и называют по природе полимерной основы. Из эфиоцеллюлозных клеев для бытовых целей применяют клеи на основе карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), водные растворы которой используют в качестве обойного клея.

В состав клеев входят растворители — вода или органические соединения. В качестве органических растворителей используют ацетон, этиловый спирт, бензин, хлорпроизводные, ароматические соединения; пластификаторы (дибутилфталат, диоктилфталат); наполнители для уменьшения усадки при затвердевании клеевого слоя и повышения его прочности (кварцевый песок, каолин, мел). В клеи из ненасыщенных смол вводят отвердители, катализаторы, которые в продажу поступают в отдельной упаковке.

Наполнители — важные компоненты клеев, которые обеспечивают необходимую вязкость клея, уменьшают усадку при затвердевании клеевого слоя и повышают его прочность (кварцевый песок, каолин, мел и др.).

Отвердители входят в состав клея на основе ненасыщенных (термореактивных) смол. Вместе с ними используют катализаторы (ускорители) процесса отверждения. Они поступают в продажу в отдельной упаковке (двухупаковочные). Пленки термореактивных клеев при нагревании отвердевают необратимо.

Загустители и разбавители используют для регулирования вязкости клеев.

Стабилизаторы добавляют в клеи для повышения стойкости клеевых соединений к внешним воздействиям в процессе эксплуатации.

Для повышения жизнеспособности клеев растительного и животного происхождения, которые в водных растворах могут подвергаться процессам бактериального загрязнения, в них вводят антисептики. В полимерные клеи для повышения их стойкости к внешним воздействиям добавляют стабилизаторы.

Классификация клеев. Классификация клеев проводится по условиям склеивания, характеру склеивания, водостойкости клеевого соединения, по агрегатному состоянию, назначению и наименованию основы клея. По условиям склеивания клеи делят на контактные (склеивание без приложения давления) и липкие (постоянно липкие) — адгезивы, чувствительные к давлению. По характеру склеивания термореактивные клеи бывают холодного и горячего отверждения.

По водостойкости клеевого соединения клеи бывают высоководоупорные (кипящая вода), водоупорные (вода комнатной температуры) и нестойкие к холодной воде (клеи растительного и животного происхождения).

По агрегатному состоянию клеи бывают твердые (кусочки, прутки, хлопья (КМЦ-клей) и жидкие - в виде растворов (силикатный) или дисперсий (ПВА-эмульсия). Большое распространение получили клеи — расплавы. Это термопластичные безрастворные клеи с использованием сополимера СЭВА (этилен с винилацетатом), которые становятся текучими при повышенной температуре и твердыми при комнатной.

По назначению бытовые клеи подразделяются на четыре подгруппы: клеи хозяйственного назначения (клей обойный «МЦ», «Бустилат-М», клей обойный ПВА, клей «Момент»); клеи специального назначения (клей столярный, резиновый); универсальные (БФ, эпоксидный клей, клей 88-СА, Super Gluy (Супер клей), ПФ-14); канцелярские (ПВА, силикатный, казиновый).

Клеи природные называют по природе клеящей основы - казеиновый, мездровый, силикатный.

Синтетические клеи различаются по природе полимерной основы. Из эфироцеллюлозных клеев для бытовых целей применяют клеи на основе нитроцеллюлозы. В качестве клеящего вещества применяют также простой эфир целлюлозы и гликолевой кислоты — карбоксиметилцеллюлозу, водные растворы которой используют в качестве обойного клея. Достоинствами нитроцеллюлозных клеев являются их быстрое высыхание и высокая влагостойкость клеевых соединений; недостатком нитроцеллюлозных клеев является их высокая горючесть. Нитроцеллюлозные клеи часто применяют для склеивания кожи и ткани, особенно при пошиве и ремонте обуви.

Термореактивные синтетические клеи вырабатывают преимущественно из полиэфирных и эпоксидных смол. В большинстве случаев они представляют собой сиропообразные растворы этих смол в органических растворителях, их выпускают одно- и многокомпонентными. Однокомпонентные клеи поступают в продажу в готовом виде. Феноло-формальдегидные смолы в спиртовых растворах (клеи БФ) в настоящее время используют ограниченно вследствие токсичности фенола и формальдегида. Пленки термореактивных клеев при нагревании отвердевают необратимо.

Многокомпонентные клеи (обычно двухкомпонентные) содержат смолу и отвердитель, который добавляют к раствору смолы перед употреблением клея. Выпускают клеи горячего и холодного отверждения, отличающиеся по составу.

Мочевино-формальдегидные клеи (синтетические столярные) в отличие от феноло-формальдегидных применяют в виде водных растворов. По сравнению с феноло-формальдегидными клеями они имеют ряд преимуществ: бесцветны, светостойки и менее токсичны, но по прочности склеивания и водостойкости уступают феноло-формальдегидным.

Клеи на основе эпоксидных смол приобретают все возрастающее значение. Они отличаются исключительно высокой адгезионной способностью ко многим материалам, создают очень прочные клеевые соединения и применяются для самых разнообразных целей. Они считаются универсальными.

Поливинилацетатные смолы широко применяют для изготовления клеев в виде водных эмульсий (ПВА канцелярский, ПВА-М). Поливинилхлоридные клеи (ПВХ) используют для наклеивания линолеума.

Резиновые клеи получают растворением синтетических каучуков (бутадиенового, дивинил-стирольного и др.) или сырых резиновых смесей в бензине. Растворы сырых резиновых смесей используются для ремонта автопокрышек с последующей горячей вулканизацией. Производят на основе олигоэфиракрилатов (анаэробные клеи), эмульсий акриловых мономеров (эмульсионные); специальные цианакрилатные клеи, которые обладают прочностью, оптической прозрачностью и очень высокой адгезией к коже человека. Последнее обстоятельство требует осторожности при работе с ними.

Мочевино-формальдегидные (синтетические столярные) клеи в отличие от фенолоформальдегидных применяют в виде водных растворов. По сравнению с фенолоформальдегидными клеями они имеют ряд преимуществ: бесцветны, светостойки и менее токсичны, но по прочности склеивания и водостойкости уступают фенолоформальдегидным. Меламино-формальдегидные клеи применяют в производстве ламинированных древесных (мебельных) плит.

Поливинилацетатные (ПВА) клеи — эмульсионные клеи находят широкое применение (канцелярский, обойный, для наклеивания линолеума и др.). Водно-эмульсионные клеи могут быть получены на основе сополимеров винилацетата с винилхлоридом, эфирами акриловой и метакриловой кислот.

Полиэфирные клеи получают с использованием олигомеров эфиров многоосновных кислот и многоатомных спиртов в комбинации с мономерами стирола, винилацетата и др. Клеи имеют высокую термостойкость и прочность.

Резиновые клеи получают растворением натуральных, синтетических каучуков (бутадиенового, дивинил-стирольного и др.) или сырых резиновых смесей в бензине.

Терморезактивные синтетические клеи вырабатывают из акриловых, полиэфирных, эпоксидных смол, фенолоформальдегидных олигомеров и др.

Эпоксидные клеи отличаются исключительно высокой адгезионной способностью ко многим материалам, химической инертностью, создают прочные клеевые соединения, а шов обладает низкой усадкой. Клеи являются универсальными, применяются как в быту, так и в промышленности.

Постоянно липкие материалы. Многие виды термопластичных смол используют для изготовления пленок с остаточной липкостью — липких лент, липких наклеек. Их называют адгезивами, чувствительными к давлению. Нанесенный на них клеевой состав имеет длительную жизнеспособность, со временем не затвердевает и не высыхает и проявляет свои адгезионные свойства при приложении небольшого давления.

Липкие ленты (скотчи) выпускают в рулонах шириной 10...40 мм на бумажной, тканевой или полимерной основе. Их используют для ремонта книг, отделочных, электротехнических работ, для скрепления потребительской и транспортной тары (картонных ящиков). При нанесении на пластик они могут использоваться для заделки стыков в ванной комнате, на кухне.

Антиклей (антиадгезионное средство) — современные препараты для обработки поверхностей в целях снижения адгезии на основе кремнийорганических соединений. После обработки антиклеем на поверхность невозможно наклеить, например, несанкционированные объявления.

Герметики — пастообразные клеевые составы выполняют в разных конструкциях функцию заполнения швов, уплотнения, герметизации, гидроизоляции. К таким герметикам не предъявляют требований высокой прочности, поскольку они работают чаще всего в статических условиях.

Клеящей и связующей основой герметиков являются синтетические смолы и каучуки (кремнийорганические смолы и силиконовые каучуки; полиизобутилен, бутилкаучук, нитрильные каучуки).

Кровельные герметики предназначены для защиты и ремонта кровли и чердачных помещений; гидроизоляционные герметики (по влажной поверхности) предна-

значены для защиты подвальных помещений, сантехнического и канализационного оборудования.

Акриловые и силиконовые герметики выпускают в тубах или баллонах под строительный «пистолет», что дает удобство использования при заделке швов в плинтусах, деревянных конструкциях, аквариумах, бассейнах и пр. Отверждение происходит на воздухе. В герметики, работающие во влажных средах, специально добавляют противогрибковые препараты.

Широко распространены так называемые монтажные пены, которые служат для заделки стыков или швов шириной более 3 см. Они заполняют пространство между конструктивными элементами, но не пригодны для сопротивления нагрузкам и выполняют только роль инертного заполнителя.

Свойства резиновых клеев зависят от вида каучука. Клей на основе дивинилнитрильного каучука (СКН) дает клеевой шов, который стоек не только к действию воды, но и нефтепродуктов. Найритовый клей (раствор полихлоропренового каучука ПХП) хорошо склеивает резину и кожу при изготовлении обуви, а также текстильные ткани и другие материалы. Латексные каучуковые клеи применяют для наклеивания линолеума, плиток, обоев и др. Все резиновые клеи дают эластичное влагостойкое клеевое соединение.

Многие виды термопластичных смол (сополимеры этилена-винилацетата, бутадиен-стирола, изопрен-стирола, акрилонитрил-бутадиен-стирола) используют для изготовления пленок с остаточной липкостью — липких лент, липких наклеек (адгезивы, чувствительные к давлению). Нанесенный на них клеевой состав имеет длительную жизнеспособность, со временем не затвердевает и не высыхает.

Липкие ленты выпускают в рулонах шириной 10-40 мм на бумажной, тканевой или полимерной основе (прозрачной — на целлофане, полиэтилене; непрозрачной — на лавсане и др.) для ремонта книг, отделочных работ, склеивания магнитных лент, уплотнения щелей в окнах, электротехнических работ. При нанесении на пластик (рейки, уголки) они могут использоваться для заделки стыков в ванной комнате, на кухне.

Герметики. В строительстве и в быту используют герметики — клеевые составы для герметизации и уплотнения швов в различных конструкциях. Они представляют собой липкие, пластичные пастообразные массы, состоящие из связующего вещества и наполнителей. Клеящей и связующей основой герметиков являются синтетические смолы и каучуки (кремнийорганические смолы (силиконовые каучуки), полиизобутилен, бутилкаучук, нитрильные каучуки). Например, для заделки стыковых швов при ремонте используется пластичная лента «Герлен». В вулканизирующиеся герметики перед употреблением вводят вулканизирующие вещества.

Собственно герметики выполняют функцию заполнения швов, уплотнения, герметизации. К таким герметикам не предъявляют требований высокой прочности. К ним относятся отверждающиеся герметики, например, полиуретановая пена «Супросил» (Германия) для заделки пустот.

Клеи-герметики выполняют двойную функцию - герметизация и склеивание для получения прочного и герметичного соединения. В отличие от герметиков клеи-герметики должны обладать свойством текучести.

Клеи-расплавы — это термопластичные безрастворные клеи, приобретающие адгезионные свойства при нагревании, а после охлаждения клеевое соединение твердеет. Основным базовым продуктом клеев общего назначения является полиэтилен и сополимеры этилена с винилацетатом (СЭВА) с различным содержанием винилацетатных групп. Используют также полиамиды, полиэфир, поливинилбутираль, полиизобутилен, полиуретаны.

Клеевые соединения по сравнению с заклепочными, сварными при обдуманном применении имеют следующие преимущества:

- а) возможность соединения различных материалов;
- б) герметичность соединения;
- в) возможность соединения тонких материалов;
- г) снижение стоимости производства;
- д) экономия массы и значительное упрощение технологии

К недостаткам следует отнести:

- относительно низкую теплостойкость (600 °С);

- низкую прочность;
- частую необходимость склеивания с подогревом;
- склонность к старению.

Прочность можно повысить механической обработкой склеиваемых поверхностей. На процесс склеивания влияют адгезионные свойства металлов. По мере убывания этих свойств они располагаются в следующем порядке: сталь, бронза, алюминиевые сплавы, медь, железо, латунь.

Часто склеивание заготовок осуществляется по следующей технологии:

- подготовка поверхности, включающая механическую обработку, очистку от загрязнений, обезжиривание (спирт, бензин и др.);
- промазка соединяемых поверхностей;
- выдержка на воздухе некоторое время;
- соединение соединяемых заготовок и выдержка некоторое время под давлением.

Клеи классифицируются по:

- 1) по пленкообразующему веществу - смоляные, резиновые;
- 2) по адгезионным свойствам- универсальные (БФ), белковые, резиновые;
- 3) по отношению к нагреву- обратимые (термопластичные) и необратимые (термостабильные) пленки;
- 4) по условиям отверждения- холодное или горячее склеивание;
- 5) по внешнему виду- жидкие, пастообразные, твердые, пленочные;
- 6) по назначению- конструкционные, силовые, несилловые.

Конструкционные смоляные клеи.

Фенолкаучуковые композиции ВК-32- 200, ВК-3, ВК-4. Тепло- и водостойки, выдерживают циклические нагрузки.

Фенолполивинилацетальные композиции БФ-2, БФ-4. Это растворы фенолформальдегидной смолы, совмещенной с полтвинилбутиралем. БФ-2 и БФ-4 клеят металлы, пластмассы, керамику и другие твердые материалы. Теплостойкость у них невысока, водостойкость- удовлетворительна.

Фенолкремнийорганические клеи содержат в качестве наполнителя асбест, алюминиевый порошок и др. Они термостойки. Клеи ВК-18, ВК-18М имеют рабочую температуру 500- 600°С. Их используют для склеивания инструментов.

Клеи на основе эпоксидных смол.

Отверждение их происходит с помощью отвердителей без выделения побочных продуктов. Из-за этого не т усадочных явлений в клеевой пленке.

Отверждение может осуществлять как холодным, так и горячим способом. ТКМ-75, Т-73 используются для приклеивания режущих частей инструментов.

Для всех эпоксидных клеев характерны хорошие механическая прочность, атмосферостойкость, устойчивость к топливам и минеральным маслам, высокие диэлектрические свойства. Рабочие температуры $T = - 60...+ 140^{\circ}\text{C}$.

Однако они плохо работают при динамических нагрузках.

Полиуретановые клеи. Это клеи с универсальной адгезией. Могут быть холодного и горячего затвердевания. Они прочны, стойки к топливам, но токсичны. (ПУ-5, ВК-5...).

Резиновые клеи. Используются для склеивания резины с резиной, резины с металлом, стеклом и др. Это растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях. В состав клеев входит вулканизирующий агент. Склеивание проводят при $T = +140- 150^{\circ}\text{C}$. В случае введения активаторов и ускорителей получают самовулканизирующийся клей. Для увеличения адгезии вводят синтетические смолы. (88НП, 9М-35Ф....)

Неорганические клеи. Являются высокотемпературными. Существуют в виде концентрированных водных растворов неорганических полимеров, твердых порошков (сначала плавятся, потом затвердевают), дисперсий (затвердевают или от химических реакций или при высыхании).

Силикатные клеи- жидкое стекло. Склеивает керамику, стекло, стекло с металлом. Предел прочности на сжатие 455- 1100 МПа, на растяжение 50- 150 МПа.

ТЕМА 8. ПОКРЫТИЯ

В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, различают три вида покрытий:

- **защитные покрытия**, предназначенные для защиты от коррозии деталей в различных агрессивных средах, в том числе при высоких температурах;

- **защитно-декоративные покрытия**, служащие для декоративной отделки деталей с одновременной защитой их от коррозии;

- **специальные покрытия**, применяемые с целью придания поверхности специальных свойств (износостойкости, твердости, электроизоляционных, магнитных свойств и др.), а также восстановления изношенных деталей.

При выборе покрытий учитывают назначение и материал покрываемой детали, условия ее эксплуатации, свойства покрытия и способ его нанесения, допустимость контактов сопрягаемого металла и покрытия, а также экономическую целесообразность его применения.

Поверхность основного металла, на которую предполагают нанесение покрытий, подвергают специальной подготовке. При нанесении гальванических покрытий, в соответствии с ГОСТ 9.301-78, шероховатость поверхности основного металла должна быть: $Rz < 40$ мкм – под защитные покрытия; $Ra < 2,5$ мкм – под защитно-декоративные; $Rz < 40$ мкм – под специальные покрытия в зависимости от их функционального назначения. На поверхности деталей не допускаются закатанная окалина, расслоение и трещины, выявившиеся после травления, шлифовки и полировки, поры и раковины.

Поверхность детали очищают от травильного шлака, продуктов коррозии и других загрязнений. Перед эмалированием и нанесением органических покрытий поверхность металла очищают, обезжиривают и подвергают предварительной химической обработке. Для всех видов покрытий установлены требования к их внешнему виду и специальным свойствам. Как правило, устанавливают требования к толщине, пористости и прочности сцепления с основным материалом.

В процессе эксплуатации изделия не должно быть локального отслоения покрытия. Поэтому важнейшим требованием является надежное сцепление покрытия с основным материалом детали. Покрытие взаимодействует с поверхностным слоем

материала основы. Поэтому для получения качественного покрытия важную роль играет обработка поверхности. Для предварительной обработки поверхности используют механические и химические методы очистки: струйную обработку, обезжиривание, травление и др.

Процесс нанесения покрытий может быть осуществлен несколькими способами:

Горячее погружение в расплав – один из самых старых методов нанесения покрытий. Металлы ванны имеют низкую температуру плавления - это цинк, олово, алюминий. Они обеспечивают защиту основного металла от коррозии.

Электрохимический метод – металлы осаждают из растворов солей. Обычно применяют для получения гальванических покрытий из хрома и никеля толщиной 0,12...0,60 мм.

Напыление осуществляют мелкими частицами материала, образующимися при пропускании проволоки или порошка через кислородно-ацетиленовое пламя, с последующим осаждением на холодную основу. Для нагрева используют электродугу или плазменную металлизацию. Это способствует улучшению адгезии и снижению пористости покрытия. Основан на процессе, в котором устойчивые продукты реакции зарождаются и растут на подложке в среде с протекающими в ней химическими реакциями (диссоциация, восстановление и др.). При высокой температуре на поверхности образуются очень тонкие слои, например карбида или нитрида титана. Метод CVD используют для нанесения покрытий на инструмент и штампы.

Наплавку осуществляют сплавлением осаждаемого материала с поверхностным слоем основы. Наплавку широко применяют для ремонта отдельных деталей, поврежденных или износившихся в процессе эксплуатации. Для нанесения покрытий методом наплавки используют все основные сварочные процессы: газопламенный, электродуговой, плазменный, электронно-лучевой и др.

Механическое нанесение покрытий используют для получения цинковых, кадмиевых и оловокадмиевых покрытий – детали перемешивают в сосудах с соответствующими тонкими металлическими порошками, активаторами и стеклянными шариками.

Физико-паровое осаждение или метод PVD (physical vapour deposition), основан на процессе, который протекает в несколько стадий:

- нагрев материала в вакууме до испарения;
- перенос паров от источника к подложке;
- конденсация паров на основе – подложке.

Метод PVD обладает высокой гибкостью, и с его помощью можно наносить любые металлы, сплавы, оксиды, карбиды и нитриды. Например, его с успехом применяют для нанесения износостойкой пленки TiN на стальной инструмент. К достоинствам метода PVD относятся высокая чистота поверхности и превосходная связь с основой.

Ионная имплантация предусматривает ионизацию атомов с последующим ускорением ионов в электрическом поле в вакууме. Ионы тормозятся при соударении с мишенью и распределяются по глубине мишени. Хотя глубина проникновения ионов обычно не превышает 0,1 ...0,2 мкм, свойства металла могут существенно меняться.

Металлические покрытия. Среди методов, улучшающих антикоррозионные свойства, нанесение цинковых покрытий - **цинкование**, занимает первое место. Ежегодно в мире оцинковывается около 25 млн т стали. Основными методами для нанесения цинковых покрытий на сталь являются электролитический и горячее погружение (огневое или горячее цинкование).

Хотя в качестве материала основы можно использовать любые марки, для цинкования обычно применяют углеродистые и низколегированные стали. Цинковые покрытия имеют высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, в пресной воде и в закрытых помещениях с умеренной влажностью, а также удовлетворительную поверхностную твердость, износо- и водостойкость, прочность на изгиб. Цинковые покрытия применяют для защиты от коррозии запорной арматуры и подземных трубопроводов сточной воды и воды, используемой для технических целей. Соединения цинка токсичны и при нагреве неустойчивы в кислотах. Цинковые покрытия не применяют для защиты от коррозии деталей, находящихся в непосредственном контакте с пищевыми продуктами.

Для стальных деталей с алюминиевым покрытием характерно сочетание высокой прочности и коррозионной стойкости. Нанесение покрытий производят путем горячего алюминирования в расплавах (алитирование), плакированием стальных листов и напылением в вакууме. Среди способов покрытия стальных листов алюминием наибольшее распространение имеет горячее алюминирование.

Коррозионная стойкость стальных деталей с алюминиевым покрытием обусловлена высокими защитными свойствами образующейся на его поверхности пленки Al_2O_3 толщиной менее 0,1 мкм. Этот оксидный слой отличается высокой плотностью и при повреждении быстро образуется заново.

Покрытие оловом производят методами горячего погружения и электролитическим осаждением. При погружении стальных и чугунных изделий в расплав на их поверхности образуется тонкий слой соединения $FeSn_2$, над которым после вытягивания из расплава затвердевает более толстый слой олова.

Более широко используют метод электролитического лужения. Листовой прокат толщиной менее 0,5 мм, полученный этим методом, называют белой жстью. Толщина оловянных покрытий составляет 30...35 мкм.

В качестве заменителя белой жести применяют холоднокатаный тончайший лист, который покрыт электролитически нанесенным покрытием оксида хрома.

Оловянные покрытия широко применяют в различных отраслях техники, прежде всего в пищевой и мясомолочной промышленности, особенно для защиты от коррозии различных стальных емкостей типа баков, цистерн и фляг. Оловом защищают не только стальные, но и медные емкости.

При плакировании происходит послойное соединение стали с одним или многими металлами с образованием многослойного материала. При плакировании к материалу основы не предъявляется особых требований, он используется с теми же свойствами, которые нужны для эксплуатации. Для получения бездефектного соединения требуется очистка поверхности и создание заданной шероховатости.

Плакирование осуществляется разными методами. Используют процессы горячей и холодной прокатки, метод двухслойного литья заготовок, плакирование взрывом и наплавку плакирующего слоя.

В качестве материала для плакирования низколегированных сталей применяют коррозионностойкие ферритные или аустенитные стали, медь и никель или их сплавы, а также алюминий, титан, ниобий или молибден. При плакировании коррозионностойкой стали предварительно создают гальваническое никелевое покрытие. Этим устраняют окисление горячей стали перед прокаткой и одновременно интенсифицируют процессы диффузионного сваривания, необходимые для сцепления материалов.

Биметаллы являются не только заменителями однородных дорогостоящих материалов. Во многих случаях благодаря сочетанию свойств компонентов, они имеют более благоприятные показатели, чем однородные дорогостоящие материалы сами по себе. В основе технологии напыления металлических сплавов в вакууме лежит принцип испарения за счет нагрева и понижения давления и конденсация на материале основы с получением заданного слоя. Высокий вакуум благоприятствует процессу испарения. Для эффективного протекания процесса конденсации изделие, на которое наносится покрытие, должно интенсивно охлаждаться.

При осаждении металлов из газовой фазы на стальную поверхность используют свойство некоторых металлов легко образовывать летучие галогениды, которые вступают в реакцию с железом на стальной поверхности. При этом металл покрытия становится свободным и может диффундировать вглубь и1089 стальной детали. Наряду с алюминием, для осаждения из газовой фазы используют также

Неметаллические покрытия

К неорганическим неметаллическим материалам, применяемым для защиты от коррозии металлических поверхностей, относят **эмали, стекло и цемент**.

Эмалью называют стекловидную застывшую массу, полученную в результате полного или частичного расплавления и состоящую в основном из кварца и других оксидов. На изделие эмаль наносят одним или несколькими слоями. Различают два основных способа эмалирования. Наряду с эмалированием, при котором изделие покрывают грунтовкой и покровными эмалями и при этом дважды обжигают, широко используют в последние годы однослойное прямое эмалирование, при котором слой эмали (0,2...0,3 мм) может быть уменьшен наполовину. При специальном эма-

лировании, применяемом в химическом и пищевом машиностроении, обычно наносится многослойная эмаль. Перед нанесением эмали поверхность стальной детали обезжиривают и протравливают. При этом удаляют некоторое количество металла, и поверхность листа становится шероховатой, что способствует адгезии эмалевого покрытия.

Технология нанесения полимерных покрытий

Рассмотренные ранее методы защиты металлов от коррозии дороги, недостаточно эффективны и имеют ограниченные возможности. Поэтому использование органических покрытий по-прежнему остается важным средством борьбы с коррозией. Полимерные покрытия не только защищают металлы от воздействия агрессивных сред, но и повышают их износостойкость, снижая прилипаемость различных веществ к рабочим поверхностям, позволяют экономить цветные металлы и другие дефицитные материалы.

К полимерным покрытиям предъявляют высокие требования. Покрытия должны иметь хорошую адгезию к защищаемой поверхности, беспористость, эластичность, механическую прочность, теплостойкость, быть инертными к средам, с которыми они находятся в контакте.

Ни один из известных полимеров не сможет полностью удовлетворить всем перечисленным требованиям. Материалы, обладающие достаточной химической стойкостью, как правило, имеют недостаточную адгезию к защищаемому металлу. Полимерные покрытия с хорошей адгезией к защищаемой поверхности часто легко разрушаются от химического и механического воздействия агрессивных сред. Лишь эпоксидные и некоторые другие полимеры удачно сочетают высокую адгезию к металлу с удовлетворительной химической стойкостью.

В различных областях промышленности для защиты внутренних поверхностей аппаратов, трубопроводов и арматуры применяют винилхлоридные, фторопластовые, пентапластовые, полиолефиновые, полиуретановые, фенолформальдегидные, кремнийорганические, каучуковые, эпоксидные и другие покрытия.

В отличие от коррозионной стойкости металлов, характеризуемой потерей массы, химическая стойкость полимерных материалов численно обычно не выража-

ется. О химической стойкости полимерных покрытий судят по степени набухания и разрушения пленки, потере эластичности, изменению цвета и т.д. Перед нанесением покрытия проводят подготовку металлической поверхности (очищают и придают равномерную шероховатость для обеспечения хорошей адгезии) при помощи дробеструйной обработки. На подготовленную поверхность наносят грунт, создающий противокоррозионный слой с обеспечением высокой прочности сцепления, как с металлом, так и с последующими слоями покрытия.

Классификация полимерных покрытий

Ранее отмечалось, что в зависимости от поведения полимеров при нагревании различают термопластичные полимеры (термопласты) и терморезистивные полимеры (реактопласты). К терморезистивным материалам, которые при нагревании размягчаются, а затем необратимо переходят в твердое состояние, относятся фенопласты и аминопласты, к термопластичным материалам, которые многократно могут размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении, - полиэтилен, полиамиды и др.

Полиолефиновые покрытия включают в себя такие распространенные материалы, как полиэтилен, полипропилен и их сополимеры.

Полиамиды включают в себя капрон и капролон. Покрытия из полиамидов обладают высокими антифрикционными характеристиками. По износостойкости при сухом и жидкостном трении полиамиды превосходят не только другие классы полимеров, но и многие металлы, применяющиеся в антифрикционных целях. Низкий коэффициент трения при высоких нагрузках позволяет использовать полиамиды в тяжело нагруженных узлах трения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов трения покрытий из полиамидов при трении со смазкой по стали. Недостаток полиамидных покрытий – склонность к старению и значительное водопоглощение. С повышением температуры гигроскопичность полиамидов возрастает.

Поливинилхлорид (ПВХ) благодаря низкой стоимости сырья, высокой химической стойкости, хорошим физико-механическим и удовлетворительным электрическим свойствам - самый распространенный материал, применяющийся для создания защитно-декоративных, химически стойких и электроизоляционных покрытий.

Пентапласт обладает высокой водостойкостью, прочностью, низким коэффициентом трения по стали. Он стоек к воздействию грибковой плесени, устойчив к воздействию растворов щелочей, кислот и солей.

Фторопласты применяют для изготовления различных деталей и для защитных покрытий (фторопласт-4 и фторопласт-3). Фторопластовые покрытия исключительно устойчивы к агрессивным средам и в этом отношении превосходят даже благородные металлы и сплавы. На покрытия из фторопласта-4 не действуют окислительные среды, включая и царскую водку, кипящие щелочи, растворы солей. Фторопластовые покрытия вполне устойчивы по отношению к жирам, маслам, влаге, кислотам и т.д.

Кремнийорганические полимеры имеют многие ценные свойства, из которых наиболее характерны термостойкость, а также стойкость к воздействию целого ряда химических агентов и растворителей. По термостойкости они значительно превосходят органические полимеры.

Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверхность изделий и высыхающие с образованием пленок, удерживаемых силами адгезии. Высохшие пленки называют лакокрасочными покрытиями.

Назначение лакокрасочных покрытий - защита металлов от коррозии, дерева и тканей - от гниения и набухания. Кроме того, они служат декоративным целям, придавая изделиям желаемый внешний вид. Основными требованиями, предъявляемыми к лакокрасочным покрытиям, являются высокая адгезия к защищаемым поверхностям; близкие значения температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и металла; высокая плотность, беспористость, водо- и газонепроницаемость; высокая эластичность пленки при достаточной твердости и механической прочности; теплостойкость, химическая стойкость и светостойкость.

Основные компоненты лакокрасочных материалов - пленкообразователи, растворители и пигменты.

Пленкообразователи сообщают лакокрасочным материалам способность к образованию пленки и определяют ее основные свойства. Пленкообразующими веще-

ствами могут быть высыхающие растительные масла, синтетические смолы и эфиры целлюлозы. Различают неотверждаемые термопластичные и отверждаемые термоактивные пленкообразователи.

Растворителями лакокрасочных материалов служат скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирты. Растворители подбирают в зависимости от пленкообразующего вещества: для масел используют скипидар и уайт-спирит; для смол - спирты, ацетон и ароматические углеводороды типа бензола и толуола, для эфиров целлюлозы - ацетон. Растворители при сушке полностью улетучиваются. Для ускорения высыхания покрытий применяют каталитически действующие сиккативы, представляющие собой растворы оксидов или солей кобальта, цинка, свинца, марганца в растительном масле.

Пигменты (или красители) применяют для получения определенного цвета лакокрасочного материала. Одновременно пигменты улучшают адгезию, повышают антикоррозионные свойства и водостойкость пленок. По химическому составу они представляют собой оксиды или соли металлов (охра, железный сурик, цинковые и титановые белила), порошки алюминия, цинка и элементарного углерода (графит, сажа). Используют также пигменты органического происхождения (пигмент алый и др.), придающие покрытиям красивые яркие тона. Лакокрасочные покрытия классифицируются следующим образом (таблица 8.2).

Таблица 8.2

Классификация лакокрасочных покрытий

Лакокрасочный материал / Обозначение	Пленкообразующие	Характеристика	Покрываемые изделия
Масляные / МА	Олифы, Оксоль	Атмосферостойкие. Для внутренних и внешних работ.	Деревянные и металлические изделия.
Глифталевые / ГФ	Смолы алкидные, глифтали	Атмосферостойкие, маслостойкие	Сельхозмашины, подъемно-транспортные машины и агрегаты
Нитроцеллюлозные / НЦ	Нитроглифтали, смолы нитроцеллюлозоуретановые, нитроаминоформальдегидные	Атмосферостойкие, маслостойкие, бензостойкие	Металлические детали, кузова машин
Эпоксидные / ЭП	Эпоксидные смолы, алкидно-эпоксидные смолы	Атмосферостойкие. Для внутренних и внешних работ.	Металлические детали, кузова машин

		Маслостойкие, бензостойкие, водостойкие	
Перхлорвиниловые / ХВ	Смолы перхлорвиниловые и винилхлоридные	Атмосферо- и химические стойкие. Выдерживают кратковременное воздействие масла и воды	Металлические поверхности химической аппаратуры
Кремнийорганические / КО	Смолы кремнийорганические	Термостойкие до 200-300 °С. Химически и водостойкие	Машины и оборудование

Износостойкие покрытия. Одним из необходимых условий при выборе материалов для покрытий является высокая износостойкость защитных покрытий.

Полимерные покрытия являются эффективным средством для повышения износостойкости. Долговечность покрытий зависит от плотности материалов, из которых они изготовлены, их *адгезионной* способности к подложке, трибометрических свойств, равномерности распределения в них модификаторов и наполнителей. Чаще надежно работающие износостойкие покрытия других полимеров для износостойких покрытий используют полиуретаны, пентапласт, политетрафторэтилены, полиамиды, эпоксидные композиции. Например, хорошо противостоят абразивному износу трубы, покрытые изнутри полиуретаном.

Покрытия на основе ненаполненных полиуретановых эластомеров по стойкости к абразивной эрозии превосходят ряд марок нержавеющей стали. Одним из перспективных износостойких материалов является поливинилденфторид (ПВДФ). Его применяют как в качестве покрытий и футеровок элементов насосных агрегатов, так и для изготовления насосов для перекачивания агрессивных сред. Одним из рациональных способов повышения износостойкости покрытий является модифицирование полимерных композиций неорганическими и минеральными наполнителями, например дисульфидом молибдена, тальком, аморфным бором, корундом, оксидом цинка, карбидом кремния и др. Снижению износа покрытий способствует наполнение полимерных композиций стекловолокном, графитом, цементом, ас-бестом,

маршаллитом, повышающими прочность, теплостойкость и другие характеристики полимеров.

ТЕМА 9. НАНОМАТЕРИАЛЫ

Наноматериалы – материалы, созданные с использованием наночастиц и/или посредством нанотехнологий, обладающие какими-либо уникальными свойствами, обусловленными присутствием этих частиц в материале. К наноматериалам относят объекты, один из характерных размеров которых лежит в интервале от 1 до 100 нм.

Такой диапазон размеров не случаен, а определяется существованием ряда размерных эффектов и совпадением размеров кристаллитов с характерными размерами для различных физических явлений. Нижний предел считается связанным с нижним пределом симметрии нанокристаллического материала. Дело в том, что по мере снижения размера кристалла, характеризующегося строгим набором элементов симметрии, наступает такой момент, когда будет наступать потеря некоторых элементов симметрии. По данным для наиболее широко распространенных кристаллов с ОЦК и ГЦК решеткой такой

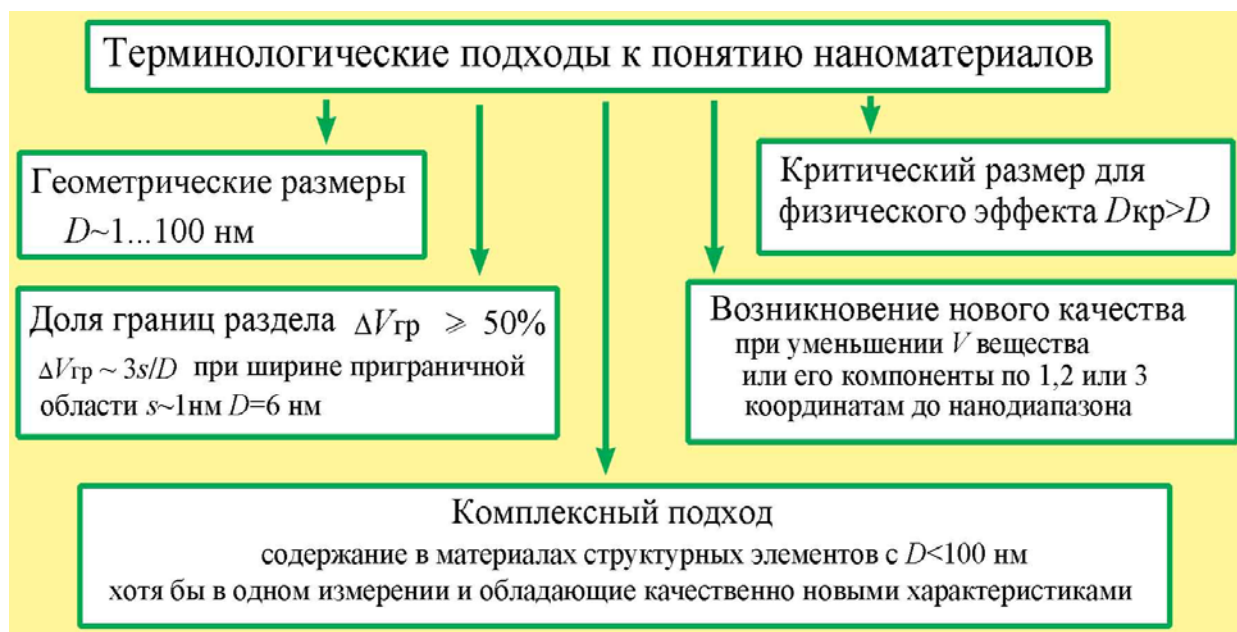


Рис.9.1. Терминологические подходы к понятию наноматериалов

критический размер равен трем координационным сферам, что для случая железа составляет около 0,5 нм, а для никеля - около 0,6 нм. Величина верхнего предела обусловлена тем, что заметные и интересные с технической точки зрения изменения физико-механических свойств материалов (прочности, твердости, коэрцитивной силы и др.) начинаются при снижении размеров зерен именно ниже 100 нм.

Второй подход связан с огромной ролью многочисленных поверхностей раздела в наноматериалах в формирование их свойств. В соответствии с ним размер зерен (D) в наноматериалах определялся в интервале нескольких нанометров, т.е. в интервале, когда объемная доля поверхностей раздела в общем объеме материала составляет примерно $\Delta V \approx 50\%$ и более. Эта доля приблизительно оценивается из соотношения $\Delta V \sim 3s/D$, где s — ширина приграничной области. При разумном значении s около 1 нм 50%-я доля поверхностей раздела достигается при $D = 6$ нм.

Существует так же подход, в соответствии с которым для наноматериалов наибольший размер одного из структурных элементов должен быть равен или быть меньше, размера, характерного для определенного физического явления. Так для прочностных свойств это будет размер бездефектного кристалла, для магнитных свойств — размер однодоменного кристалла, для электропроводности — длина свободного пробега электронов. Существенными недостатками такого подхода являются, во-первых, несоответствие размеров структурных элементов для разных свойств и материалов и, во-вторых, различность характерных размеров для разных состояний одного и того же материала (например, отдельные частицы нанопорошка и зерна в поликристалле — см. табл. 9.1).

Некоторые ученые считают, что если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует

Таблица 9.1

Расчетные значения размеров частиц и зерен, не содержащих дислокационных петель, нм.

Материал	Cu	Al	Ni	α -Fe
отдельные частицы порошка	250	60	140	23
зерна в поликристалле	38	18	16	3

Наиболее полноценная на сегодняшний момент терминология предложена в работах, где используются следующие термины:

нанотехнология - совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;

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;

наносистемная техника - полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям

Следует отметить, что наряду с термином *наноматериалы*, который к настоящему времени получает все более широкое применение, получили распространение также равноправные термины «*ультрадисперсные материалы*», «*ультрадисперсные системы*» (в отечественной литературе) и «*наноструктурные материалы*» (в западных источниках).

9.2. Основы классификации наноматериалов

В соответствии с приведенной на предыдущей странице терминологией наноматериалы можно разделить на четыре основные категории (рис. 9.2).



Рис. 9.2 Классификация наноматериалов.

Первая категория включает материалы в виде твердых тел, размеры которых в одном, двух или трех пространственных координатах не превышают 100 нм. К таким материалам можно отнести наноразмерные частицы (нанопорошки), нанопроволоки и нановолокна., очень тонкие пленки (толщиной менее 100 нм), нанотрубки и т.п... Такие материалы могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки). В связи с этим первую категорию можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде наноизделий

Вторая категория включает в себя материалы в виде малоразмерных изделий с характеризующим размером в примерном диапазоне 1 мкм...1 мм. Обычно это проволоки, ленты, фольги. Такие материалы содержат уже значительное число структурных элементов и их можно классифицировать как наноматериалов с большим числом структурных элементов (кристаллитов) или наноматериалы в виде микроизделий.

Третья категория представляет собой массивные (или иначе объемные) наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких мм).

Такие материалы состоят из очень большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и фактически являются поликристаллическими материалами с размером зерна 1...100 нм. В свою очередь третью категорию наноматериалов можно разделить на два класса.

В первый класс входят однофазные материалы (в соответствии с терминологией микроструктурно однородные материалы), структура и/или химический состав которых изменяется по объему материала только на атомном уровне. Их структура, как правило, находится в состоянии далеком от равновесия. К таким материалам относятся, например, стекла, гели, пересыщенные твердые растворы. Ко второму классу можно отнести микроструктурно неоднородные материалы, которые состоят из наноразмерных элементов (кристаллитов, блоков) с различной структурой и/или составом. Это многофазные материалы, например, на основе сложных металлических сплавов.

Вторая и третья категории наноматериалов подпадают под более узкие определения нанокристаллических или нанофазных материалов.

К четвертой категории относятся композиционные материалы, содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов. При этом в качестве компонентов могут выступать наноматериалы, отнесенные к первой категории (композиты с наночастицами и/или нановолокнами, изделия с измененным ионной имплантацией поверхностным слоем или тонкой пленкой) и второй категории (например, композиты упрочненные волокнами и/или частицами с наноструктурой, материалы с модифицированным наноструктурным поверхностным слоем или покрытием). Можно выделить также композиционные материалы со сложным использованием наноконпонентов.

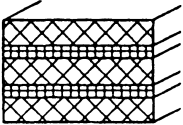
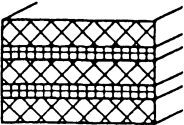
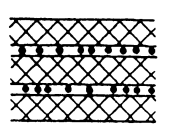
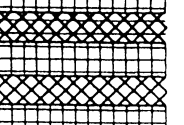
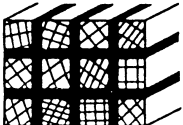
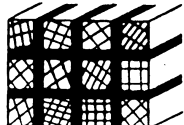
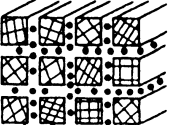
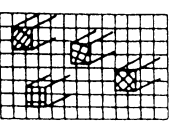
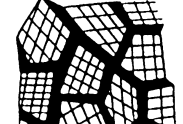
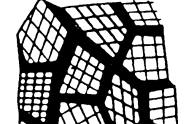
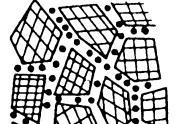
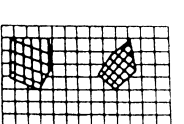
9.3 Основные типы структур наноматериалов

Свойства наноматериалов в значительной степени определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов), из которых они состоят. В связи с этим целесообразно классифицировать структуры наноматериалов по этим признакам (рис. 9.2). По форме кристаллитов наноматериалы можно разделить на слоистые (пластинчатые), волокнистые (столб-

чатые) и равноосные. Разумеется толщина слоя, диаметр волокна и размер зерна при этом принимают значения порядка 100 нм и менее. Исходя из особенностей химического состава кристаллитов и их границ обычно выделяют четыре группы наноматериалов. К первой относят такие материалы, у которых химический состав кристаллитов и границ раздела одинаковы. Их называют также однофазными. Примерами таких материалов.

Таблица 9.1

Основные типы структуры наноматериалов.

Характер распределения	кристаллитное			матричное
	состав кристаллитов и границ одинаковый	состав кристаллитов различен при одинаковом составе границ	состав кристаллитов и границ различный	
Химический состав				кристаллиты распределены в матрице другого состава
Форма кристаллитов:				
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

К первой группе относят чистые металлы с нанокристаллической равноосной структурой и слоистые поликристаллические полимеры. Ко второй группе относят материалы, у которых состав кристаллитов различается, но границы являются идентичными по своему химическому составу. Третья группа включает наноматериалы, у которых как кристаллиты, так и границы имеют различный химический состав. Четвертую группу представляют наноматериалы, в которых наноразмерные выделения (частицы, волокна, слои) распределены в матрице, имеющей другой химический состав. К этой группе относятся в частности дисперсно-упрочненные материалы.

9.4 Физические причины специфики наноматериалов

Наиболее сильные изменения свойств наноматериалов и наночастиц наступают в диапазоне размеров кристаллитов порядка 10..100нм. Основные физические причины этого можно проиллюстрировать на рис 9.3.

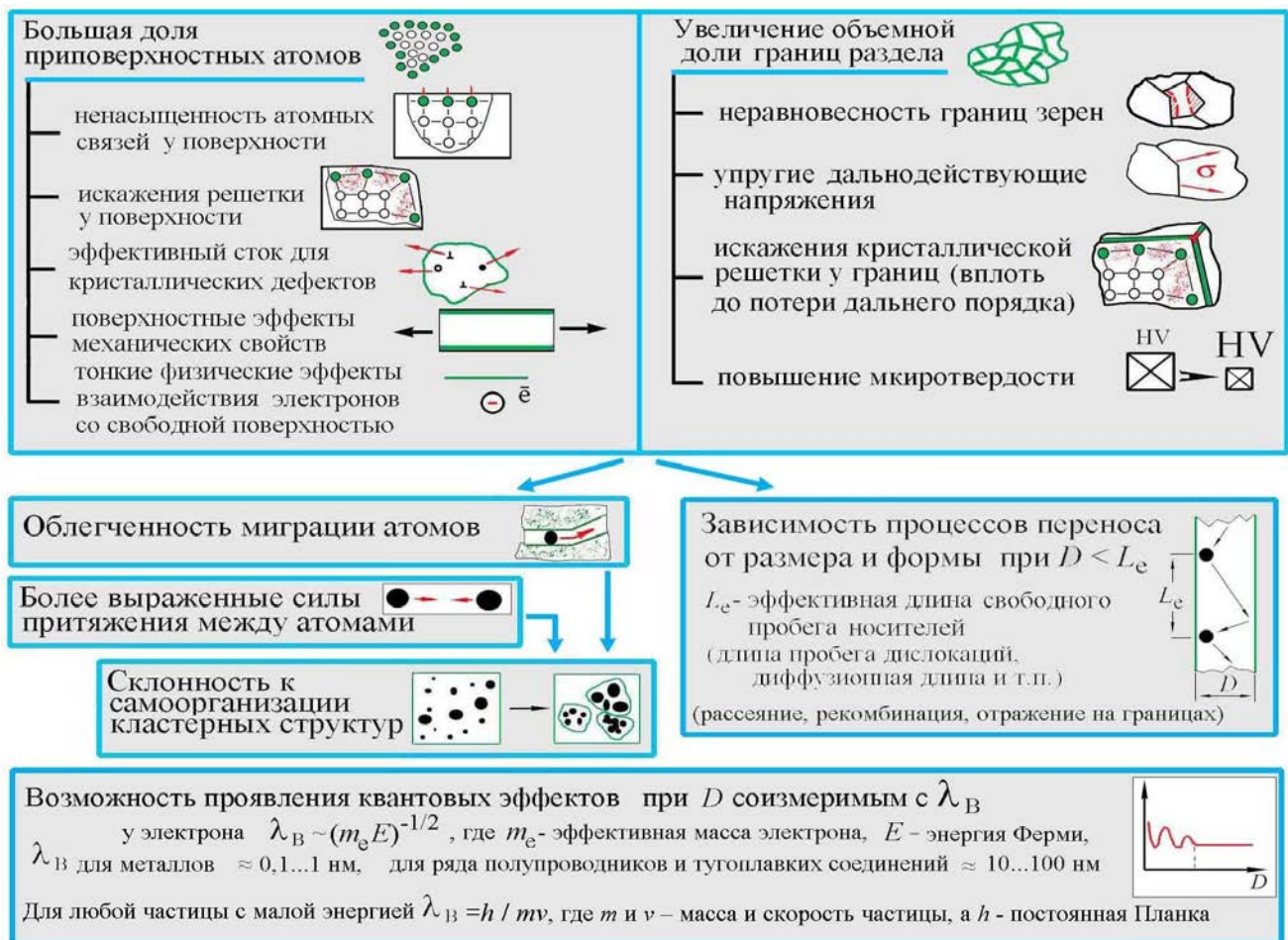


Рис. 9.3 Основные физические причины специфики наноматериалов

Для наночастиц доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое (его толщину принимают как правило порядка 1 нм), по сравнению с мезо- и микрочастицами заметно возрастает. Действительно, доля приповерхностных атомов будет пропорциональна отношению площади поверхности частицы S к ее объему V . Если обозначить характерный размер частицы (кристаллита) как D , то: $S/V \sim D^2/D^3 \sim 1/D$. У поверхностных атомов, в отличие от находящихся в объеме твердого тела, задействованы не все связи с соседними атомами. Для атомов находящихся на выступах и уступах поверхности ненасыщенность связей еще выше. В результате в приповерхностном слое возникают сильные искажения кристаллической решетки и даже может происходить смена типа решетки. Другим аспектом, является тот факт,

что свободная поверхность является стоком бесконечной емкости для точечных и линейных кристаллических дефектов (в первую очередь вакансий и дислокаций). При малых размерах частиц этот эффект заметно возрастает, что может приводить к выходу большинства структурных дефектов на поверхность и очистке материала наночастицы от дефектов структуры и химических примесей. В настоящее время установлено, что процессы деформации и разрушения протекают в тонком приповерхностном слое с опережением по сравнению с внутренними объемами металлического материала, что во многом определяет возникновение ряда физических эффектов, в т.ч. физического предела текучести и физического предела усталости. Для наночастиц весь материал будет работать как приповерхностный слой, толщина которого оценивается в диапазоне порядка 0,5...20 мкм. Можно также указать на тонкие физические эффекты, проявляющиеся в специфическом характере взаимодействия электронов со свободной поверхностью.

Следующей причиной специфики свойств наноматериалов является увеличение объемной доли границ раздела с уменьшением размера зерен или кристаллитов в наноматериалах. При этом можно выделить объемную долю следующих составляющих: границ раздела, границ зерен и тройных стыков. Объемную долю границ раздела можно оценить по формуле:

$\Delta V_{ГР} = 1 - [(D-s)/D]^3$, где s – толщина границ раздела (порядка 1 нм), а D – характерный размер зерна или кристаллита. Объемную долю границ зерен – по формуле: $\Delta V_{ГЗ} = [3s(D-s)^2]/D^3$, а объемную долю тройных стыков как разность: $\Delta V_{ТС} = \Delta V_{ГР} - \Delta V_{ГЗ}$. Видно, что с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренной компоненты (границ раздела) увеличивается с 0,3 до 87,5 %. Объемные доли межзеренной и внутризеренной компонент достигают одинакового значения зернограничной области у которых смещение превышает 10 % от межатомных расстояний); б) – Границы зерна в наноструктурной меди (просвечивающая электронная микроскопия, значками отмечены внесенные зернограничные дислокации). (по 50%) при размере зерна порядка 5 нм. После уменьшения размера зерна ниже 10 нм начинает сильно возрастать доля тройных стыков. С этим связывают аномальное падение твердости в этом интервале размеров зерна. Комплексные эксперименталь-

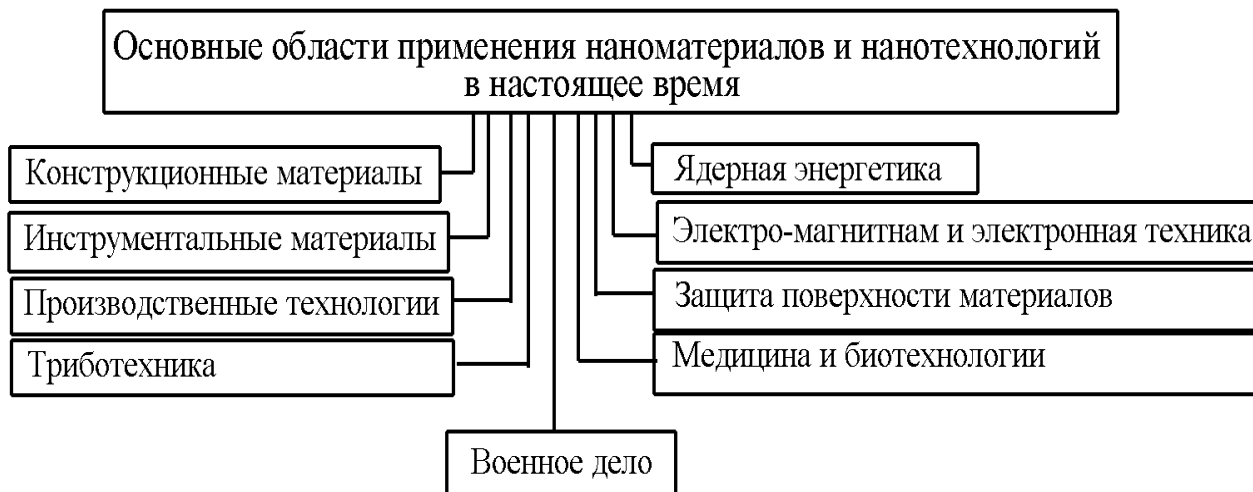
ные исследования показали, что границы зерен носят неравновесный характер, обусловленный присутствием зернограничных дефектов с высокой плотностью. Эта неравновесность характеризуется избыточной энергией границ зерен и наличием далекодействующих упругих напряжений; границы зерен имеют кристаллографически упорядоченное строение, а источниками упругих полей выступают зернограничные дислокации и их комплексы. Неравновесность границ зерен вызывает возникновение высоких напряжений и искажения кристаллической решетки, изменение межатомных расстояний и появление значительных смещений атомов, вплоть до потери дальнего порядка. Результатом является значительное повышение микротвердости.

Важным фактором, действующим в наноматериалах является также склонность к появлению кластеров. Облегчение миграции атомов (групп атомов) вдоль поверхности и по границам раздела, и наличие сил притяжения между ними, которые для наноматериалов больше по сравнению с традиционными материалами (рис.3.4), часто приводят к процессам самоорганизации островковых, столбчатых и других кластерных структур на подложке. Этот эффект уже используют для создания упорядоченных наноструктур для оптики и электроники.

Еще одну причину специфики свойств наноматериалов связывают с тем, что при процессах переноса (диффузия, пластическая деформация и т.п.) имеет место некоторая эффективная длина свободного пробега носителей этого переноса L_e . При характерных размерах области протекания процессов переноса много больших L_e . рассеяние носителей выражено незначительно, но при размерах меньших L_e перенос начинает зависеть от размеров и формы весьма значительно. В случае наноматериалов в качестве L_e . могут выступать, например, диффузионная длина и длина свободного пробега дислокаций.

Для материалов с размерами кристаллитов в нижнем нанодиапазоне $D < 10$ нм ряд ученых указывает на возможность проявления квантовых размерных эффектов. Такой размер кристаллитов становится соизмеримым с длиной дебройлевской волны для электрона $\lambda_B \sim (m_e E)^{-1/2}$ (m_e – эффективная масса электрона, E – энергия Ферми). Для металлов $\lambda_B \approx 0,1 \dots 1$ нм, а для ряда полупроводников, полуметаллов и

тугоплавких соединений переходных металлов $\lambda_B \approx 10 \dots 100$ нм. Для любой частицы с малой энергией (скорость $v \ll$ скорости света c) длина волны Де Бройля определяется как $\lambda_B = h/mv$, где m и v – масса и скорость частицы, а h – постоянная Планка. Квантовые эффекты будут выражаться в частности в виде осциллирующего изменения электрических свойств, например проводимости.



9.5. Основные области применения наноматериалов и возможные ограничения

В качестве наглядного примера можно указать некоторые области применения (или иначе «коммерциализации») наноматериалов по печатным материалам последних лет. Естественно, что данный обзор областей применения наноматериалов ни в коей мере не является цельным, однако он может дать нужное представление о перспективах использования наноматериалов.

Конструкционные материалы. Наноструктурные объемные материалы отличаются большими прочностью при статическом и усталостном нагружении, а также твердостью по сравнению с материалами с обычной величиной зерна. Поэтому основное направление их использование в настоящее время – это использование в качестве высокопрочных и износостойких материалов. Так предел текучести увеличивается по сравнению с обычным состоянием в 2,5-3 раза а пластичность – либо уменьшается очень незначительно, либо для Ni_3Al возрастает в 4 раз. Композиты армированные углеродными нановолокнами и фуллеренами рассматриваются как перспективные материалы для работы в условиях ударных динамических воздействий, в частности для брони и бронежилетов.

Инструментальные материалы. Инструментальные сплавы с нанозерном являются как правило более стойкими по сравнению с обычным структурным состоянием. Нанопорошки металлов с включениями карбидов используют в качестве шлифующего и полирующего материала на конечных стадиях обработке полупроводников и диэлектриков.

Производственные технологии. Важным и перспективным в настоящее время является использование наноматериалов в качестве компонентов композитов самого разного назначения. Добавление нанопорошков (подшихтовка) к обычным порошкам при производстве сталей и сплавов методами порошковой металлургии позволяет снижать пористость изделий, улучшать комплекс механических свойств. Проявление эффекта сверхпластичности в наноструктурных сплавах алюминия и титана делает перспективным их применение для изготовления деталей и изделий сложной формы и для использования в качестве соединительных слоев для сварки различных материалов в твердом состоянии. Очень большая удельная поверхность нанопорошков (порядка $5 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$) способствует их применению в ряде химических производств в качестве катализаторов.

Триботехника. Здесь перспективы применения связаны с тем, что металлические материалы с наноструктурой обладающая повышенной по сравнению с обычным структурным состоянием твердостью и износостойкостью. Другим направлением в этой области является использование полинанокристаллических алмазов и алмазоподобных покрытий, а также сверхтвердых веществ на базе фуллеренов (например сфероподобными молекулами C_{60}) и фуллеритов (легированных фуллеренов, например Fe_xC_{60}). Наноструктурные многослойные пленки сложного состава на основе кубического BN , C_3N_4 , TiC , TiN , Ti(Al,N) , обладающие очень высокой или ультравысокой (до 70 ГПа) твердостью хорошо зарекомендовали себя при трении скольжения, в том числе ряд пленок – в условиях ударного износа. Отмечаются хорошие триботехнические свойства пленок с аморфной и наноструктурой из углерода и нитрида углерода, а также из TiC , TiN и TiCN . В качестве самосмазывающихся покрытий для космической техники предлагаются многофазные наноструктурные

покрытия на основе $\text{TiB}_2\text{-MoS}_2$ с твердостью 20 ГПа и коэффициентом трения скольжения по стали 0,05. Металлические нанопорошки добавляют к моторным маслам для восстановления трущихся поверхностей.

Ядерная энергетика В США и возможно в других странах к настоящему времени наноматериалы используются в системах поглощения ВЧ- и рентгеновского излучений. Таблетки ТВЭЛов изготавливаются из ультрадисперсных порошков UO_2 , а в термоядерной технике используются мишени для лазерно-термоядерного синтеза из ультрадисперсного бериллия. Перчатки, фартуки и другая защитная одежда из резины или искусственных материалов с добавками ультрадисперсного свинцового наполнителя при одинаковой степени защиты в четыре раза легче обычной защитной одежды.

Электро-магнитная и электронная техника. Хороший комплекс магнитных характеристик некоторых наноматериалов (железо в сочетании со слоями халькогенидов) делает перспективным их использование для записывающих устройств. Пленочные наноматериалы с плоской поверхностью и поверхностью сложной формы из магнито-мягких сплавов используют для видеоголовок магнитофонов, где они существенно превосходят по служебным свойствам традиционные материалы. Разработаны наноструктурная никелевая фольга и магнитомягкий наносплав «Файнмет». Высокие значения коэрцитивной силы ряда наноматериалов делают перспективным их использование в качестве постоянных магнитов. Углеродные нанотрубки, напыленные железом, а также интерметаллидами самария с кобальтом типа Sm_xCo_y применяются в магнитных чернилах и тонерах. Углеродные нанотрубки, заполненные карбидами тугоплавких металлов (TaC , NbC , MoC) могут использоваться в качестве сверхпроводников. Добавление нанопорошков в состав ряда сверхпроводников может улучшать такие показатели, как температуру перехода в сверхпроводящее состояние и критическую плотность тока за счет образования дополнительных центрами пиннинга. Пленки Ti-C-V с размером зерна около 2 нм обладали оптимальными электрофизическими свойствами в качестве резисторов при высокой термической стабильности по сравнению с объемными обычными образцами. Упо-

рядоченные структуры в виде «ковров» из нанопроволок могут использоваться как сенсоры или элементы экранов высокого разрешения.

Защита материалов. В ряде случаев для надежного функционирования изделий необходимо обеспечить высокие водо- и маслоотталкивающие свойства их поверхности. Примерами таких изделий могут служить автомобильные стекла, остекление самолетов и кораблей, защитные костюмы, стенки резервуаров для хранения жидкостей, строительные конструкции и т.п. В этих целях разработано покрытие на основе наночастиц оксида титана с размерами 20-50 нм и полимерного связующего. Данное покрытие резко снижает смачиваемость поверхности водой, растительным маслом и спиртовыми растворами.

Медицина и биотехнологии. Важной областью применения чистых наноструктурных материалов, в частности Ti, является использование их в медицинских целях – как имплантантов, протезов и в травматологических аппаратах. Причиной является сочетание высоких механических свойств (на уровне сложнолегированных сплавов) с высокой биологической совместимостью чистого металла. Наноструктурные пленки углерода и композиционные нанопленки на основе углерода и Si, SiO_x, SiN_x обладают хорошей биосовместимостью, химической, термической и механической стойкостью и поэтому их перспективно использовать для узлов биосенсоров, протезов и имплантантов. Нанопорошки лекарственных препаратов используются в медикаментах быстрого усвоения и действия для экстремальных условий (ранения при катастрофах и боевых действиях).

Военное дело. Ультрадисперсные порошки используются в составе ряда радиопоглощающих покрытий для 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 противника (т.н. «графитовая бомба»).

Ограничения в использовании наноматериалов. Оказалось, что материалы с наноразмерным зерном отличаются хрупкостью. В ряде случаев, в т.ч. при

использовании методов интенсивной пластической деформации, удается снизить проявление этого неприятного эффекта, например для нанокристаллических меди, титана и титановых сплавов, интерметаллида Ni_3Al . Тем не менее проблема остается достаточно актуальной. Важным ограничением для использования наноструктурных конструкционных материалов является их склонность к межкристаллитной коррозии из-за очень большой объемной доли границ зерен. В связи с этим они не могут быть рекомендованы для работы в условиях способствующих такой коррозии (диффузия с поверхности элементов внедрения и элементов диффундирующих 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, нестабильность их физико-химических и физико-механических свойств. Так при термических, радиационных, деформационных и т.п. воздействиях неизбежны рекристаллизационные, релаксационные, сегрегационные и гомогенизационные процессы, а также явления распада, фазовых превращений, спекания и заплывания нанопор и нанокапилляров, аморфизации или кристаллизации. Например, углеродных нановолокон, предназначенных для передачи жидкости, могут повреждаться под действием вибраций и возбуждаемой потоком жидкости структурной неустойчивости углерода. При формовании изделий из нанопорошков достаточно остро встает также проблема комкования (слипания наночастиц) в агломераты, что может осложнить получение материалов с заданной структурой и распределением компонентов.

Следует отметить, что на коммерческом рынке в настоящее время наиболее широко представлены такие наноматериалы, как нанопорошки металлов и сплавов, нанопорошки оксидов (кремния, железа, сурьмы, алюминия, титана), нанопорошки ряда карбидов, углеродные нановолокна, фуллереновые материалы.

9.6. Основные технологии получения наноматериалов

Основные методы получения наноматериалов можно разделить на ряд технологических групп (рис. 9.4): методы на основе порошковой металлургии, методы, в основе которых лежит получение аморфных прекурсоров, поверхностные техноло-

гии (создание покрытий и модифицированных слоев с наноструктурой), методы, основанные на использовании интенсивной пластической деформации, и комплексные методы, использующие последовательно или параллельно несколько разных технологий.

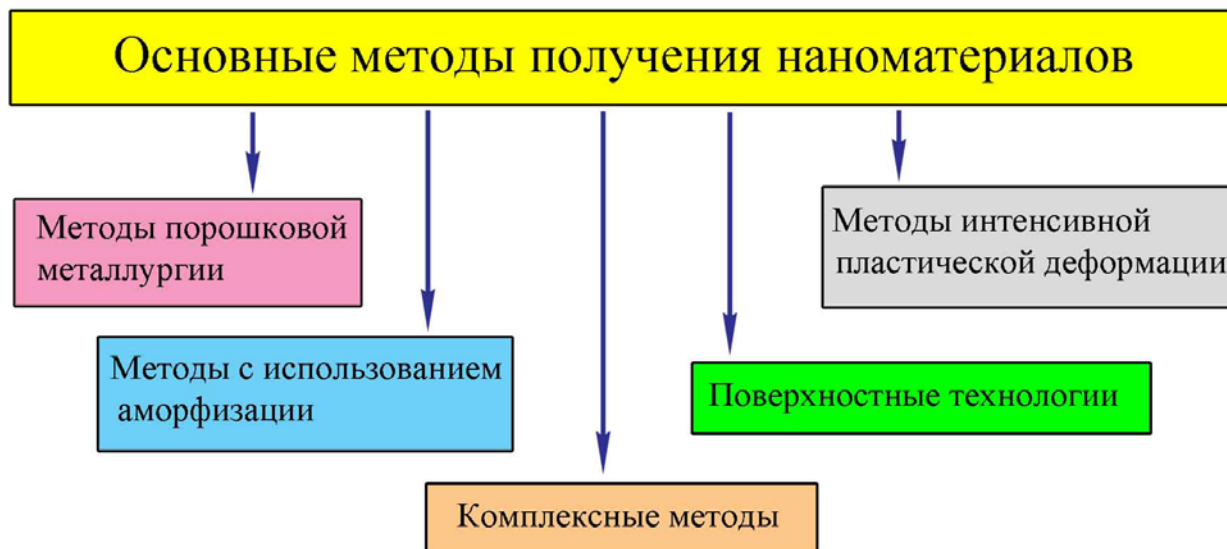
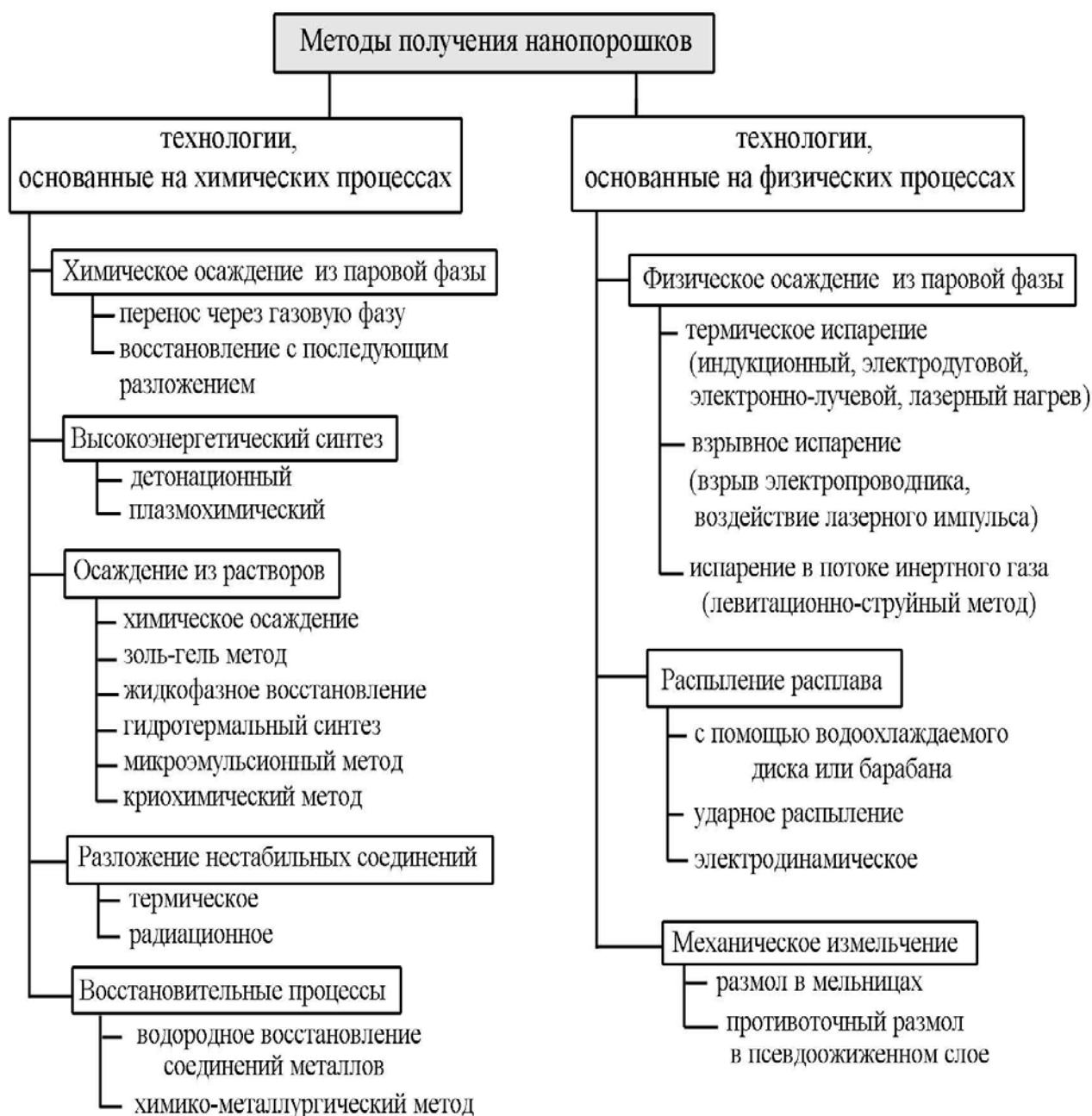


Рис. 9.4. Основные методы получения наноматериалов.

Можно выделить ряд общих подходов, которые являются характерными для всех методов получения нанопорошков и отличают их от методов получения обычных порошков:

- высокая скорость образования центров зарождения частиц,
- малая скорость роста частиц,
- наибольший размер получаемых частиц не более 100 нм,
- узкий диапазон распределения частиц по размерам,
- стабильность получения частиц заданного размерного диапазона,
- воспроизводимость химического и фазового состава частиц,
- повышенные требования к контролю и управлению параметрами процесса получения.



Общей особенностью наночастиц порошков, полученных любым методом, является их склонность к объединению в агрегаты и агломераты. В результате необходимо учитывать не только размеры отдельных наночастиц, но и размеры их объединений. Четкого терминологического различия между агрегатами и агломератами провести нельзя, однако считается, что в агрегатах связь между кристаллитами прочнее, а межкристаллитная пористость меньше. При последующем компактировании для достижения заданной пористости материала агрегатированные порошки требуют больших температуры и/или давления по сравнению с неагрегатированными.

Все группы методов получения нанопорошков можно условно разделить на две группы. К первой группе можно отнести технологии, основанные на химических процессах, а ко второй – на физических процессах. В соответствии с этим более подробно рассмотрим основные из используемых в настоящее время методов получения нанопорошков.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

Практические работы выполняются индивидуально. График выполнения лабораторных работ формируется преподавателем в начале каждого семестра и представляется студентам на первом аудиторном занятии практикума. Выполнение работ предполагает значительную самостоятельную работу как на этапе предварительной

подготовки к работе, так и при выполнении работы, оформлении отчета и подготовки к «защите» работы.

2.1 Подготовка к выполнению практической работы

Подготовка к лабораторной работе осуществляется студентом *до аудиторных занятий*, в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 3.3).

Студент обязан приходить на занятие подготовленным. Наличие «заготовки» к лабораторной работе является обязательным условием допуска студента к выполнению практической работы.

Студенты, не имеющие подготовки, к выполнению практической работы не допускаются.

2.2 Выполнение практической работы

На выполнение каждой практической работы отводится 4 часа аудиторного времени, в это время включается: получение допуска к работе, выполнение необходимых измерений и «защита» работы выполненной на предыдущем занятии.

Перед выполнением работы преподаватель проверяет степень подготовленности каждого студента. Для этого студент должен предоставить «заготовку» отчета в индивидуальном журнале ответить на следующие вопросы:

- Какова цель экспериментальной задачи? Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?
- Каков принцип работы экспериментальной установки? Перечислите основные этапы эксперимента.

Получив допуск к выполнению работы, студент должен ознакомиться с методикой выполнения, используемыми в процессе выполнения работы.

2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы

Оформление отчета и подготовка к «защите» практической работы осуществляется студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 2.3).

После оформления отчета студент готовится к «защите» практической работы, изучая теоретические основы данной темы, ориентируясь на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях. Для получения зачета по лабораторной ра-

боте студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и «защищает» его в ходе последующего собеседования.

2.4 Наименование предлагаемых к выполнению практических работ и методические указания к ним

№ п/п	Практические работы	Академ. часы
1	Изучения основных элементов работы в COMSOL Multiphysics	9
2	Моделирование механических свойств изделий металлов и сплавов в COMSOL Multiphysics.	9
3	Моделирование механических свойств керамических и стеклянных изделий в COMSOL Multiphysics.	9
4	Моделирование механических свойств изделий полимерных и композиционных материалов в COMSOL Multiphysics.	9
Итого		36

2.5. Изучения основных элементов работы в COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics –универсальная среда для моделирования сложных физических процессов. Пакет COMSOL Multiphysics позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями. Программа содержит различные решатели, которые помогут быстро справиться даже с самыми сложными задачами, а простая структура приложения обеспечивает простоту и гибкость использования.

COMSOL Desktop® — это комплексная интегрированная среда для моделирования физических явлений и разработки приложений, в которой есть все необходимое для создания удобного пользовательского интерфейса для ваших моделей. Рабочий стол гибко настраивается. Окна можно изменять в размерах, двигать, закреплять и разъединять. Все изменения в макете будут сохранены по завершении сеанса и снова отобразятся при следующем запуске COMSOL Multiphysics. По мере построения модели будут добавляться новые окна и виджеты.

Панель инструментов быстрого доступа

Панель инструментов быстрого доступа содержит такие функции, как Открыть, Сохранить, Отменить, Повторить, Копировать, Вставить и Удалить. Набор инструментов можно настроить в списке панели инструментов быстрого доступа.

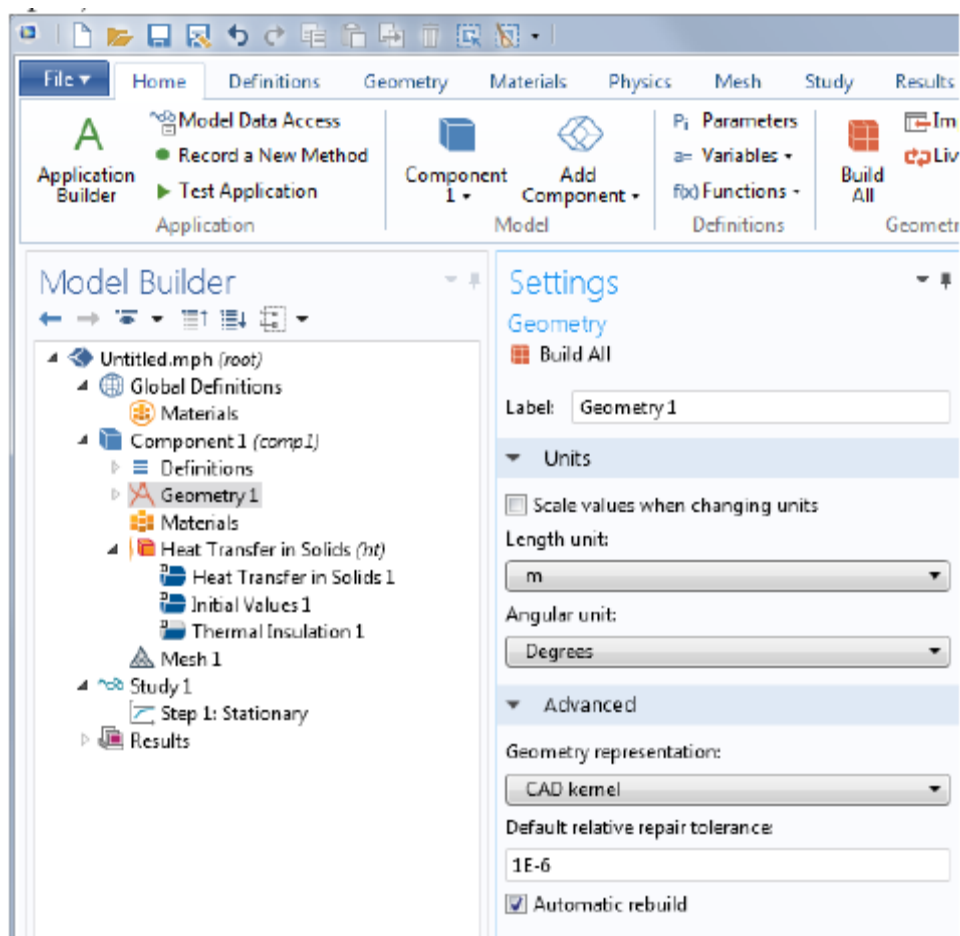
Лента

Лента в верхней части рабочего стола содержит команды для выполнения большинства задач моделирования. Лента доступна только в версии среды COMSOL Desktop для Windows®, а в версиях для OS X и Linux® вместо нее используются меню и панели инструментов. Чтобы приступить к созданию приложения на основе вашей модели, просто нажмите кнопку Среда разработки приложений для перехода из Построителя моделей в Среду разработки.

Окно настроек

В этом окне задаются основные характеристики модели, включая размерность геометрии, свойства материалов, граничные и начальные условия, а также любая другая информация, которая может понадобиться для решения модели.

На иллюстрации ниже показано окно Settings (Настройки) узла Geometry (Геометрия).



Окна графиков

Окна для вывода графических данных. Как и Графическое окно, окна графиков служат для визуализации результатов. Для одновременного отображения нескольких результатов можно использовать несколько окон графиков. Особым случаем является окно Convergence Plot (График сходимости), которое автоматически создает и выводит на экран график сходимости решения в ходе выполнения модели.

Информационные окна

Это окна для вывода неграфических данных. К ним относятся:

- Messages (Сообщения): здесь отображается различная информация о текущем сеансе COMSOL.

- Progress (Ход выполнения): здесь доступны кнопки остановки и информация о ходе решения.

- Log (Журнал): здесь отображаются такие сведения от решателя, как число степеней свободы, время решения и итерационные данные решателя.

- Table (Таблица): числовые данные в табличном формате, который задается в разделе Results (Результаты).

- External Process (Внешний процесс): панель управления кластерными, облачными и пакетными задачами.

Прочие окна

- Add Material (Добавить материал) и Material Browser (Браузер материалов): предоставляет доступ к библиотекам свойств материалов. Браузер материалов позволяет изменять свойства материалов.

- Selection List (Список выбора): перечень объектов геометрии, областей, границ, граней и точек, которые доступны для выбора в настоящий момент.

Выпадающий список Windows (Окна) на вкладке ленты Home (Главная) позволяет переключаться между всеми окнами COMSOL Desktop. (В OS X и Linux® этот список находится в меню Windows (Окна).)

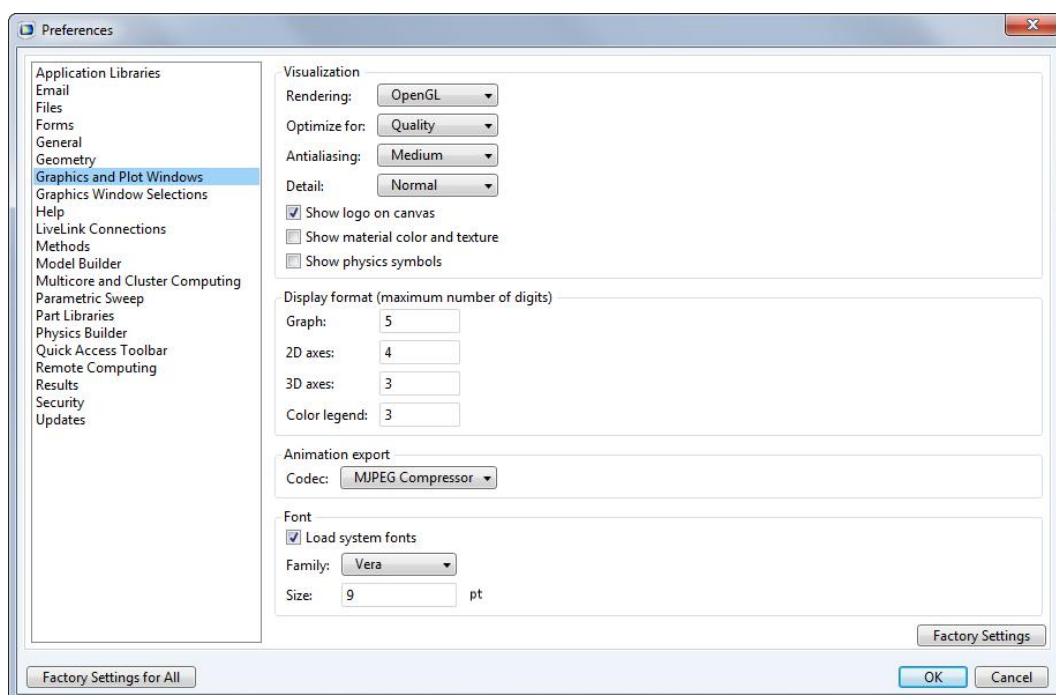
Шкала выполнения с кнопкой Cancel (Отмена)

Шкала выполнения с кнопкой для отмены текущего вычисления, если оно запущено, расположена в правом нижнем углу интерфейса COMSOL Desktop.

Динамическая справка

Окно Help (Справка) отображает контекстную справку об открытых окнах и выбранных узлах дерева модели. После запуска (например, клавишей F1) окно Help (Справка) отображает динамическую справку (только на английском языке) для выбранного пользователем узла или окна. В окне Help (Справка) можно также искать сведения по другим темам, таким как пункты меню.

Параметры — это пользовательские настройки среды моделирования. Большинство из них применяются ко всем сеансам моделирования, но некоторые сохраняются прямо в модели. Окно Preferences (Параметры) можно вызвать из меню File (Файл).



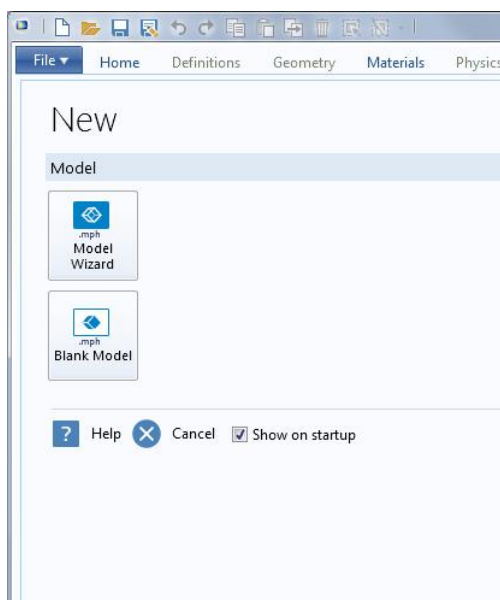
В окне Preferences (Параметры) можно изменять такие настройки, как режим построения графики, количество знаков в числовых результатах, максимальное число ядер ЦП для выполнения вычислений, а также пути к пользовательским библиотекам приложений. Просмотрите текущие настройки, чтобы изучить возможные варианты.

Доступны три режима построения графики: OpenGL®, DirectX® и Software Rendering (Программное построение). Режим DirectX® недоступен в OS X и Linux®. Для применения в Windows® необходимо, чтобы библиотеки DirectX® были установлены вместе с COMSOL. Если на компьютере нет дискретной видеокарты, может

потребуется переключение в режим Software Rendering (Программное построение), который работает медленнее, однако поддерживает все графические возможности.

Создание новой модели

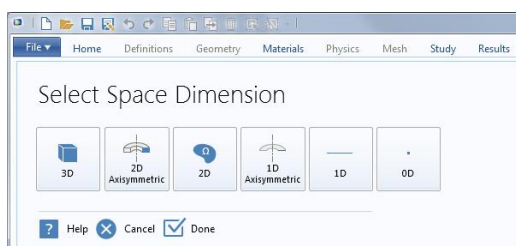
Вы можете создать модель при помощи Мастера создания моделей или на основе шаблона Пустой модели, как показано на иллюстрации ниже.



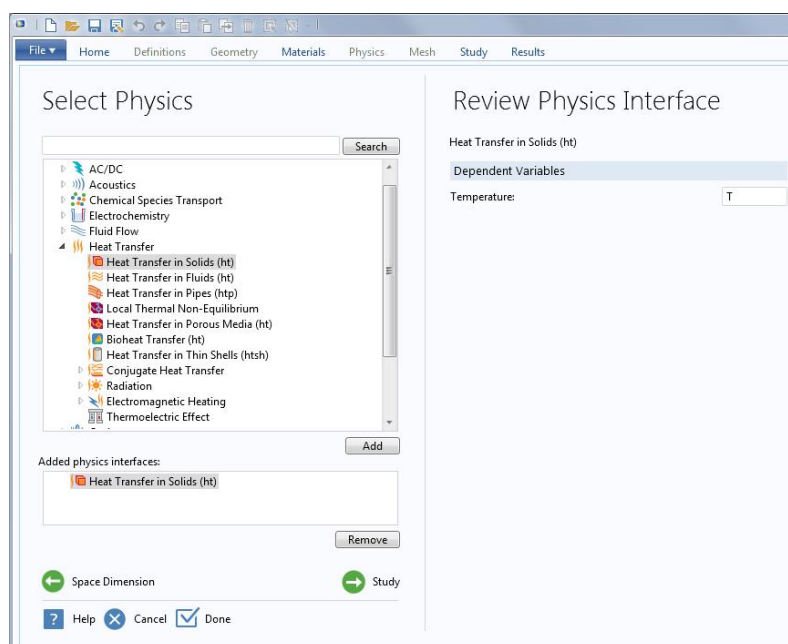
Создание модели с помощью мастера создания моделей

Мастер создания моделей поможет вам задать размерность пространства, физику и тип исследования всего за несколько шагов:

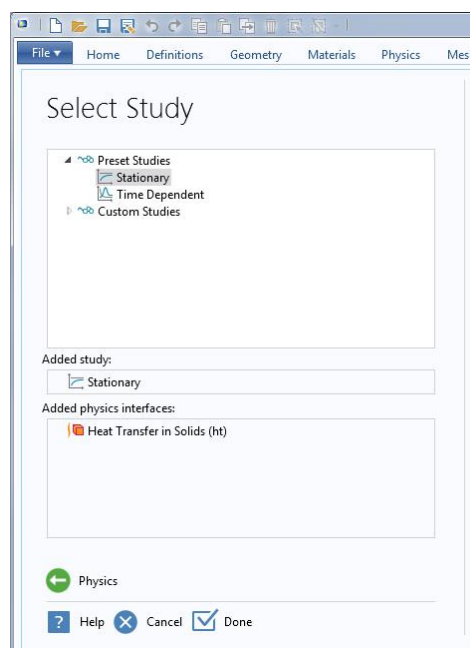
1. Сначала нужно выбрать размерность пространства для компонента модели: 3D (Трехмерное), 2D Axisymmetric (Двумерное аксиально-симметричное), 2D (Двумерное), 1D Axisymmetric (Одномерное аксиально-симметричное) или 0D (Нульмерное).



2. Далее добавьте один или несколько интерфейсов физик. Для удобства поиска они сгруппированы по нескольким разделам физики. Эти разделы не соответствуют продуктам напрямую. При добавлении продуктов в COMSOL Multiphysics дополнительные интерфейсы физик могут появиться сразу в нескольких разделах.



3 Выберите тип исследования, соответствующий одному или нескольким решателям, которые будут использоваться при вычислениях. и наконец, нажмите Done (Готово). На рабочем столе появится дерево модели с учетом тех настроек, которые были заданы в Мастере создания моделей.

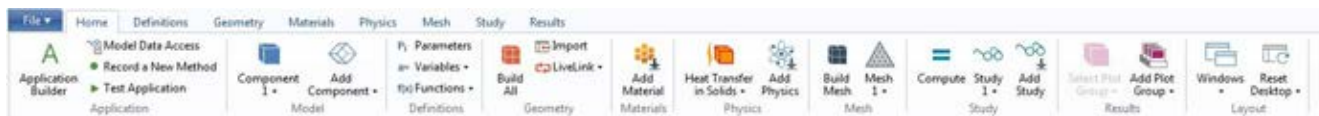


Создаем модель на основе шаблона

Чтобы открыть интерфейс COMSOL Desktop без компонентов и исследований, нажмите кнопку Blank Model (Пустая модель). Для добавления компонента определенной пространственной размерности, интерфейса физик или исследования достаточно щелкнуть правой кнопкой мыши в дереве модели.

Лента и панель инструментов быстрого доступа

Вкладки ленты COMSOL Desktop отражают процесс моделирования и функциональность, доступную на каждом этапе, включая создание приложений на базе ваших собственных моделей.



На вкладке Home (Главная) расположены кнопки самых часто используемых операций для изменения моделей, запуска моделирования, а также построения и тестирования приложений. Среди этих операций — изменение параметров модели для параметризованной геометрии, анализ свойств и физики материалов, построение сетки, проведение исследования и визуализация результатов моделирования.

У всех основных этапов процесса моделирования есть стандартные вкладки. Они упорядочены слева направо с учетом порядка действий: Definitions (Определения), Geometry (Геометрия), Materials (Материалы), Physics (Физики), Mesh (Сетка), Study (Исследование) и Results (Результаты).



Контекстные вкладки отображаются, только когда это необходимо — например, вкладка 3D Plot Group (Группа 3D-графиков) доступна только при добавлении соответствующей группы графиков или при выборе узла в дереве модели.

Модальные вкладки используются для особых операций, когда прочие возможности ленты временно не требуются. Примером может служить модальная вкладка Work Plane (Рабочая плоскость). При использовании рабочих плоскостей остальные вкладки не отображаются, так как не содержат нужных операций.



Построитель моделей и дерево модели

Построитель моделей — это инструмент для задания параметров модели и ее компонентов: алгоритма решения, анализа результатов и отчетов. Для этого строится дерево модели.

Построение модели начинается со стандартного дерева модели, в которое вы можете добавлять узлы и менять их настройки.

Все узлы в дереве модели по умолчанию являются родительскими узлами верхнего уровня. Для добавления и просмотра списка добавленных дочерних узлов, или подузлов, щелкните правой кнопкой мыши соответствующий узел. Именно таким образом узлы добавляются в дерево.

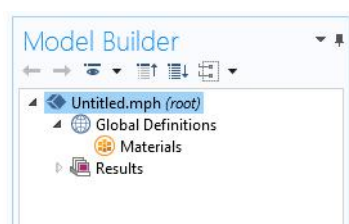
При щелчке по дочернему узлу открываются его настройки в окне Settings (Настройки). Именно здесь можно изменить настройки узла.

Важно отметить, что когда открыто окно Help (Справка) (с помощью пункта Help (Справка) в меню File (Файл) или клавиши F1), пользователь может получить динамическую справку (только на английском языке), щелкнув какой-либо узел.

Узлы root (корневой), global definitions (глобальные определения) и results (результаты)

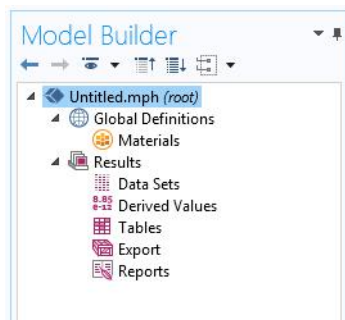
У дерева модели всегда есть корневой узел (изначально называется Untitled.mph), а также узлы Global Definitions (Глобальные определения) и Results (Результаты).

Имя корневого узла — это имя файла мультифизической модели, или MPH-файла, в котором хранится эта модель. В настройках корневого узла указаны имя автора, система единиц измерения по умолчанию и другие параметры.



По умолчанию в узле Global Definitions (Глобальные определения) есть подузел Materials (Материалы). Узел Global Definitions (Глобальные определения) служит для задания параметров, переменных, функций и связей, которые могут использоваться в дереве модели. Их можно применять, например, для определения значений и функциональных зависимостей свойств материалов, сил, геометрии и других элементов. Сам по себе узел Global Definitions (Глобальные определения) не имеет настроек, но их много у его дочерних узлов. В узле Global Definitions (Гло-

бальные определения) > Materials (Материалы) хранятся свойства материалов, на которые можно ссылаться в узлах Component (Компонент) модели.



Узел Results (Результаты) содержит решение, полученное после моделирования, а также инструменты для обработки данных. Изначально узел Results (Результаты) состоит из пяти подузлов:

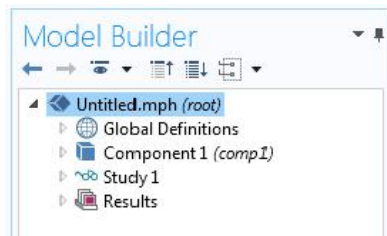
- Наборы данных (Data Sets) содержат список доступных пользователю решений.
- Производные значения (Derived Values) можно получить на основе решения, используя инструменты постобработки.
- Таблицы (Tables) удобны для отображения производных значений или результатов работы датчиков, которые в реальном времени отслеживают ход решения при моделировании.
- Функция экспорта (Export) позволяет выбирать числовые данные, изображения и анимацию для экспорта в файлы.
- Автоматически созданные или пользовательские отчеты (Reports) о модели в формате HTML или Microsoft® Word®.

К этим пяти подузлам можно также добавить подузлы Plot Group (Группа графиков), задающие графики, которые отображаются в Графическом окне или в окнах графиков. Некоторые графики создаются автоматически в зависимости от вида моделирования, но вы также можете добавить дополнительные графики — для этого нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на узле Results (Результаты) и выбрать тип графика из списка.

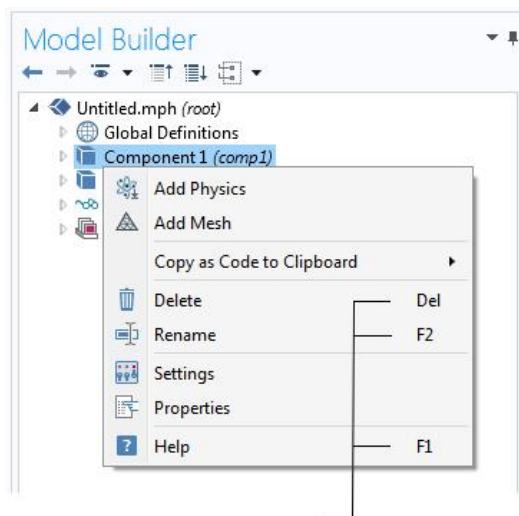
Узлы component (компонент) и study (исследование)

Помимо трех только что описанных узлов есть еще два дополнительных типа узлов верхнего уровня: Узлы Component (Компонент) и Study (Исследование).

Обычно их создает Мастер создания моделей при добавлении новой модели. После того, как в Мастере создания моделей выбран тип моделируемой физики и тип исследования (например, стационарное, зависящее от времени, частотный интервал или анализ собственной частоты), он автоматически создает по одному узлу каждого типа и отображает их содержимое.



При разработке модели можно добавить дополнительные узлы Component (Компонент) и Study (Исследование). Так как в модели может быть несколько узлов Component (Компонент) и Study (Исследование), у них должны быть разные имена во избежание путаницы. Поэтому эти типы узлов следует переименовать с учетом их индивидуального назначения.



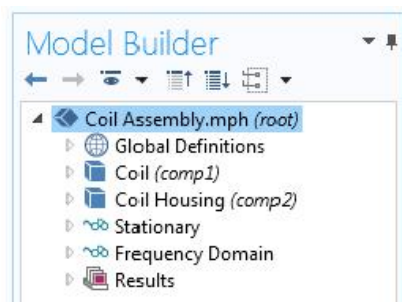
Если у модели несколько узлов Component (Компонент), их можно связать для получения более сложной последовательности моделирования. Важно отметить, что узел Study (Исследование) может выполнять различные типы вычислений, поэтому у каждого такого узла есть своя кнопка Compute (Вычислить).

Для примера предположим, что требуется построить модель катушки в сборе, состоящей из двух частей — собственно катушки и ее корпуса. Создадим два узла Component (Компонент) — один для катушки и один для корпуса. При-своим каждому узлу название с учетом имени объекта. Аналогично создадим два узла Study

(Исследование): первый будет моделировать постоянное, или стационарное, поведение сборки, а второй — ее частотную характеристику.

Назовем эти два узла Stationary (Стационарное) и Frequency Domain (Частотный интервал) соответственно (можно использовать названия на русском языке). Когда модель будет готова, сохраним ее в файл под названием Coil Assembly.mph. На иллюстрации ниже показано, как выглядит дерево модели в Построителе моделей на данном этапе.

На этой иллюстрации корневой узел называется Coil Assembly.mph — так же, как и файл, в котором хранится модель. Узлам Global Definitions (Глобальные определения) и и Results (Результаты) присвоены имена по умолчанию. Кроме того, здесь есть два узла Component (Компонент) и два узла Study (Исследование), имена которых были выбраны в предыдущем подразделе.



Параметры, переменные и их область действия

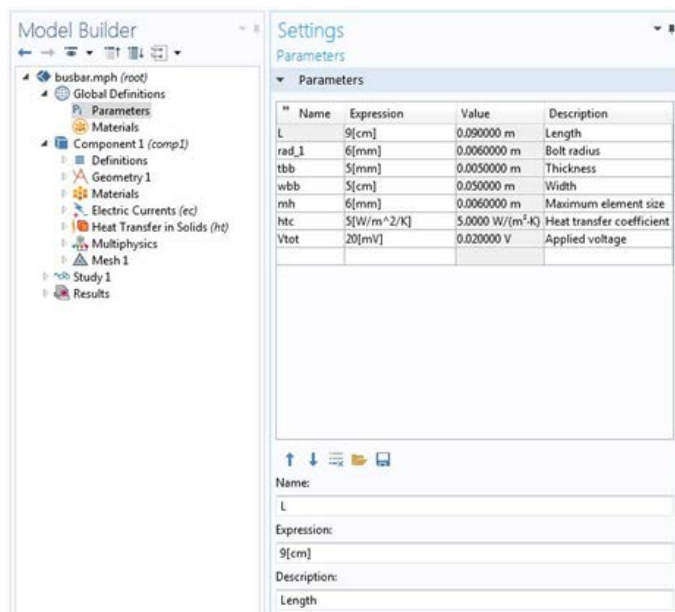
Параметры — это пользовательские скалярные константы, которые доступны во всех элементах модели. Другими словами, они «глобальные» по своей сути. Типичные варианты применения:

- Параметризация геометрических размерностей.
- Задание размеров элементов сетки.
- Задание параметрического исследования (т. е. моделирования, которое повторяется для большого числа значений какого-либо параметра — например, частоты или нагрузки).

Выражение параметра может содержать числа, параметры, встроенные константы, встроенные функции с параметрами в качестве аргументов, а также унарные и бинарные операторы. Так как эти выражения оцениваются до запуска моделирования, параметры не могут зависеть от переменной времени t , а также от про-

пространственных координат x , y , z и других переменных, относительно которых решаются уравнения в модели.

Важно помнить, что имена параметров чувствительны к регистру. Параметры задаются в дереве модели в узле Global Definitions (Глобальные определения).



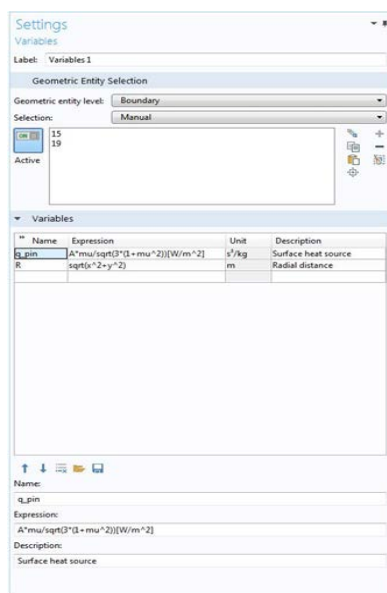
Переменные задаются либо в узле Global Definitions (Глобальные определения), либо в подузле Definitions (Определения) узла Component (Компонент). Как правило, выбор места для объявления переменной зависит от того, должна ли переменная быть глобальной (т. е. доступной во всех элементах дерева модели) или локальной (т. е. доступной только в одном узле Component (Компонент)). Как и выражение параметра, выражение переменной может содержать числа, параметры, встроенные константы, а также унарные и бинарные операторы. Однако в нем уже могут быть такие переменные, как t , x , y или z , функции с выражениями для переменной в качестве аргумента, а также переменные, относительно которых решается уравнение, и их временные и пространственные производные.

Параметры и переменные модели можно использовать в приложениях. Например, можно разрешить пользователю приложения изменять значение параметра. Кроме того, переменные для использования в приложениях задаются в Среде разработки приложений в узле Declarations (Объявления).

«Область действия» параметра или переменной указывает, где этот параметр или переменную можно использовать в выражениях. Все параметры задаются в узле

Global Definitions (Глобальные определения) дерева модели. Это означает, что у них глобальная область действия и что их можно использовать в любом элементе дерева модели. Переменные тоже можно объявить в узле Global Definitions (Глобальные определения) и назначить им глобальную область действия, но для них действуют другие ограничения. Например, переменные нельзя использовать в узлах Geometry (Геометрия), Mesh (Сетка) и Study (Исследование), кроме случаев, когда переменная фигурирует в выражении, которое задает условие остановки моделирования. Переменная, объявленная в подузле Definitions (Определения) узла Component (Компонент), имеет локальную область действия и может использоваться только в этом узле Component (Компонент), но не в узлах Geometry (Геометрия) или Mesh (Сетка). Их можно использовать, например, для задания свойств материала в подузле Materials (Материалы) узла Component (Компонент) или для определения граничных условий и взаимодействий. Иногда имеет смысл ограничить область действия переменной до определенной части геометрии — например, до отдельных границ. Для этого в настройках переменной можно указать, определена ли она для всей геометрии узла Component (Компонент) либо только для отдельных областей, границ, граней или точек.

На иллюстрации объявлены две переменные, q_{pin} и R , область действия которых ограничена всего до двух границ с номерами 15 и 19.



Таким выборкам можно присвоить имя и затем ссылаться на них в любом месте модели — например, при задании свойств материала или граничных условий, в которых используется переменная. Чтобы присвоить имя выборке, нажмите кнопку Create Selection (Создать выборку) справа от списка выборок.

Хотя переменные, объявленные в подузле Definitions (Определения) узла Component (Компонент) имеют локальную область действия, к ним можно обращаться и за пределами узла Component (Компонент) в дереве модели, если достаточно точно указать их имена. Для этого служит «точечная нотация», в которой перед именем переменной через точку указывается имя узла Component (Компонент), где она объявлена. Другими словами, если в узле Component (Компонент) под названием MyModel объявлена переменная foo, то к ней можно обратиться за пределами этого узла с помощью конструкции MyModel.foo. Это удобно, когда переменная нужна для построения графиков в узле Results (Результаты). Переменные, объявленные в узле Declarations (Объявления) Среды разработки приложений, доступны во всех объектах и методах форм, но не могут использоваться в Построителе моделей.

Встроенные константы, переменные и функции

В COMSOL Multiphysics встроено множество констант, переменных и функций. Их имена зарезервированы и поэтому недоступны для переопределения. При попытке присвоить пользовательской переменной, параметру или функции зарезервированное имя система выделит введенный текст оранжевым (предупреждение) или красным (ошибка) цветом, а при выборе этой текстовой строки отобразит всплывающую подсказку.

Типичные варианты применения:

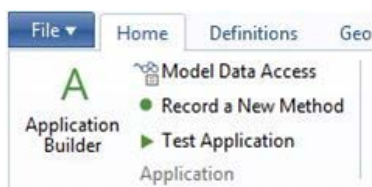
- Математические константы, такие как π (3,14...) и мнимая единица i или j .
- Физические константы, такие как g_const (ускорение свободного падения), c_const (скорость света) и R_const (универсальная газовая постоянная).
- Переменная времени t .

- Производные первого и второго порядков от искомым переменных (решения), имена которых происходят от имен пространственных координат и других искомым переменных, заданных пользователем.

- Математические функции, такие как \cos , \sin , \exp , \log , \log_{10} и $\sqrt{}$.

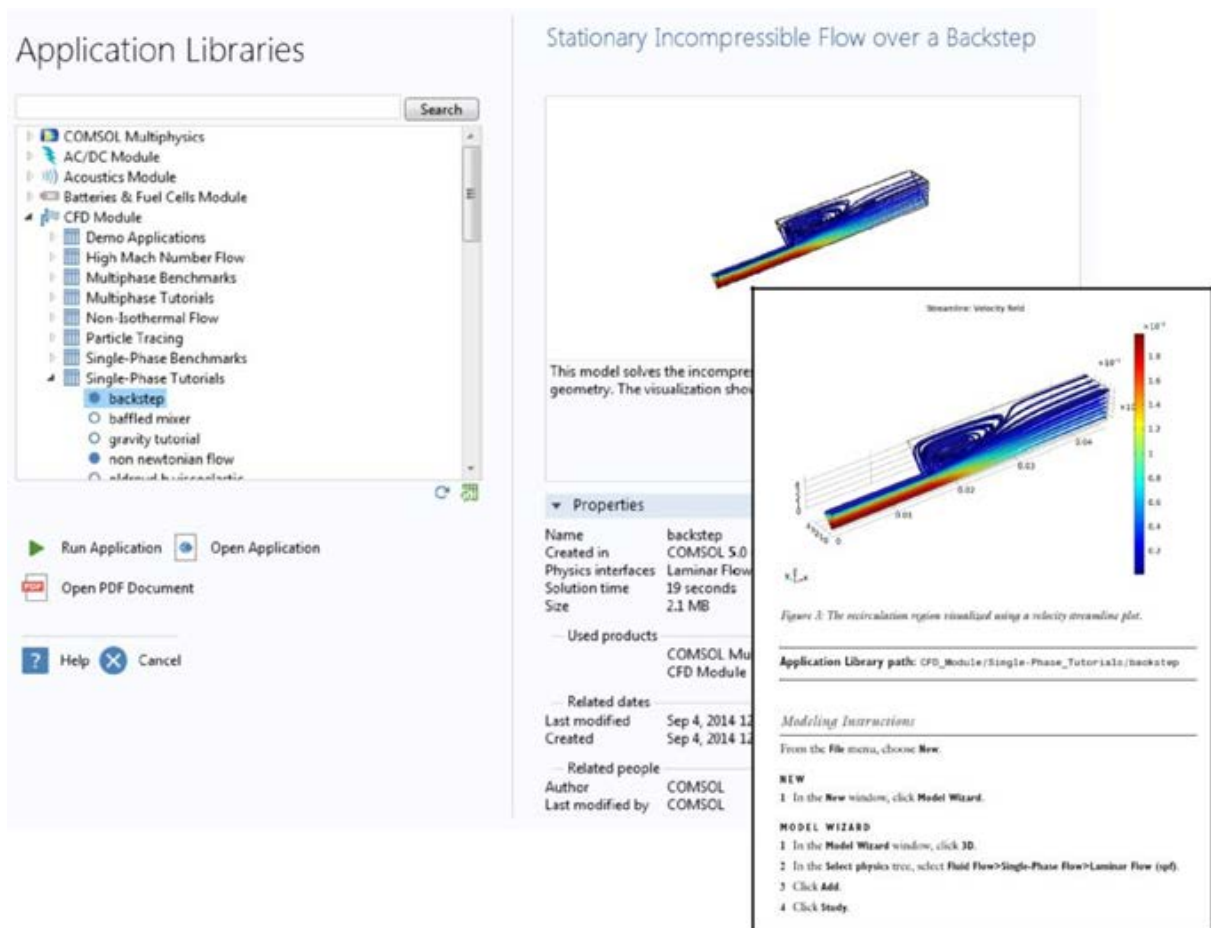
Разработка и построение приложений для моделирования




Чтобы создать приложение на основе модели, запустите Среду разработки приложений, нажав ее кнопку на вкладке ленты Home (Главная). Дополнительная информация о создании приложений в среде COMSOL приведена в руководстве «Введение в Среду разработки приложений».





Библиотеки приложений

Библиотеки приложений (Application Libraries) — это наборы MPH-файлов, содержащих учебные модели и готовые к работе приложения с сопроводительной документацией. В документацию к учебным моделям входит теоретическая часть и пошаговые инструкции. Для готовых приложений есть подробные инструкции по работе с ними. Пользователи могут изменять учебные модели и приложения с учетом собственных потребностей. У каждого модуля расширения для той или иной физики есть своя библиотека приложений с примерами из соответствующего раздела физики. Пошаговые инструкции и MPH-файлы можно применять как шаблоны для создания собственных моделей. Чтобы открыть окно Библиотеки приложений, выберите Application Libraries (Библиотеки приложений) в меню Windows (Окна) на панели инструментов Home (Главная) или выберите File (Файл) > Application Libraries (Библиотеки приложений) и найдите нужное приложение в поле поиска либо укажите нужную папку под папкой модуля.







Выберите Open Application (Открыть приложение)  , Run Application  (Запустить приложение) или Open PDF Document (Открыть PDF-документ)  . Чтобы найти приложение по имени или указать модуль, можно также выбрать File (Файл) > Help (Справка) > Documentation (Документация) в интерфейсе COMSOL Multiphysics.

MPH-файлы в Библиотеке приложений COMSOL бывают двух форматов — полные и компактные MPH-файлы:

▲ Полные MPH-файлы, содержащие все сетки и решения. Такие файлы отображаются в окне Библиотек приложений со значком  , а для готовых к запуску приложений — со значком  . Если размер MPH-файла превышает 25 МБ, при выборе узла модели в дереве Библиотек приложений отображается подсказка с текстом Large file («Большой файл») и размером файла.

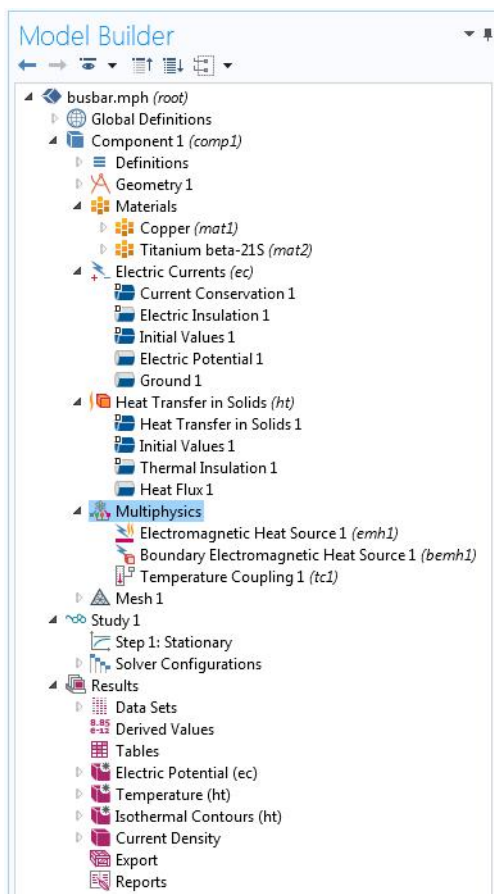
▲ Компактные MPH-файлы, содержащие все настройки модели, но без сеток и данных решения, что позволяет сэкономить место на DVD (в нескольких MPH-файлах решений нет по другим причинам). С их помощью можно изучать настрой-

ки, а также строить сетки и пересчитывать приложения. Кроме того, при обновлении Библиотеки приложений можно загрузить полные версии большинства этих файлов со всеми сетками и решениями. Такие файлы отображаются в окне Библиотек приложений со значком , а для готовых к запуску приложений — со значком . При наведении курсора на компактный файл в окне Библиотек приложений появляется сообщение No solutions stored («Не содержит решений»). Если доступен для загрузки полный MPH-файл, в контекстном меню соответствующего узла отображается пункт Download File with Solutions  (Загрузить файл с решениями).

COMSOL регулярно обновляет Библиотеки приложений. Чтобы проверить все доступные обновления, выберите пункт Update COMSOL Application Library (Обновить Библиотеку приложений COMSOL)  в меню File (Файл) > Help (Справка) (для пользователей Windows[®]) или в меню Help (Справка) (для пользователей OS X и Linux[®]). Далее откроется веб-сайт COMSOL, на котором можно выбрать новые приложения и последние обновления для загрузки.

Рабочий процесс и последовательность операций

В окне Построителя моделей каждый этап процесса моделирования — от объявления глобальных переменных до создания отчета с результатами — отображается в дереве модели.



Все операции в дереве модели выполняются по порядку — сверху вниз.

В следующих разделах дерева модели учитывается порядковый номер узла, поэтому для изменения последовательности операций можно перемещать подузлы вверх или вниз:

- Геометрия.
- Материалы.
- Физика.
- Сетка.
- Исследование.
- Группы графиков.

В разделе Component Definitions (Определения компонента) дерева модели также учитывается порядок узлов следующих типов:

- Идеально подобранный слой.
- Бесконечные элементы.

Переупорядочить узлы можно следующими способами:

- Перетащить их мышью (Drag-and-drop).
- Щелкнуть правой кнопкой мыши узел и выбрать Move Up (Сдвинуть вверх) или Move Down (Сдвинуть вниз).

- Нажать Ctrl + стрелка вверх или Ctrl + стрелка вниз.

В других разделах при выполнении операций порядок узлов не учитывается, однако для удобства некоторые узлы можно перемещать. Одним из примеров являются дочерние узлы в узле Global Definitions (Глобальные определения)

Чтобы просмотреть последовательность операций в виде программного кода, сохраните модель как файл модели для MATLAB® или как файл модели для Java®, предварительно выбрав Compact History (Компактный журнал) в меню File (Файл). Обратите внимание, что в журнале модели ведется учет всех изменений, внесенных в модель при ее построении. Соответственно, в журнале указаны и все исправления, в том числе изменения параметров, граничных условий и методов решателя. При включении компактного режима из журнала удаляются все переопределенные изменения и остаются только те недавние, которые действительны для модели.

При работе с интерфейсом COMSOL Desktop и Построителем моделей вы непременно оцените их простую и строгую организацию. Однако никакое описание пользовательского интерфейса не заменит реальной работы с ним. Поэтому в следующих разделах рекомендуем вам тщательно изучить два примера, чтобы получить общее представление о системе.

2.6 Моделирование механических свойств изделий металлов и сплавов в COMSOL Multiphysics.

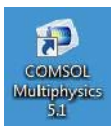
Рассмотрим моделирование механических свойств изделий металлов и сплавов на примере структурного анализа гаечного ключа.

Сам гаечный ключ сделан, разумеется, из стали, являющейся пластичным материалом. Если к гаечному ключу приложить слишком большой крутящий момент, то инструмент навсегда деформируется из-за упругоэластичных свойств стали в случае превышения предельного напряжения текучести. Чтобы проверить, правильно ли выбраны линейные размеры ручки, нужно убедиться, что уровень механического напряжения ниже уровня предельного напряжения текучести.

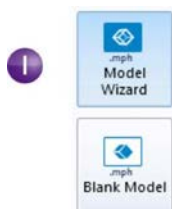
Сначала открывается Мастер создания моделей и добавляется опция физики для механики твердого тела. Затем импортируется геометрия, а в качестве материала выбирается сталь. После этого вы можете изучить остальные этапы создания модели — определить параметр и граничное условие для нагрузки, выбрать геометрические объекты в Графическом окне, задать сетку и тип исследования, а затем изучить результаты как в числовом виде, так и с помощью визуализации.

Мастер создания моделей

1 Для запуска приложения дважды щелкните значок COMSOL на рабочем столе, после чего откроется новое окно с двумя вариантами создания модели: Model Wizard (Мастер создания моделей) или Blank Model (Пустая модель).





Если вы выбрали Blank Model (Пустая модель), щелкните правой кнопкой мыши корневой узел в дереве модели, чтобы вручную добавить узлы Component (Компонент) и Study (Исследование). В этом учебном примере следует нажать кнопку Model Wizard (Мастер создания моделей).

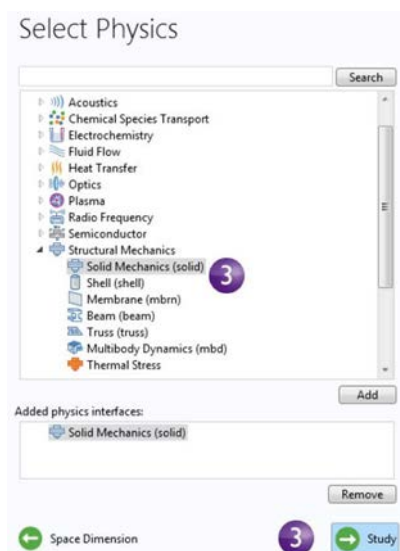




Если ПО COMSOL уже запущено, то для запуска Мастера создания моделей можно выбрать New (Новая) в меню File (Файл). Выберите Model Wizard (Мастер создания моделей). Мастер создания моделей поможет вам выполнить первичную настройку модели. В следующем окне можно выбрать размерность пространства моделирования.

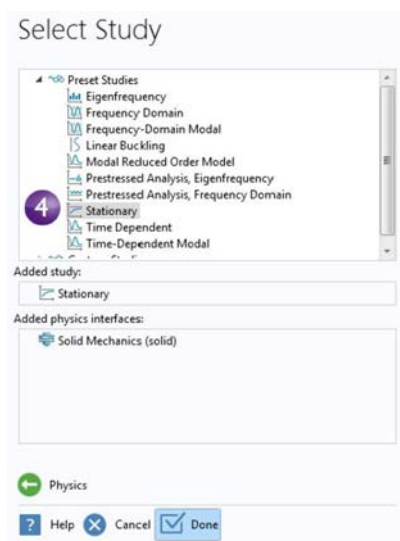
2 В окне Select Space Dimension (Выбор размерности пространства) выберите 3D (Трехмерное).




3 В Select Physics (Выберите физику), выберите Structural Mechanics > Solid Mechanics (solid) (Механика конструкций > Механика твердого тела (твердое)  . Нажмите Add (Добавить). Если в системе не установлены модули расширения, то единственным интерфейсом физик в папке Structural Mechanics (Механика конструкций) будет Solid Mechanics (Механика твердого тела). На иллюстрации справа показан внешний вид папки Structural Mechanics (Механика конструкций) со всеми модулями расширения. Для продолжения нажмите Study  (Исследование).



4 Нажмите Stationary (Стационарное)  в разделе Preset Studies (Предустановленные типы исследований). По завершении нажмите Done  (Готово).





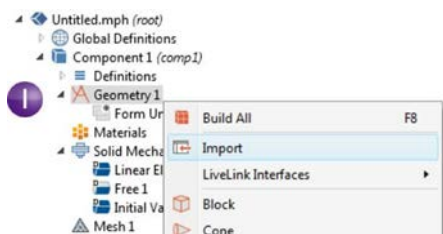
Решатель и настройки уравнений для предустановленных типов исследования адаптируются к выбранным физикам — в данном примере, к механике твердого тела. Так как здесь нет зависящих от времени нагрузок и свойств материалов, использу-


ется стационарный тип исследования. Все элементы в разделе Custom Studies (Пользовательские типы исследований)  настраиваются вручную.

Геометрия

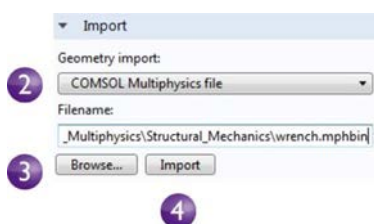
В этой учебной модели используется геометрия, созданная и сохраненная в собственном формате COMSOL для САПР, — .mphbin. Местоположение библиотеки приложений, содержащей файл из данного упражнения, зависит от того, как установлено приложение и в какой операционной системе. В Windows® файл обычно находится в следующей директории: C:\Program Files\COMSOL\COMSOL\Multiphysics\applications51.

1 В окне Построителя моделей в разделе Component 1 (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши Geometry 1  (Геометрия 1) и выберите Import (Импорт) .



В качестве альтернативы можно нажать кнопку Import (Импорт)  на вкладке ленты Geometry (Геометрия).

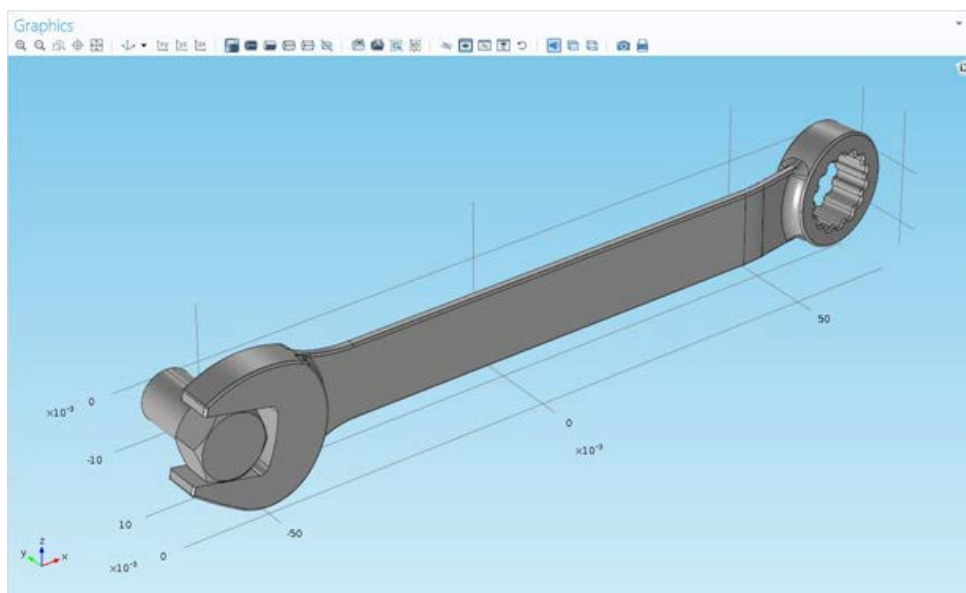
2 В окне настроек функции Import (Импорт) выберите в списке Geometry import (Импорт геометрии) файл COMSOL Multiphysics.









3 Нажмите Browse (Просмотр) и найдите файл **wrench.mphbin** в папке библиотеки приложений в каталоге, где установлено ПО COMSOL. Директория по умолчанию в Windows®: C:\Program Files\COMSOL\COMSOL51\Multiphysics\applications\ COMSOL_Multiphysics\Structural_Mechanics\wrench.mphbin

Для добавления файла дважды щелкните его или нажмите Open (Открыть).


4 Нажмите Import (Импорт), чтобы открыть геометрию в Графическом окне.



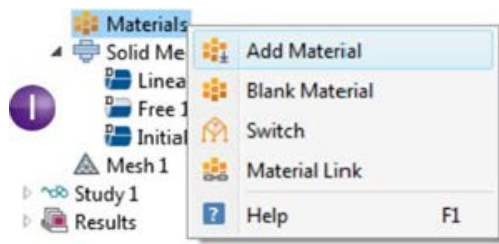
5 Щелкните геометрию гаечного ключа в Графическом окне и попробуйте подвигать ее или изменить размеры. Если навести указатель мыши на геометрию или щелкнуть ее, она изменит цвет. Нажмите кнопки Zoom In (Приблизить) , Zoom Out (Отдалить) , Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) , Zoom Extents (Масштаб сцены)  и Transparency (Прозрачность)  на панели инструментов Графического окна и посмотрите, что произойдет с геометрией:

- Чтобы повернуть геометрию, щелкните ее и потяните в нужную сторону в Графическом окне.
- Чтобы сдвинуть геометрию, щелкните ее правой кнопкой мыши и потяните.
- Чтобы приблизить или отдалить геометрию, нажмите колесико мыши и потяните, не отпуская его.
- Чтобы вернуться в исходную позицию, нажмите кнопку Go to Default 3D View  (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов.

Материалы

В узле Materials (Материалы)  хранятся свойства материалов для всех физик и всех областей узла Component (Компонент). Для болта и инструмента будем использовать одну и ту же универсальную сталь. Вот как выбрать ее в COMSOL.

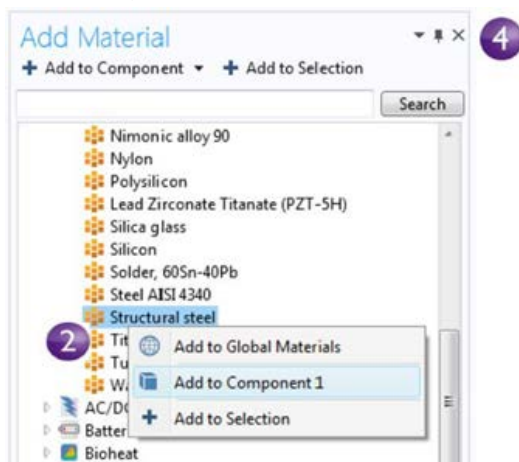
1 Откройте окно Add Materials (Добавление материалов). Окно Add Materials (Добавление материалов) можно открыть двумя способами:



- Щелкните правой кнопкой мыши Component1>Materials (Компонент 1 > Материалы) в Построителе моделей и выберите Add Material (Добавить материал)

- Перейдите на вкладку Home (Главная) на ленте и нажмите Add Material (Добавить материал).

2. В окне Add Material (Добавление материала) раскройте узел Built-In directory (Встроенная директория). Прокрутите вниз до элемента Structural steel (Конструкционная сталь), щелкните его правой кнопкой мыши и выберите Add to Component 1 (Добавить в Компонент 1).



3 Изучите свойства материала, доступные в разделе Material Contents (Содержимое материала) в окне Settings (Настройки). Свойства, помеченные зелеными флажками, используются физикой при моделировании.

Глобальные определения

Теперь задайте глобальный параметр нагрузки, приложенной к гаечному ключу.

1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Global Definitions (Глобальные определения) и выберите Parameters (Параметры) .

2 Перейдите в окно настройки параметров Settings (Настройки). В разделе Parameters (Параметры) в таблице Parameters (Параметры) или в полях под этой таблицей укажите следующие настройки:

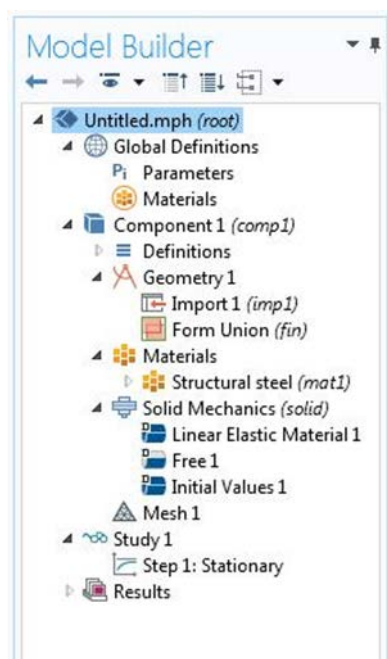
- В столбце или поле Name (Имя) введите F.
- В столбце или поле Expression (Выражение) введите 150[N]. Запись в квадратных скобках привязывает размерность физической величины к числовому значению — в данном случае ньютоны к значению силы. Столбец Value (Значение) обновится автоматически на основе введенного выражения, как только вы уберете курсор из поля или нажмете Enter.

Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150.00 N	Applied force

2

- В столбце или поле Description (Описание) введите Applied force (Приложенная сила).

Если в таблице Parameters (Параметры) несколько записей, ее можно отсортировать по любому столбцу, нажав на его заголовок. Итак, вы добавили физику и тип исследования, импортировали геометрию, добавили материал, а также задали один параметр. Теперь последовательность узлов в Построителе моделей должна выглядеть как на иллюстрации справа. Узлы, содержащие настройки по умолчанию для описания задачи в разделе Solid Mechanics (Механика твердого тела) помечены буквой D (Default) в левом верхнем углу значка узла.

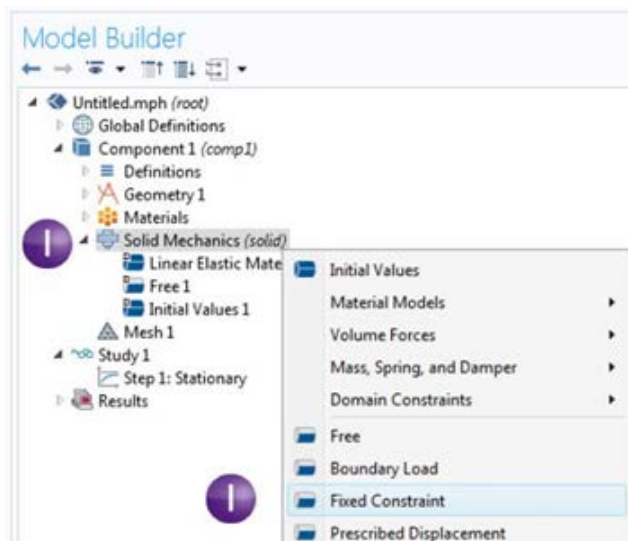


Узлами по умолчанию для механики твердого тела являются: модель Linear Elastic Material (Линейно-упругий материал), свободные граничные условия, позволяющие свободно перемещать все границы без ограничений или нагрузки, а также узел Initial Values (Начальные значения) для задания начального смещения и скорости для анализа нелинейного или переходного процесса (неприменимо в данном случае). В любой момент вы можете сохранить модель, чтобы позднее открыть ее именно в том состоянии, в котором она была сохранена. Для этого в меню File (Файл) выберите File > Save As (Файл > Сохранить как). Укажите путь к папке, где у вас есть право на запись, и сохраните в ней файл **wrench.mph**.

Физика областей и граничные условия

Теперь, когда заданы геометрия и материалы, вы можете установить граничные условия.

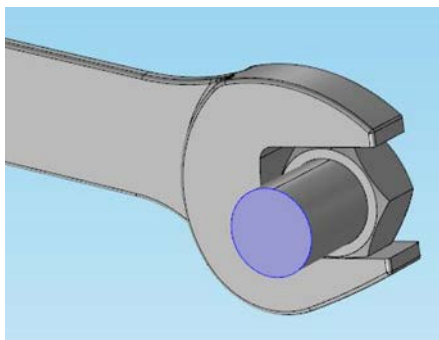
1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Solid Mechanics (solid) (Механика твердого тела (твердое)) и выберите (Фиксированное ограничение).



Граничное условие обнуляет смещение в каждой точке граничной поверхности по всем направлениям. Можно также использовать ленту и выбрать Boundaries > Fixed Constraint (Границы > Фиксированное ограничение) на вкладке Physics (Физика).

2 В Графическом окне поверните геометрию, щелкнув в любом месте окна и перетаскивая гаечный ключ, как показано на иллюстрации. Щелкните выступаю-

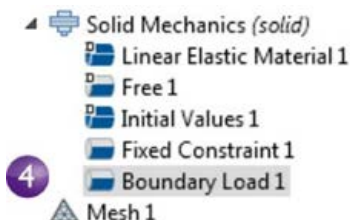
щую переднюю поверхность частичной модели болта. Выделенная граница будет отмечена синим цветом. Номер границы в списке выбора должен равняться 35.



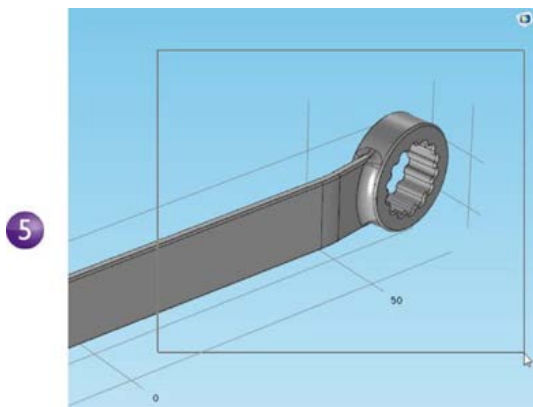
3 Нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов Graphics (Графика), чтобы вернуть геометрию в исходный вид.



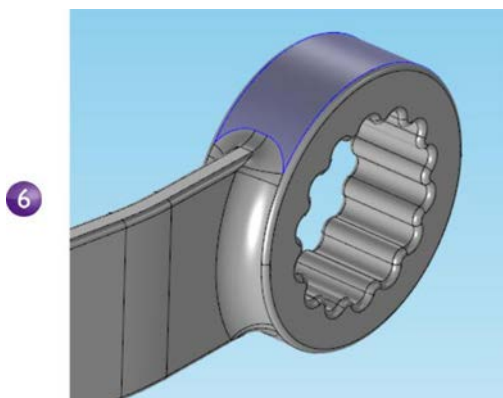
4 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Solid Mechanics (solid) (Механика твердого тела (твердое)) и выберите Boundary Load (Граничная нагрузка). Узел Boundary Load (Граничная нагрузка) (Граничная нагрузка) Построителя моделей.



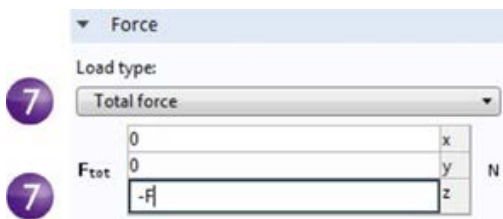
5 В Графическом окне нажмите кнопку Zoom Box (Панель масштабирования) на панели инструментов и потяните указатель мыши, чтобы выбрать квадратную область, как показано на иллюстрации справа. Отпустите кнопку мыши, чтобы приблизить эту область.



6 Выберите верхнюю грань гнезда (Boundary 111), щелкнув границу (которая при этом будет отмечена синим) и добавив ее в список Selection (Выборка).



7 В окне Settings (Настройки) раздела Boundary Load (Граничная нагрузка) в блоке Force (Сила), выберите Total force (Результирующая сила) в поле Load type (Тип нагрузки) и введите $-F$ в текстовом поле для составляющей по оси z . Знак минуса обозначает отрицательное направление по оси z (вниз). При таких настройках нагрузка в 150 Н равномерно распределится по выбранной поверхности.



Обратите внимание, что для упрощения моделирования механический контакт между болтом и гаечным ключом рассчитывается приблизительно по граничному условию для контактирующей поверхности материала. Это внутреннее граничное условие автоматически создается ПО COMSOL и обеспечивает непрерывность стандартного давления и смещения по всей контактирующей поверхности материала.

Более подробный анализ конструкций и механического контакта выполняется в модуле Structural Mechanics (Механика конструкций).

Сетка

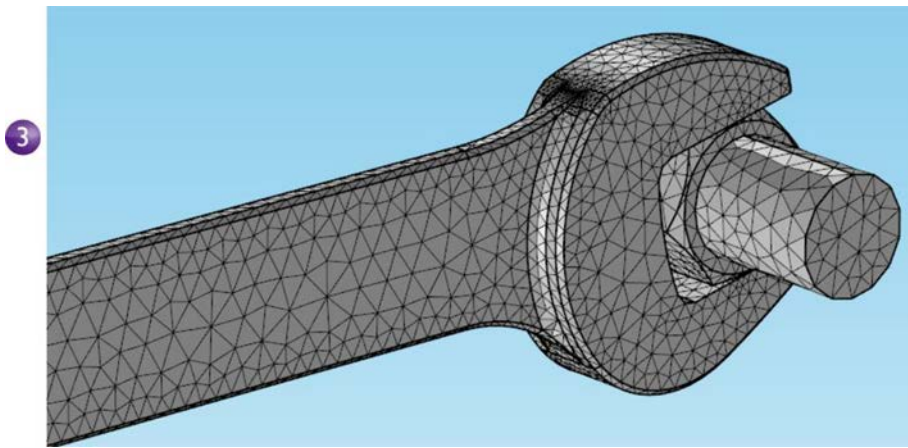
Настройки сетки задают разрешение сетки конечных элементов, которая используется для дискретизации модели. Согласно методу конечных элементов модель разбивается на малые геометрические примитивы — в данном случае на тетраэдры. Далее в каждом тетраэдре с помощью набора полиномиальных функций выполняется приблизительный расчет поля структурного смещения, которое показывает деформацию объекта по каждой из трех координатных осей. Сетка в этом примере немного мельче, чем стандартная, так как геометрия содержит малые грани и поверхности. Это позволяет эффективнее решать различные вариации поля давления и дает более точный результат. Детализация сетки для повышения точности расчетов всегда в той или иной степени замедляет работу и увеличивает потребление памяти.

1 В Построителе моделей в разделе Component 1 (Компонент 1) выберите Mesh 1 (Сетка 1) ▲. В окне настроек сетки в разделе Mesh Settings (Настройки сетки), выберите Fine (Точная) из списка Element size (Размер элементов).




2 Нажмите кнопку Build All (Построить все) ■ в окне настроек или на панели инструментов Mesh (Сетка).

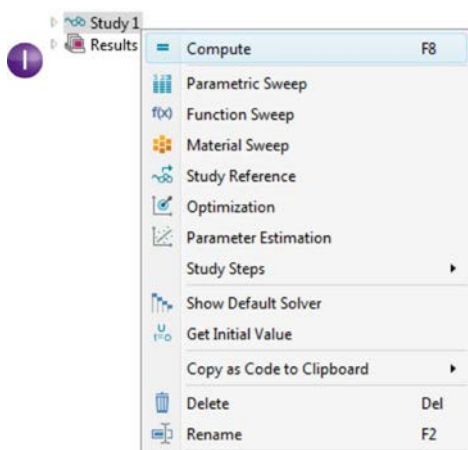
3 Через несколько секунд сетка отобразится в Графическом окне. Поверните гаечный ключ и посмотрите, как распределены размеры элементов.



Исследование

На первом этапе настройки модели вы выбрали стационарное исследование, для которого COMSOL использует стационарный решатель. В этом случае предполагается, что нагрузка, сдвиг и давление не изменяются во времени. Настройки решателя по умолчанию подходят для этой модели, если на компьютере установлено более 2 Гб оперативной памяти (RAM). Если памяти недостаточно, ниже описано, как изменить настройки решателя, чтобы он работал немного медленнее, но экономнее. Для запуска решателя:

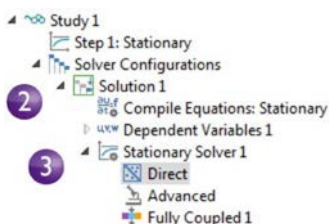
- 1 Щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1)  и выберите Compute (Вычислить) = (или нажмите F8).



Модель из этого примера можно легко решить даже на компьютере с меньшим объемом памяти, если позволить решателю записывать часть расчетных данных на жесткий диск, а не в оперативную память. Ниже описано, как это сделать. Если на компьютере установлено больше 2 Гб оперативной памяти, перейдите в конец этого раздела (после шага 5).

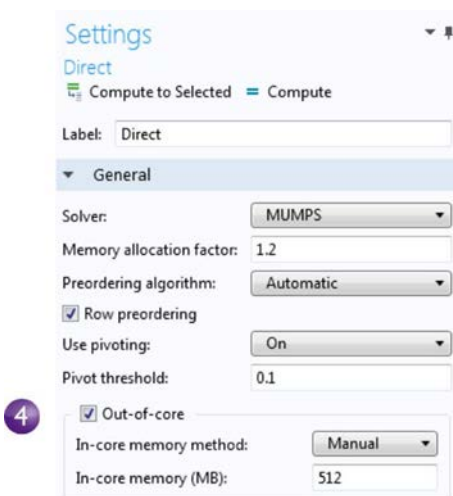
1 Если вычисления еще не начаты, настройки решателя можно изменить в узле Study (Исследование). В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) и выберите Show Default Solver (Показать решатель по умолчанию).

2 В разделе Study 1>Solver Configurations (Исследование 1 > Конфигурации решателя) раскройте узел Solution 1 (Решение 1).




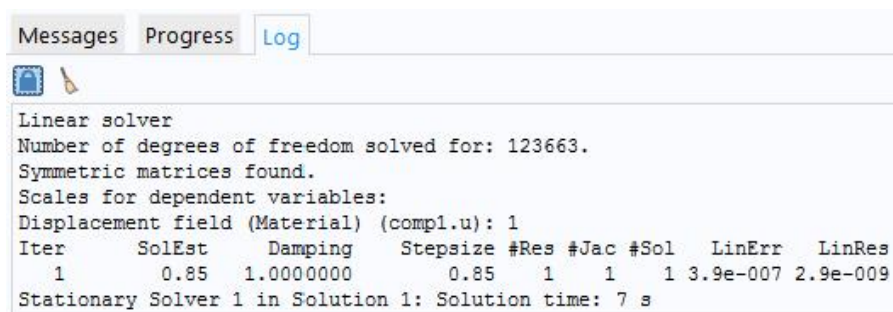
Раскройте узел Stationary Solver 1 (Стационарный решатель 1) и щелкните Direct (Прямой). Прямой решатель — это быстрый и очень надежный тип решателей, который практически не требует ручной настройки и подходит для широкого круга физических задач. Однако его недостатком является то, что он потребляет много оперативной памяти.

4 В окне Settings (Настройки) прямого решателя в разделе General (Общие) установите флажок в поле Out-of-core (Использовать внешнее запоминающее устройство). В поле In-core memory method (Управление расходом оперативной памяти) выберите Manual (Вручную). В поле In-core memory (MB) (Размер оперативной памяти, Мб) оставьте значение по умолчанию — 512 Мб.



Эта настройка гарантирует, что если во время вычислений закончится оперативная память, решатель выгрузит часть данных на жесткий диск. Однако использование жесткого диска вместо одной лишь оперативной памяти несколько замедлит работу решателя.



5 Щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1)  и выберите Compute (Вычислить) = (или нажмите F8). Через несколько секунд вычислений в Графическом окне отобразится график по умолчанию. Дополнительная информация о вычислениях находится в окнах Messages (Сообщения) и Log (Журнал); перейдите на вкладки Messages (Сообщения) и Log (Журнал) в окне Graphics (Графическом окне), чтобы просмотреть ее. Окно Messages (Сообщения) можно также открыть из выпадающего списка Windows (Окна) на вкладке ленты Home (Главная).

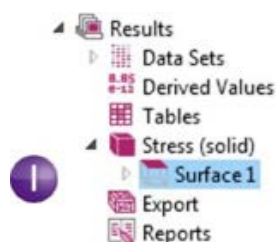


```
Messages Progress Log
Linear solver
Number of degrees of freedom solved for: 123663.
Symmetric matrices found.
Scales for dependent variables:
Displacement field (Material) (compl.u): 1
Iter      SolEst      Damping      Stepsize #Res #Jac #Sol  LinErr  LinRes
1         0.85      1.0000000    0.85     1    1    1  3.9e-007  2.9e-009
Stationary Solver 1 in Solution 1: Solution time: 7 s
```

Отображение результатов

Напряжение по Мизесу отображается в Графическом окне в виде графика скалярного поля (Surface plot) по умолчанию, а для визуализации смещения используется подзел Deformation (Деформация). Измените единицу измерения по умолчанию (Н/м²) на более удобные МПа, как описано ниже.

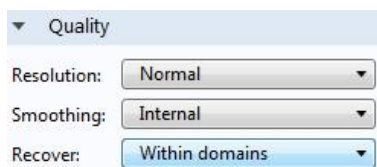
1. В Построителе моделей раскройте узел Results>Stress (solid)  (Результаты > Напряжение (твердое тело)) и щелкните Surface 1 (Поверхность 1) .



2. В окне Settings (Настройки) раздела Expression (Выражение) в списке Unit (Единица измерения) выберите МПа (МПа) (или введите **МПа** в этом поле).



Чтобы более точно проанализировать давление, раскройте раздел Quality (Качество). В списке Recover (Восстановление) выберите Within domains (Внутри областей). Эта настройка восстановит информацию об уровне давления на основе множества элементов, а не из каждого элемента в отдельности. По умолчанию она отключена, так как замедляет визуализацию. При включенном параметре Within domain (Внутри области) каждая область анализируется отдельно, а восстановление давления не затрагивает контактные поверхности материала.





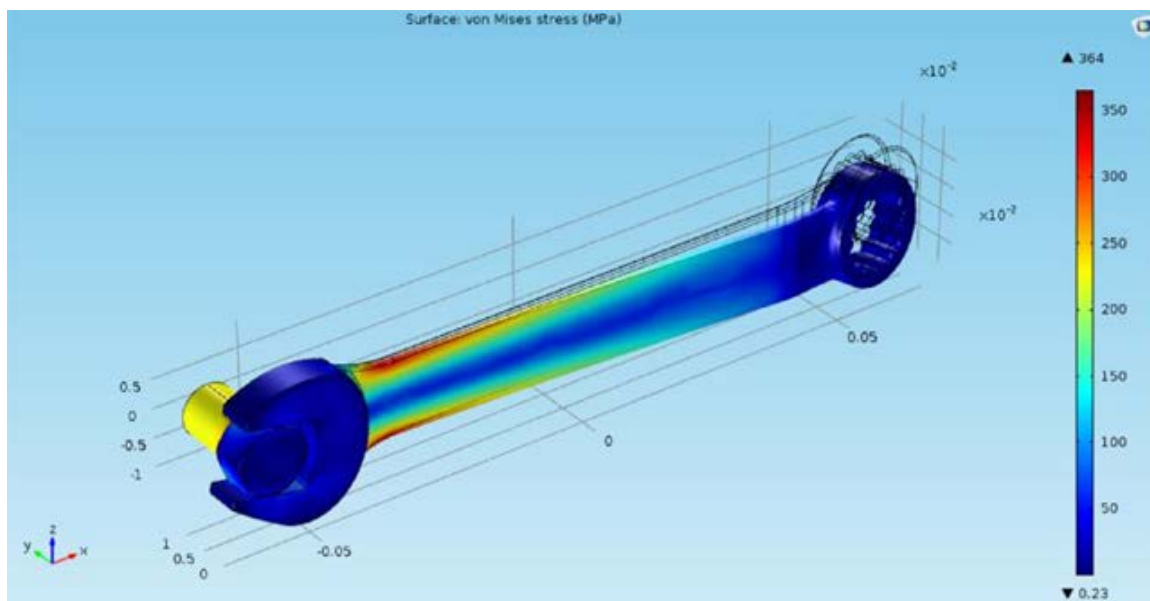




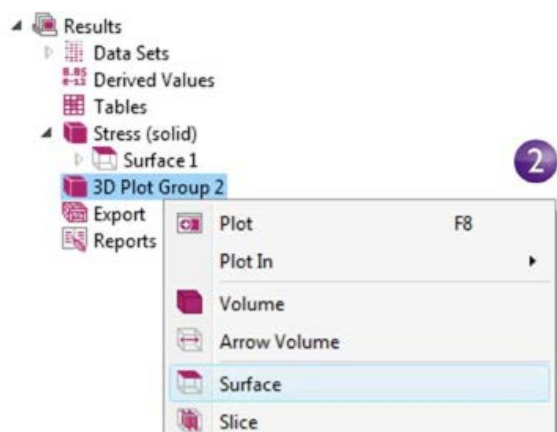
3 Нажмите кнопку Plot (Построить график)  на панели инструментов окна Settings (Настройки), чтобы построить график поверхности, а затем нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию)  на панели инструментов Графического окна.

График перестроен с новой единицей измерения и настройкой восстановления Within domains (Внутри областей). Показано распределение напряжения по Мизесу в болте и гаечном ключе при вертикально приложенной нагрузке.

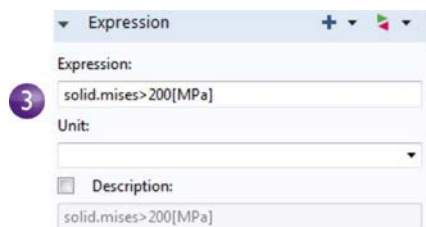


Стандартная сталь, из которой делаются такие инструменты, как гаечный ключ, имеет предельное напряжение текучести около 600 МПа, поэтому наша нагрузка в 150 Н лежит довольно близко к пластической деформации (которая происходит при нагрузке примерно 15,4 кгс). Допустим, нужно определить предельно допустимый уровень с трехкратным запасом прочности. Чтобы быстро оценить, какие элементы гаечного ключа подвержены пластической деформации, постройте график по неравенству, например **solid.mises>200[MPa]**.

1. Щелкните правой кнопкой мыши узел Results (Результаты) и  добавьте 3D Plot Group (Группа 3D-графиков) .
2. Щелкните правой кнопкой мыши узел 3D Plot Group 2 (Группа 3D-графиков 2)  и выберите Surface (Поверхность) .




3. В окне Settings (Настройки) раздела Surface (Поверхность), нажмите кнопку Replace Expression (Замена выражения) и двойным щелчком выберите Model>Component1>Solid Mechanics>Stress>solid.mises-von Mises stress (Модель > Компонент1>Механика твердого тела > Напряжение > solid.mises-напряжение по Мизесу).



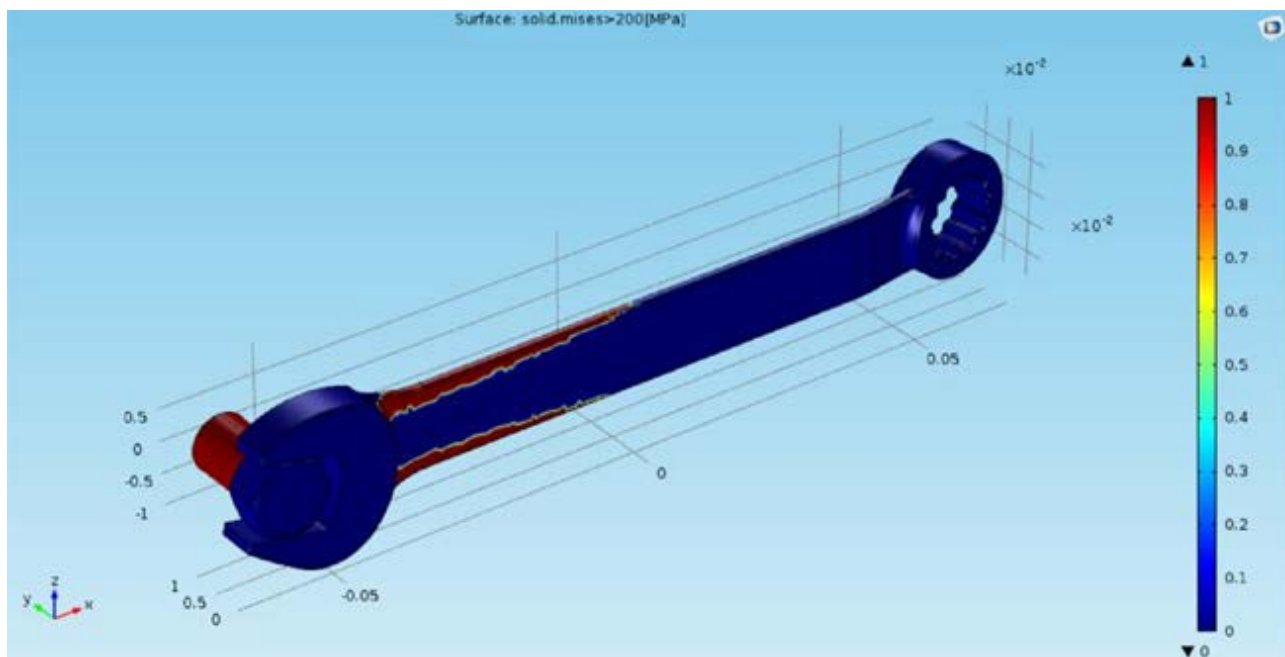
Если имя переменной заранее известно, можно напрямую ввести **solid.mises** в поле Expression (Выражение). Теперь измените это выражение на: **solid.mises>200[MPa]**.

Это логическое выражение, которое может принимать значения 1 (истина) или 0 (ложь). В тех областях, где его значение равно 1, безопасный уровень превышен. Здесь также используется функция Recover (Восстановление), которая описана выше.

4. Нажмите кнопку Plot (Построить график) .

5. В Построителе моделей щелкните 3D Plot Group 2 (Группа 3D-графиков 2). Нажмите клавишу F2 и в диалоговом окне Rename 3D Plot Group (Переименование группы 3D-графиков) введите Safety Margin (Безопасный уровень). Нажмите ОК.

Как видно из графика, напряжение в болте достаточно велико, но нас больше интересует гаечный ключ. Чтобы гаечный ключ гарантированно выдерживал нагрузку 150 Н с трехкратным запасом прочности, нужно изменить конструкцию его ручки — например, сделать ее шире.



Можно заметить, что производитель гаечного ключа по ряду причин выбрал для него асимметричную конструкцию. Из-за этого при повороте гаечного ключа поле давления может изменяться. Теперь попробуйте самостоятельно приложить такую же силу в другом направлении, визуализируйте максимальное напряжение по Мизесу и проверьте, изменится ли что-нибудь.

Задание для практической работы

Задание для студентов заключается в расчете напряжений для гаечного ключа из различных марок сталей. Выбор задания осуществляется в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

№ задания	Марка материала
1	Сталь 55ГС
2	Сталь Р18
3	Сталь Р9
4	Сплав Б83
5	Сталь 5Х3В3МФС
6	Сталь В2Ф
7	Сталь 4Х5МФС
8	Сталь В2Ф
9	Сталь 6ХС
10	Сталь 9Х18
11	Сталь Г13
12	Сталь ШХ15СГ
13	Сталь 65ГА
14	Сталь 15Х25Т
15	Сталь 12Х18Н10Т
16	Сталь 11Х11Н2ВМФ
17	Сталь 45Х14Н14В2М
18	Сталь 60СГ
19	Сталь Р18Ф2
20	Сталь 20Г
21	Сталь 40Х
22	Сталь ХВ5
23	Сталь 40Х
24	Сталь 10Х14Г14Н4Т
25	Сталь 08Х21Н16М2Т

2.6. Моделирование механических свойств керамических и стеклянных изделий в COMSOL Multiphysics.

Задание заключается в применении теории конструкционных материалов к решению практических задач проектирования керамических и стеклянных материалов в COMSOL Multiphysics.

Содержание: На пластину из заданного материала действует сжимающая сила $N = \text{_____}$ Н. Деталь имеет длину $L = \text{_____}$ мм, ширину $a = \text{_____}$ мм, толщину $b = \text{_____}$ мм, масса детали $M = \text{_____}$ г., рабочая температура детали $t = \text{_____}$ град. С. (табл. 2). Определить напряжение сжатия в детали.

Таблица 2

Варианты заданий

№ задания	L, мм	a, мм	b, мм	M, г	N, Н	Материал
1	150	50	50	500	6000	стекло листовое м1
2	100	95	60	450	5500	стекло листовое м2
3	150	90	70	400	5000	стекло листовое м3
4	100	85	35	350	6500	стекло листовое м4
5	100	50	45	450	6000	стекло листовое м5
6	100	90	56	400	5500	стекло листовое м6
7	150	80	25	350	5000	керамика ЦМ-332
8	150	50	50	500	6000	керамика ВОК-60
9	100	90	60	400	5500	керамика ОНТ-20
10	150	95	70	350	5000	керамика ВК10
11	100	85	35	300	6500	керамика Т30К4
12	250	50	45	450	6000	керамика 25А
13	250	90	56	400	5500	400

14	200	80	70	350	5000	стекло А 2
15	250	90	35	450	6500	стекло листовое м5
16	250	50	45	500	6000	стекло листовое м6
17	200	95	56	450	5500	керамика ЦМ-332
18	250	90	50	400	5000	керамика ВОК-60
19	200	85	60	350	6500	стекло листовое м2
20	200	50	70	450	6000	стекло А 2
21	250	80	35	400	5500	стекло СЗМ-Б2 ЕIW 30
22	200	85	50	350	5000	стекло СЗМ-Бр2

2.7. Моделирование механических свойств изделий полимерных и композиционных материалов в COMSOL Multiphysics.

Задание заключается в применении теории конструкционных материалов к решению практических задач проектирования композиционных материалов с короткими волокнами в COMSOL Multiphysics.

Содержание: На цилиндрическую деталь летательного аппарата действует растягивающая сила $N = \underline{\hspace{2cm}}$ Н. Деталь имеет длину $L = \underline{\hspace{2cm}}$ мм, площадь поперечного сечения $S = \underline{\hspace{2cm}}$ кв. мм., масса детали $M = \underline{\hspace{2cm}}$ г., рабочая температура детали $t = \underline{\hspace{2cm}}$ град. С. (табл. 3). Выбрать материал, который выдержит приложенные напряжения в детали.

Таблица 3

Варианты заданий

№ задания	L, мм	S, кв.мм.	M, г	N, Н	t (раб), град.С
1	950	100	500	60000	20
2	900	95	450	55000	20

3	850	90	400	50000	20
4	800	85	350	65000	20
5	800	100	450	60000	20
6	800	90	400	55000	20
7	850	80	350	50000	20
8	950	100	500	60000	400
9	900	90	400	55000	400
10	850	95	350	50000	400
11	900	85	300	65000	400
12	950	100	450	60000	400
13	850	90	400	55000	400
14	900	80	350	50000	400
15	950	90	450	65000	400
16	950	100	500	60000	550
17	900	95	450	55000	550
18	850	90	400	50000	550
19	800	85	350	65000	550
20	800	100	450	60000	550
21	850	80	400	55000	550
22	900	85	350	50000	550

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

При организации самостоятельной работы следует взять за правило:

- учиться ежедневно, начиная с первого дня семестра, пропущенные дни будут потеряны безвозвратно;
- чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься по 3–5 часов ежедневно;
- начиная работу, надо выбрать что-нибудь среднее по трудности, затем перейти к более трудной работе, и напоследок оставить легкую часть, требующую не столько больших интеллектуальных усилий, сколько определенных моторных действий.

Виды заданий для внеаудиторной самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференциальный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки по всем типам занятий является работа с литературой. Умение работать с литературой озна-

чает научиться осмысленно пользоваться учебно-методическим и другим информационным обеспечением дисциплины.

Для изучения дисциплины вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную и приводится в п. 10 рабочей программы дисциплины.

К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия).

Поскольку в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражения новые документы, события, явления, научные открытия последних лет, то рекомендуется для более углубленного изучения программного материала дополнительная литература.

Прежде чем приступить к чтению, необходимо запомнить или записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания, название интересующих глав.

Содержание (оглавление) дает представление о системе изложения ключевых положений всей публикации и помогает найти нужные сведения.

Предисловие или введение книги поможет установить, на кого рассчитана данная публикация, какие задачи ставил перед собой автор, содержится краткая информация о содержании глав работы. Иногда полезно после этого посмотреть послесловие или заключение. Это помогает составить представление о степени достоверности или научности данной книги.

Изучение научной учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей. Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. При изучении литературы особое внимание следует обращать на новые термины и понятия. Записи позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

Процесс изучения дисциплины предполагает также активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности.

Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения.

Однако при использовании интернет-ресурсов следует учитывать следующие рекомендации:

- необходимо критически относиться к информации;
- следует научиться обрабатывать большие объемы информации, представленные в источниках, уметь видеть сильные и слабые стороны, выделять из представленного материала наиболее существенную часть;
- необходимо избегать плагиата, поэтому, если текст источника остается без изменения, необходимо сделать ссылки на автора работы.

3.3 Подготовка к практическим работам

Подготовка к практическим работам осуществляется студентом во внеаудиторное время в часы, отведенные на самостоятельную работу. Подготовка требует немалого времени, поэтому целесообразно планировать ее заранее за несколько дней до занятия и целесообразно проводить в следующей последовательности.

1. Внимательно ознакомьтесь с описанием соответствующей практической работе руководствуясь методическими указаниями к выполнению практическими работами, уясните цель и задачи.

2. Используя конспект лекций и рекомендованную в описании практической работы учебную литературу, изучите теоретические вопросы, относящиеся к лабораторному эксперименту. Выясните теоретические положения, знание которых необходимо для выполнения работы и понимания полученных результатов.

3. Изучите принципиальную методику, приведенную в описании работы. Ознакомьтесь с применяемыми подходами и логикой расчетов.

4. Ознакомьтесь с порядком выполнения работы, усвойте методику измерения физических величин в лабораторном эксперименте, последовательность операций и форму представления полученных результатов.

5. В индивидуальном лабораторном журнале подготовьте «заготовку отчета», который должен быть отражением работы по систематизации приобретенных знаний, опорным планом для проведения эксперимента.

«Заготовку отчета» рекомендуется выполнять по следующей схеме:

- номер, название и цель работы;
- оборудование, приборы и материалы, применяемые в процессе измерений;
- краткий конспект теоретических положений по теме исследования – анализ физических основ метода и описание методики эксперимента, который включает:
 - физическое явление, изучаемое в работе, связь между величинами, его описывающими;
 - объект исследования, его особенности;
 - физическое явление, положенное в основу метода измерений;
 - зависимость, которая может быть экспериментально проверена;
 - условия, позволяющие осуществить такую проверку;
 - и поясняющие теоретический материал рисунки;
- принципиальная схема установки;
- описание метода измерения;
- заготовки таблиц, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в методическом указании к работе).

6. Проверьте степень подготовленности к лабораторному занятию по контрольным вопросам, приводимым в описании работы.

Окончательное оформление работы, обработка результатов эксперимента и подготовка к защите по контрольным вопросам проводится студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу.

К следующему (после выполнения очередной лабораторной работы) каждый студент должен представить окончательный отчет о выполненной лабораторной работе, в который входит «заготовка отчета» дополненная следующими пунктами:

- результаты измерений и вычислений в виде таблиц (или ином виде, согласно методическим рекомендациям к данной лабораторной работе);

- расчетные формулы, по которым производились вычисления с примером вычисления по каждой формуле, что позволяет при необходимости быстро проверить правильность расчета;
- систематизированные результаты эксперимента – схемы, графики, диаграммы и т.п., в соответствии с заданием на лабораторную работу и требованиям, предъявляемым к их оформлению;
- оценка надежности и достоверности результатов (примеры вычислений величин, измеряемых косвенно, и погрешностей для прямых и косвенных измерений);
- основные выводы по результатам работы, вытекающие из экспериментальных данных или на основании сравнения полученных результатов с теоретическими данными, если это возможно с объяснением расхождения.

3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем

Для подготовки конспекта рекомендуется использовать основную и дополнительную литературу.

При написании конспекта придерживайтесь следующих рекомендаций.

1. Прежде чем приступить к чтению, необходимо записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания.
2. Внимательно прочитайте текст.
3. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
4. Выделите главное, составьте план.
5. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.
6. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана.

При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты, учитывайте лаконичность, значимость мысли. В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения.

3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю

Подготовка к тестированию. В современном образовательном процессе тестирование как новая форма оценки знаний занимает важное место.

Цель тестирований в ходе учебного процесса студентов состоит не только в систематическом контроле знаний, но и способствует повышению эффективности обучения учащихся, позволяет выявить уровень усвоения теоретического материала, выявить уровень практических умений и аналитических способностей студентов. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса.

При подготовке к тесту следует, прежде всего, просмотреть конспект лекций и практических занятий и отметить в них имеющиеся темы и практические задания, относящиеся к тематике теста. Особо следует уделить внимание содержанию тем заданных на самостоятельное изучение, так как часть вопросов в тестах может относиться именно к этим темам. Если какие – то лекционные вопросы и практические задания на определенные темы не были разобраны на занятиях (или решения которых оказались не понятными), следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем. Полезно самостоятельно решить несколько типичных заданий по соответствующему разделу.

При подготовке к тесту не следует просто заучивать, необходимо понять логику изложенного материала. Этому немало способствует составление развернутого плана, таблиц, схем. Как и любая другая форма подготовки к контролю знаний, тестирование имеет ряд особенностей, знание которых помогает успешно выполнить тест.

Можно дать следующие методические рекомендации:

- прежде всего, следует внимательно изучить структуру теста, оценить объем времени, выделяемого на данный тест, увидеть, какого типа задания в нем содержатся, что поможет настроиться на работу;
- лучше начинать отвечать на те вопросы, в правильности решения которых нет сомнений, пока не останавливаясь на тех, которые могут вызвать долгие раздумья, что позволит успокоиться и сосредоточиться на выполнении более трудных вопросов;

- очень важно всегда внимательно читать задания до конца, не пытаюсь понять условия «по первым словам» или выполнив подобные задания в предыдущих тестированиях, так как такая спешка нередко приводит к досадным ошибкам в самых легких вопросах;
- если Вы не знаете ответа на вопрос или не уверены в правильности, следует пропустить его и отметить, чтобы потом к нему вернуться;
- думайте только о текущем задании, необходимо концентрироваться на данном вопросе и находить решения, подходящие именно к нему;
- многие задания можно быстрее решить, если не искать сразу правильный вариант ответа, а последовательно исключать те, которые явно не подходят, что позволяет в итоге сконцентрировать внимание на одном-двух вероятных вариантах;
- рассчитывать выполнение заданий нужно всегда так, чтобы осталось время на проверку и доработку (примерно 1/3-1/4 запланированного времени), что позволит свести к минимуму вероятность описок и сэкономить время, чтобы набрать максимум баллов на легких заданиях и сосредоточиться на решении более трудных, которые вначале пришлось пропустить;
- процесс угадывания правильных ответов желательно свести к минимуму, так как это чревато тем, что Вы забудете о главном: умении использовать имеющиеся накопленные в учебном процессе знания, и будете надеяться на удачу.

Подготовка к промежуточной аттестации. Формой промежуточной аттестации (контроля) является экзамен. Экзамен может проводиться в виде письменного опроса с последующим собеседованием или с применением тестирования.

Экзамен – форма проверки полученных теоретических и практических знаний, их прочность, развитие творческого мышления, приобретение навыков самостоятельной работы, умения синтезировать полученные знания.

Основная цель подготовки к экзамену – достичь понимания законов и явлений, а не только механически заучить материал.

Подготовка к устной сдаче экзамена включает в себя несколько основных этапов:

- просмотр программы учебного курса;

– определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т.д.) и их изучение;

– использование конспектов лекций;

– консультирование у преподавателя.

Для успешной сдачи экзамена рекомендуется соблюдать несколько правил.

1. Подготовка к экзамену начинается с первого занятия по дисциплине, на котором студенты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и промежуточной аттестации. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал, руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к экзамену, конспектировать важные для решения учебных задач источники.

2. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до экзамена. В течение этого времени нужно успеть повторить и систематизировать изученный материал.

3. За несколько дней перед экзаменом распределите вопросы равномерно на все дни подготовки, возможно, выделив последний день на краткий повтор всего курса.

4. Каждый вопрос следует проработать по конспекту лекций, по учебнику или учебному пособию.

5. После повтора каждого вопроса нужно, закрыв конспект и учебники, самостоятельно воспроизвести иллюстративный материал с последующей самопроверкой.

6. Все трудные и не полностью понятые вопросы следует выписывать на отдельный лист бумаги, с последующим уточнением ответов на них у преподавателя на консультации.

7. При ответе на вопросы билета студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение применить при анализе качественных и количественных задач. Изложение материала должно быть четким, кратким и аргументированным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.М. Емышева [и др.].– Москва: Изд-во РГТУ, 2013.– 125 с. – Режим доступа:

<https://www.rsuh.ru/upload/iblock/c70/c70c10002f5932ab48798aae10f5a351.do>

2 Лызь, Н.А. Тенденции развития высшего образования [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Н.А Лызь, А.Е. Лызь. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 48 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/2332317/>

3 Глаголев С.Н. Проблемы инженерного образования в области техники и технологий [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.Н. Глаголев, Т.А. Дуюн, Н.С. Севрюгина. – Электрон. текстовые данные.– Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013. – 109 с. – 978-5-361-00098-2. – Режим доступа:

<http://www.iprbookshop.ru/28387.html>

4 Солнцев Ю.П. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебник для вузов/ Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: ХИМИЗДАТ, 2014.— 784 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22533>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю

5 Дрозд М.И. Основы материаловедения [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Дрозд М.И.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Вышэйшая школа, 2011.— 431 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20107>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю

7 Арзамасов В.Б., Волчков А.И., Головин В.А. и др. Материаловедение и технология конструкционных материалов. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2007. – 528 с.

8 Материаловедение. Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1980.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткий конспект лекций	4
1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции	4
1.2 Краткое содержание курса лекций	6
2 Методические рекомендации к практическим работам	163
2.1 Подготовка к выполнению практической работы	163
2.2 Выполнение практической работы	163
2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы	164
2.4 Наименование предлагаемых к выполнению практических работ и методические указания к ним	164
2.5. Изучения основных элементов работы в COMSOL Multiphysics	164
2.6. Моделирование механических свойств керамических и стеклянных изделий в COMSOL Multiphysics	201
2.7. Моделирование механических свойств изделий полимерных и композиционных материалов в COMSOL Multiphysics	202
3 Методические рекомендации к самостоятельной работе	204
3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	204
3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	204
3.3 Подготовка к практическим работам	206
3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	208
3.4 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	208
Библиографический список	213

Нещименко Виталий Владимирович,
доцент кафедры Физики АмГУ, доктор физ.-мат. наук

Соловьев Владислав Викторович,
доцент кафедры СиТРК АмГУ, канд. тех. наук