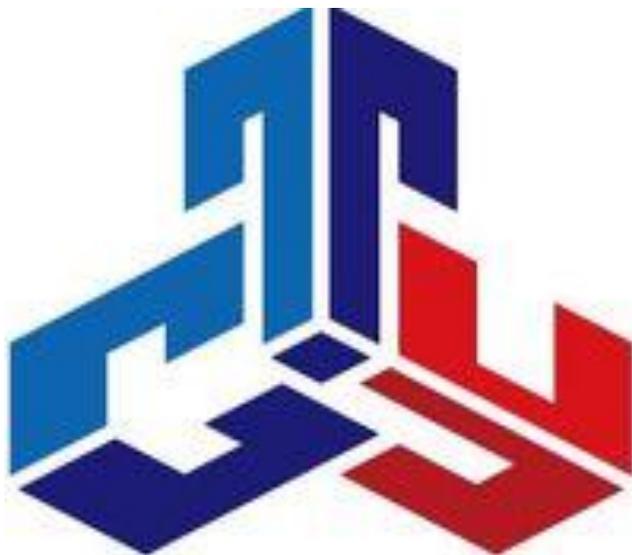


СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



АРХИТЕКТУРНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Рязань, 2018 г.

УДК 620
ББК 65.04
А87

Архитектурное материаловедение: учебное пособие/ сост. Никулин А.В., Ширяев А.Г.,
–
Совр. техн. универ-т. – Рязань, 2018. – 78 с. – 50 экз.

Рецензент: к.х.н., доц., нач. ПТО ООО «Экотранс» Никандров Г.А.

В учебном пособии изложены все темы программы дисциплины «Архитектурное материаловедение». Изложен теоретический материал, который сопровождается необходимыми рисунками. Для самоконтроля качества освоения дисциплины студентам предложены тесты по каждой теме.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по техническим

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета.*

УДК 620
ББК 65.04
А87

© А.В. Никулин, А.Г. Ширяев
© Современный технический университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	
2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ	
2.1. Диаграмма растяжения	
2.2. Твердость	
2.3. Теоретическая и реальная прочностии кристалла	
Контрольные вопросы	
III. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ	
3.1. Процессы, происходящие при нагреве деформированного металла.....	
3.2.1. Рекристаллизация	
3.2. Холодная и горячая деформации	
3.3. Термическая обработка металлов	
3.4. Химико-термическая обработка металлов	
3.3.1. Цементация	
3.3.2. Азотирование	
3.3.3. Нитроцементация.....	
3.3.4. Цианирование	
3.3.5. Борирование	
3.3.6. Силицирование	
3.3.7. Диффузионная металлизация.....	
3.5. Поверхностная пластическая деформация.....	
Контрольные вопросы	
4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	
4.1. Общие требования, предъявляемые к конструкционным материалам	
4.1.1.Критерии оценки конструкционной прочностии материалов	
4.2. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ.....	
4.2.1. СТАЛИ	
Контрольные вопросы	
4.3. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ.....	
4.3.1. Медные сплавы.....	
4.3.2. Алюминиевые сплавы.....	
4.3.3. Магний и его сплавы.....	
4.3.4. Титан и его сплавы.....	
Контрольные вопросы	
4.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
4.4.1. Химический состав.....	
4.4.2. Строение полимеров	
4.4.3. Свойства полимеров.....	

4.4.4. Полимеры с наполнителями.....	
4.4.5. Эффективность применения полимеров.....	
Контрольные вопросы	
4.5. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	
4.5.1. Графит.....	
4.5.2. Стекло.....	
4.5.3. Ситаллы	
4.5.4. Керамика.....	
Контрольные вопросы	
4.6. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	
4.6.1. Дисперсноупрочнённые композиционные материалы.....	
4.6.2. Волокнистые композиционные материалы	
Контрольные вопросы	
<i>Список литературы</i>	

ВВЕДЕНИЕ

Умение находить и использовать материалы является важнейшим условием развития человечества. Поэтому неслучайно разные периоды его развития носят названия по тому материалу, который освоил человек. Первоначально это были природные материалы: дерево и камень, из которых изготавливали орудия труда и оружие: палки, топоры, стрелы и пр. Этот период получил название «каменный век». Его сменил «бронзовый век», когда люди научились выплавлять медь. Затем пришёл «железный век», когда повсеместно распространилось железо. Двадцатый век часто по праву называют «веком стали».

За многовековую историю своего развития человек научился создавать и использовать огромное количество различных материалов и веществ. Их к настоящему времени уже известно более 20 миллионов. Каждый материал обладает своими уникальными свойствами: тепловыми, механическими, электрическими, магнитными и др. Часто возможность создания того или иного технического устройства – самолета, подводной лодки, компьютера и др. – определяется свойствами имеющихся в распоряжении конструкторов материалов. Поэтому потребности науки, техники, производства в новых материалах всё более возрастают. Ориентироваться во всём этом многообразии невозможно без знания закономерностей формирования свойств материалов, их зависимости от химического состава, структуры, термической обработки и т.д. Изучение и выявление таких закономерностей является задачей обширной науки – материаловедения.

Данное учебное пособие является изложением курса материаловедения, предназначенного для студентов специальностей химическая технология, энергетика, автосервис.

Во второй главе уделено внимание механическим свойствам материалов и способам их измерения. В третьей главе – процессам, происходящим при нагреве металлов, их термической и химико-термической обработке.

Четвёртая глава посвящена различным конструкционным материалам: металлическим, неметаллическим, органическим, неорганическим, композиционным.

Для закрепления усвоения материала в конце тематических разделов приведены контрольные вопросы.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

2.1. Диаграмма растяжения

Для применения материалов наиболее важными являются их механические свойства.

К механическим свойствам относятся твердость, прочность, пластичность, упругость и др.

Познакомимся с ними подробнее.

Рассмотрим образец, имеющий первоначальную длину l_0 (рис.1.).

Приложим к нему некоторую растягивающую силу F . Под действием

силы материал удлинился до длины l

. Разность длин

$$\Delta l = l - l_0, \quad (2.1)$$

называют абсолютным

удлинением образца, а отношение

$$\Delta l / l_0 = \delta l = \varepsilon, \quad (2.2)$$

относительным удлинением δl или деформацией образца ε .

Если обозначить сечение образца за S , то механическое напряжение σ будет определяться отношением

$$\sigma = F/S, \quad (2.3)$$

При малых растяжениях между деформацией ε и напряжением σ существует линейная зависимость:

$$\varepsilon = k \sigma, \quad (2.4)$$

где k – коэффициент податливости,

или

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (2.5)$$

где E – модуль упругости или модуль Юнга.

Такая линейная зависимость называется законом Гука. Но он выполняется не всегда, а в определенных пределах деформации и напряжения. При больших деформациях зависимость имеет сложный вид.

Если построить график зависимости растягивающей силы от удлинения образца, то получится диаграмма растяжения. На рис.2. приведен характерный вид такой диаграммы. На графике можно выделить несколько характерных участков или зон.

Участок OA – **зона упругости**. Здесь зависимость линейна в соответствии с законом Гука. График круто возрастает.

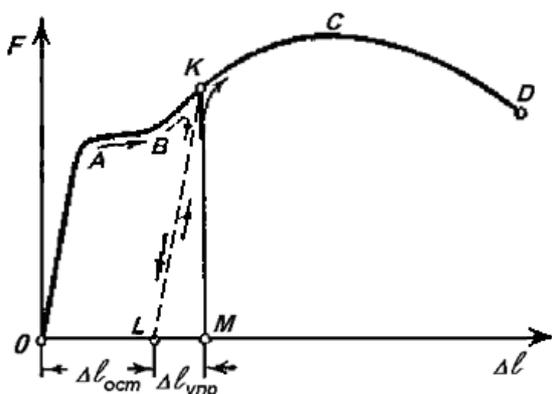


Рис.2. Диаграмма растяжения образца.

Участок AB – **зона текучести**, где происходит удлинение образца почти без возрастания приложенной силы. График почти горизонтален.

Участок BC – **зона упрочнения**, здесь удлинение образца сопровождается

значительным возрастанием растягивающей силы.

Участок CD – **зона разупрочнения**, необходимая для дальнейшего растяжения сила уменьшается. Здесь при растяжении образца в каком-то месте образуются сужения или шейки, которая становится все тоньше. Это происходит до тех пор, пока образец не оборвется. Точка D соответствует разрушению образца.

Если испытуемый образец, не доводя до разрушения, разгрузить, то на диаграмме это изобразится линией KL . Её наклон соответствует

наклону упругого участка OA . Величина OL на диаграмме называется остаточным удлинением, а соответствующая ей деформация – остаточной или пластической деформацией. При повторном нагружении растягивающая сила увеличивается по линии LK и далее по кривой KCD , как будто промежуточной разгрузки не было.

Диаграмма растяжения зависит от размеров образца. Чтобы получить количественную оценку свойств материала, перестроим диаграмму растяжения в координатах напряжение σ – деформация ε . Эта диаграмма имеет тот же вид, что и диаграмма растяжения, но будет характеризовать уже не свойства образца, а свойства материала.

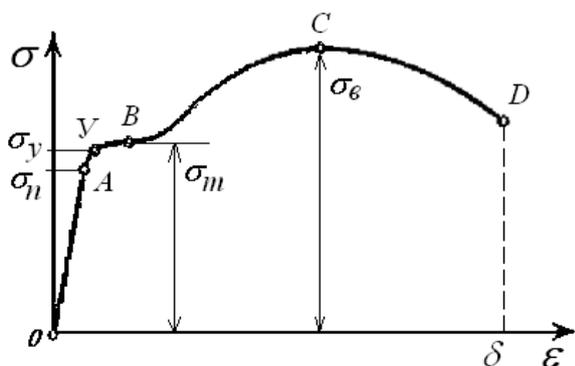


Рис.3. Диаграмма напряжение-деформация.

Характерные точки на диаграмме количественно определяют свойства материала:

Наибольшее напряжение (точка A), до которого материал следует линейному закону Гука, называют **пределом пропорциональности σ_n** .

Пределом упругости σ_y называют наибольшее напряжение (точка Y), до которого материал не получает остаточной деформации. На данном участке, если силу растяжения убрать, то образец вернется в первоначальную форму. Если же приложить большую силу, то появится остаточное удлинение образца.

- следующий участок текучести (точка B) определяет **предел текучести σ_m**

- максимально достигаемое значение напряжения (точка C) характеризует **предел прочности** или **временной предел σ_e** .

- крайняя точка на диаграмме D соответствует максимальной деформации, при которой материал разрушается. Эта величина называется **пластичностью** \square .

Эти параметры характеризуют только материал и не зависят от его формы и размеров образца.

Предел текучести наблюдается не у всех материалов. Поэтому существует **условный предел текучести $\sigma_{0,2}$** . Это величина напряжения, при котором величина остаточной деформации образца равна 0,2%.

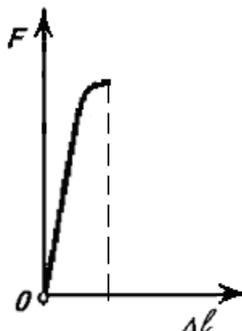


Рис.4. Диаграмма растяжения хрупкого образца.

По виду диаграммы напряжение-деформация различают хрупкие и пластичные материалы. Рассмотренная выше диаграмма характерна для пластичных металлов и сплавов.

Для хрупких материалов диаграмма выглядит иначе (рис.4.). У таких материалов отсутствует участок пластической деформации.

При достижении предела упругости материал сразу разрушается, без заметной пластической деформации. Хрупкими являются, например, стекло, керамика, бетон, высокоуглеродистые стали. В металлах может наблюдаться и пластичное, и хрупкое поведение. Например, упругая пластичная сталь при очень низких температуры становится хрупкой.

Можно снять диаграмму при сжатия образца.

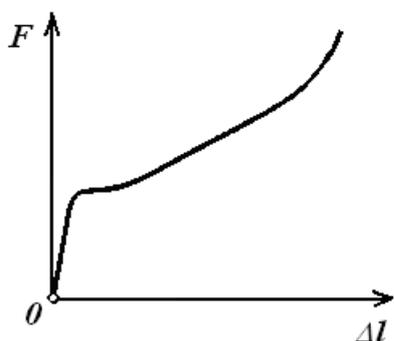


Рис.5. Диаграмма сжатия образца.

Для пластичных материалов начальные участки диаграммы сжатия выглядят почти так же как при растяжении, но отсутствует участок разупрочнения и разрушение (рис.5). С началом пластической деформации сечение образца увеличивается, материал упрочняется и сила сжатия растет до максимальных возможностей

испытательной машины, без разрушения образца.

У хрупких материалов при сжатии наблюдается разрушение, с образованием трещин по наклонным и продольным плоскостям. Но предел прочности на сжатие, как правило, намного больше, чем при растяжении.

2.2. Твердость

Твердость – способность материала сопротивляться воздействию на его

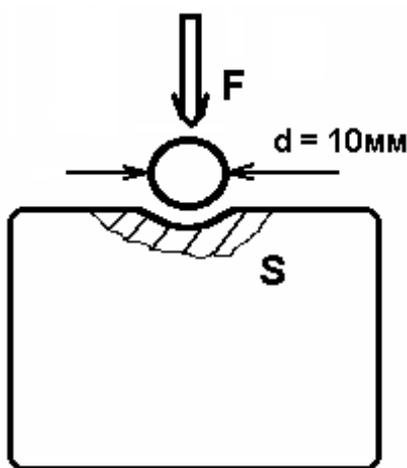


Рис.6. Проба твердости по Бринеллю.

поверхность. Рассмотрим метод Бринелля определения твердости материалов или проба по Бринеллю (рис.6.). В этом методе в поверхность образца с определенной силой F вдавливают стальной шарик диаметром 10 мм. В результате воздействия на поверхности остается отпечаток, площадь S которого

измеряется. Отношение силы вдавливания к площади отпечатка дает величину твердости по Бринеллю:

$$HB = \frac{F}{S} \text{ [Па]}. \quad (2.6)$$

При измерениях разных по твердости материалов ГОСТом установлены следующие силы вдавливания F :

сталь, чугун	3000 кгс,
сплавы меди и алюминия	1000 кгс,
мягкие сплавы	250 кгс.

Твердость по Бринеллю связана с пределом прочности (σ_s) эмпирическим соотношением:

для стали и чугуна	$\sigma_s \sim 0,4HB,$
сплавов меди и алюминия	$\sigma_s \sim 0,25 HB.$

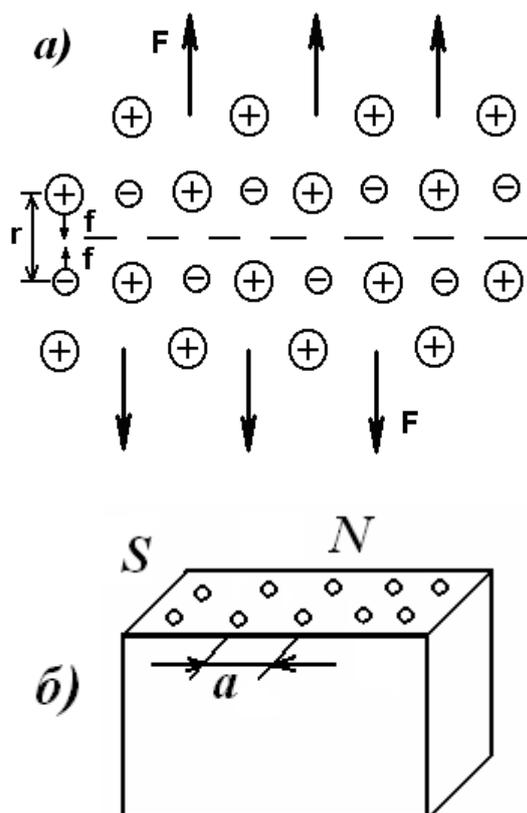
То есть измеряя твердость можно определить предел прочности материала. Вследствие простоты и оперативности определения механических свойств

материалов метод Бринелля получил широкое распространение в промышленности и лабораториях.

Кроме описанного выше метода, получили распространение также пробы на твердость по Роквеллу и Викерсу. Испытания проводятся по аналогичной методике, но вместо стального шарика для вдавливания используются наконечник в виде стального конуса или алмазная треугольная пирамидка, соответственно. Поскольку алмаз является самым твердым материалом, по методу Вickers могут быть испытаны любые по твердости материалы. Поскольку значения твердости у разных методик различаются, для сравнения результатов измерения существуют специальные таблицы перевода твердости из одной шкалы в другую.

2.3. Теоретическая и реальная прочности кристалла

Рассмотрим металлический кристалл, состоящий из положительных ионов и отрицательного газа электронов (рис.41а.). Можно приближенно



рассчитать усилие F , которое необходимо приложить к образцу, чтобы его разорвать. Для простоты будем считать, что в узлах кубической кристаллической решетки находятся положительно заряженные ионы, а посередине между двумя ионами сосредоточены электроны. Соответственно каждый положительный ион будет притягиваться к отрицательному электрону. Данную силу притяжения можно вычислить, зная расстояние на котором находятся эти заряды. Оно равно периоду кристаллической

Рис.7. Расчет силы взаимодействия в металлическом кристалле.

решетки a . Тогда притяжение двух зарядов будет определяться силой Кулона:

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^2}, \quad (2.7)$$

Таких пар ион-электрон будет множество. Общая сила притяжения сложится из суммы всех взаимодействующих пар N :

$$F = \sum_{i=1}^N f_i = Nf, \quad (2.8)$$

Число пар N найдем (рис.41б.) поделив сечение образца S на площадь, приходящуюся на один ион (для кубической решетки a^2):

$$N = \frac{S}{a^2}, \quad (2.9)$$

тогда сила взаимодействия равна

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Se^2}{a^4}. \quad (2.10)$$

Значит, напряжение определится через

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^4}, \quad (2.11)$$

По полученной формуле рассчитаем прочность кристалла железа, подставив параметр кристаллической решетки, известный из эксперимента:

$$a = 2,86 \text{ \AA} (\text{для железа}), e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

Теоретический расчет дает величину предела прочности $\sigma_{теор} \sim 3,4 \cdot 10^{10}$ Па. Однако реально наблюдаемая в экспериментах прочность железе $\sigma_{эксп} \sim 2 \cdot 10^8$ Па. Результаты различаются в сотни раз! Аналогичная ситуация наблюдается и для других материалов, и другого вида деформации (сдвига) см. табл.2.

Табл.2. Экспериментальные и рассчитанные модули сдвига металлов.

	$\tau_{\text{эксп}}$, МПа	$\tau_{\text{теор}}$, МПа
Медь	1	7400
Серебро	6	4600
Железо	29	11000

Причиной такого разительного отличия являются дефекты кристаллической решетки. Реальные кристаллы имеют неидеальную структуру, содержат дефекты строения. Наибольшее влияние на прочность оказывают линейные дефекты – дислокации. При наличии дислокаций прочность кристаллов должна уменьшаться в сотни раз, и тогда теоретические расчеты согласуются с экспериментальными данными. Первоначально дислокации были предложены теоретически, и только спустя полвека они были обнаружены экспериментально с помощью электронных микроскопов высокого разрешения.

Появившиеся современные технологии позволяют выращивать совершенные практически бездефектные кристаллы. Они длинные, но тонкие по сечению, их называют нитевидные кристаллы или «усы». Прочность этих кристаллов оказалась близка к теоретическому пределу (табл.3.), что подтвердило правильность дислокационной теории.

Табл.3. Прочность кристаллов.

σ_s	Обычный кристалл, ГПа	Нитевидный кристалл, ГПа
Оксид Al	0,31	28
Оксид Be	0,14	13
Fe	0,24	13

- **Контрольные вопросы**

1. Как характеризуют механические свойства материалов?
2. Какие участки выделяют на диаграмме растяжения?
3. В чём отличия диаграмм хрупких и пластичных материалов?
4. Что такое твёрдость материала?
5. Как определяют твердость?
6. Как она связана с прочностью?
7. Почему прочность реальных кристаллов в сотни раз меньше прочности, рассчитанной для идеальных кристаллов?
8. Каково влияние дислокаций на прочность кристаллов?

3. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

3.1. Процессы, происходящие при нагреве деформированного металла

При деформации металла большая часть затрачиваемой работы (~95%) идет на нагрев материала, оставшаяся часть (~5%) идет на образование структурных дефектов (вакансий , дислокаций, внутренних напряжений и т.д.). Такое состояние металла с накопленными дефектами или наклепанного металла термодинамически неустойчиво. Поэтому при нагреве в нем протекают процессы, приводящие к возвращению всех свойств металла к первоначальному состоянию до деформации.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на два основных: **возврат** и **рекристаллизацию**; оба сопровождаются уменьшением свободной энергии. Возврат происходит при относительно низких температурах (ниже $0,3 T_{пл}$), рекристаллизация - при более высоких (выше $0,4 T_{пл}$).

Возвратом называют все изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры деформированного металла, т. е. размер и форма зерен при возврате не изменяются.

Рекристаллизацией называют зарождение и рост новых зерен с меньшим количеством дефектов строения. В результате рекристаллизации образуются совершенно новые, чаще всего равноосные кристаллы.

Возврат, в свою очередь, подразделяют на две стадии: **отдых** и **полигонизацию**. Отдых при нагреве деформированных металлов происходит всегда, а полигонизация развивается лишь при определенных условиях.

Отдыхом холоднодеформированного металла называют стадию возврата, при которой уменьшается количество точечных дефектов, происходит перемещение дислокаций. При низких температурах ($\sim 0,2 T_{пл}$) происходит сток вакансий к границам зерен, перемещение и перегруппировка дислокаций, поглощение вакансий и межузельных атомов дислокациями. Происходит также переползание дислокаций, которое сопровождается взаимным уничтожением дислокаций разных знаков и приводит к заметному уменьшению их плотности. Перераспределение дислокаций сопровождается уменьшением остаточных напряжений. Отдых снижает количество точечных и линейных дефектов структуры, уменьшает удельное электрическое сопротивление, и повышает плотность металла.

Полигонизацией называют стадию возврата, при которой в пределах каждого кристалла образуются новые малоугловые границы. Процесс протекает при нагреве до температуры $(0,25-0,3) T_{пл}$. Границы возникают путем скольжения и переползания дислокаций; в результате кристалл разделяется на субзерна-полигоны, свободные от дислокаций (см. рис.8.).

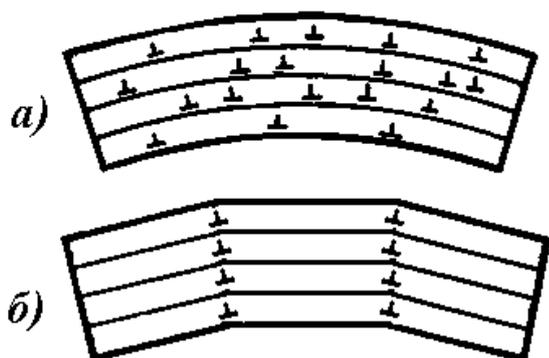


Рис.8. Структура металла наклепанного (а) и после полигонизации (б).

Полигонизация в металлах технической чистоты и в сплавах твердых растворах -наблюдается только после небольших степеней деформаций и не у всех металлов. Этот процесс редко развивается в меди и ее сплавах и хорошо выражен в алюминии, железе, молибдене и их сплавах.

Полигонизация холоднодеформированного металла приводит к уменьшению твердости и прочности. Блочная структура, возникшая благодаря полигонизации, весьма устойчива и сохраняется почти до температуры плавления. После формирования блочной структуры рекристаллизация не наступает, полигонизация и рекристаллизация оказываются конкурентами.

3.2.1. Рекристаллизация. При нагреве деформированного металла до более высоких температур ($>0,4 T_{пл}$) начинается рекристаллизация (рис.9.). Образуются совершенно новые зерна, с неискаженной решеткой, отделенные от старых зерен большеугловыми границами. Размеры новых зерен могут сильно отличаться от исходных. Образование новых зерен приводит к резкому снижению плотности дислокаций и высвобождению энергии, накопленной при пластической деформации металла. Плотность дислокаций в наклепанном металле достигает $\rho \approx 10^{10} - 10^{12} \text{ м}^{-2}$, в рекристаллизованных зернах $\rho \approx 10^6 - 10^8 \text{ м}^{-2}$. Пластически деформированные металлы могут рекристаллизоваться лишь после деформации, степень которой превышает определенное критическое значение, которое называется критической степенью деформации. Для алюминия она $\sim 2\%$, для железа и меди $\sim 5\%$. Если

степень деформации меньше критической, то зарождения новых зерен при нагреве не происходит. Наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен называется температурным порогом рекристаллизации. Для алюминия, меди и железа технической чистоты температурный порог рекристаллизации ($0,4 T_{пл}$) равен соответственно 100, 270 и 450 °С.

Зарождение новых зерен при рекристаллизации происходит в участках с наибольшей плотностью дислокаций, обычно на границах деформированных

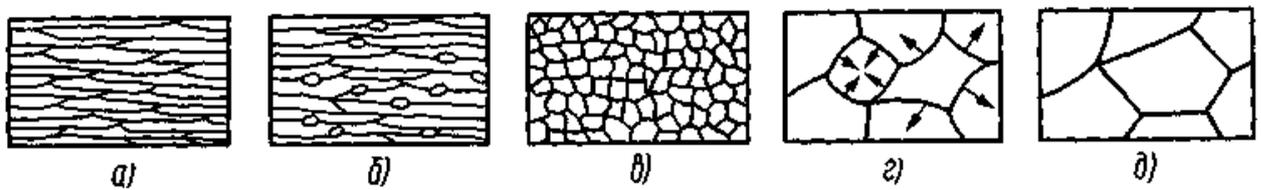


Рис.9. Изменения микроструктуры деформированного металла при нагреве:
 а – наклепанный металл; б – начало первичной рекристаллизации;
 в – завершение первичной рекристаллизации; г, д – стадии собирательной рекристаллизации

зерен (рис.9а.). Чем выше степень пластической деформации, тем больше возникает центров рекристаллизации. Они представляют собой зародившиеся микроскопические области с минимальным количеством точечных и линейных дефектов, которые возникают путем перераспределения и частичного уничтожения дислокаций. При этом между центром рекристаллизации и деформированной основой появляется высокоугловая граница.

С течением времени образовавшиеся центры новых зерен увеличиваются в размерах, растут. Происходит переход атомов от деформированного окружения к новому зерну, при этом большеугловые границы новых зерен перемещаются вглубь наклепанного металла.

Рассмотренная стадия рекристаллизации называется **первичной рекристаллизацией**. Первичная рекристаллизация заканчивается при

полном замещении новыми зернами всего объема деформированного металла (рис.9в.).

Первичная рекристаллизация полностью снимает наклеп, созданный при пластической деформации; металл приобретает равновесную структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения. Свойства металла после рекристаллизации близки к свойствам отожженного металла.

По завершении первичной рекристаллизации при увеличении выдержки или температуры происходит рост одних образовавшихся зерен за счет других. Рост зерен происходит вследствие того, что одни зерна постепенно увеличиваются в размерах, поглощая соседние зерна. Эта стадия рекристаллизации называется *собирательной рекристаллизацией* (рис.9г,д.). Процесс развивается самопроизвольно в связи с тем, что укрупнение зерен приводит к уменьшению свободной энергии металла, из-за уменьшения зернограничной поверхностной энергии.

С повышением температуры рост зерен ускоряется. Чем выше температура нагрева, тем более крупными окажутся рекристаллизованные зерна.

На рис.10 приведены графики изменения твердости и пластичности наклепанного металла в зависимости от температуры нагрева.

В некоторых случаях какие-то зерна имеют предпочтительные условия для роста: благоприятная для роста кристаллографическая ориентация, меньшая концентрация дефектов и т.д. Тогда эти зерна, растущие с большой скоростью, можно рассматривать как аналог центров кристаллизации. Процесс их роста называют *вторичной рекристаллизацией*. В результате образуется небольшое число очень крупных зерен и множество мелких. Такая разнотернистость снижает механические свойства металлов и является нежелательной.

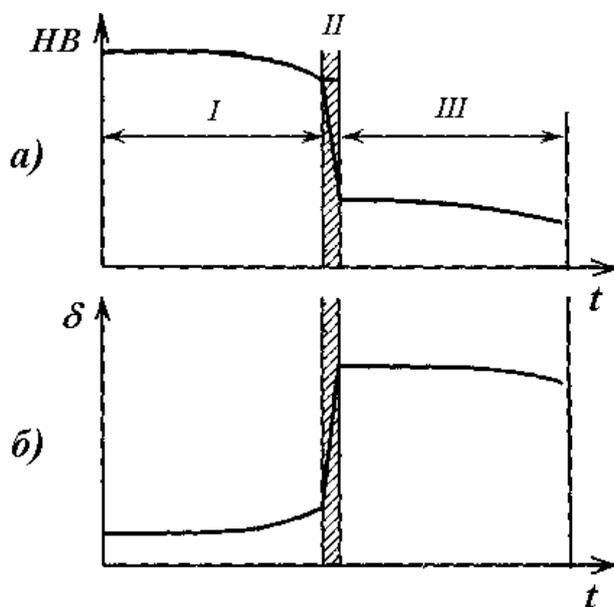


Рис10. Графики изменения твердости (а) и пластичности (б) наклепанного металла

3.2. Холодная и горячая деформации

В условиях производства из металла изготавливают различные изделия с использованием различных технологических операций:

прессования, прокатка, волочение и др.

Если величина деформации при обработке больше величины пластичности, то материал трескается, ломается.

Для получения больших значений деформаций материал часто обрабатывают поэтапно, проводя промежуточные отжиги. При нагреве происходит рекристаллизация, после чего пластичность материала восстанавливается, твердость уменьшается. Таким образом можно получать большие деформации металла.

Эти два процесса деформацию и нагрев можно проводить одновременно – такой способ обработки называют горячей деформацией. При такой обработке одновременно с деформацией протекает процесс рекристаллизации. Для этого температура процесса должна превышать порог рекристаллизации $T > 0.4T_{пл}$. Обычно обработку проводят при температурах $0,7 - 0,8T_{пл}$. В этих условиях наклеп не идет, и деформацию можно проводить до любых степеней.

Если температура ниже порога рекристаллизации $T < 0.4T_{пл}$ – такой способ обработки называют холодной деформацией. В этом случае при деформации прочность материала увеличивается за счет наклепа, но из-за него величина холодной деформации ограничена.

Свойства металлов сильно различаются, поэтому сложившиеся названия процессов достаточно условны.

Например, для олова температура плавления равна

$$T_{\text{пл}} = 505 \text{ К},$$

а температурный порог рекристаллизации

$$T_{\text{рекр}} = 0,4T_{\text{пл}} \approx 202 \text{ К} \approx -70 \text{ }^\circ\text{C}$$

поэтому обработка олова при комнатной температуре будет горячей деформацией.

Соответственно для вольфрама

$$T_{\text{пл}} = 3650 \text{ К}$$

$$T_{\text{рекр}} = 0,4T_{\text{пл}} \approx 1460 \text{ К} \approx 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

Значит обработка вольфрама с нагревом в печи до 1000°C будет холодной деформацией.

3.3. Термическая обработка металлов

При нагреве изменяются структура и свойства материалов. В производстве широко используют такое воздействие температуры для улучшения металлических сплавов железа, меди, алюминия, неметаллических материалов стекла, керамики и др. Рассмотрим его на примере сплавов железа – сталей.

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева, выдержки и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств.

Термическая отработка состоит из трех этапов:

1. нагрев;
2. изотермическая выдержка;
3. охлаждение.

На первом этапе металл нагревают в печах до заданной температуры. На втором этапе выдерживают при высокой температуре, при этом в

материале происходят диффузионные процессы, требующие длительного времени. Заключительный этап – охлаждение.

В зависимости от целей и условий различают три основных вида обработки:

1. Отжиг
2. Закалка
3. Отпуск или старение

Отжиг – это термическая обработка, в результате которой металлы или сплавы приобретают структуру близкую к равновесной. При отжиге материал нагревается в печах до заданной температуры и выдерживается достаточно длительное время. Затем следует медленное охлаждение со скоростью 30–200°С/час.

В результате отжига в металлах снимаются внутренние остаточные напряжения, происходит рекристаллизация, выравнивается химический состав. В зависимости от целей отжига различают его разновидности: а) для снятия напряжений, б) рекристаллизационный в) диффузионный. Для сталей характерные температуры отжига 600–1300°С, время выдержки 10–50 часов. Вследствие протекающих при высокой температуре процессов изменяются свойства сплавов: повышается пластичность, снижается хрупкость, улучшается структура металла, его обрабатываемость.

Закалка – термическая обработка, заключающаяся в нагреве материала и последующего быстрого охлаждения, в результате чего фиксируется высокотемпературное состояние материала. При больших скоростях охлаждения высокотемпературная структура не успевает перестроиться и сохраняется при низкой температуре, т.е. образуется неравновесная структура.

Закалке подвергают сплавы имеющие переменную растворимость компонентов, полиморфные превращения или испытывающие распад твердого раствора.

После закалки в сплавах увеличивается прочность, электрическое сопротивление, коэрцитивная сила, коррозионная стойкость. Нежелательными последствиями являются снижение пластичности, повышение хрупкости.

Большое значение при закалке имеет скорость охлаждения. Для сталей необходимые скорости 400-1400 °С в секунду. Для увеличения скорости охлаждения используют охлаждающую среду. В табл.4. приведены сравнительные эффективности охлаждающих сред относительно воды, которая принята за единицу.

Табл.4. Коэффициенты охлаждения сред.

Охлаждающая среда	Температура охлаждающей среды, °С	Коэффициент охлаждения
Вода	20 - 80	1
10% водный раствор: NaCl, NaOH	20	3
Масло минеральное	20-200	0,3

Отпуск или старение — термическая обработка, в результате которой в предварительно закаленных сплавах происходят фазовые превращения, в некоторой приближающие их структуру к равновесной.

Такую термическую обработку проводят аналогично отжигу, но при меньших температурах нагрева. Для сталей 300–600°С.

После закалки материал становится твердым прочным, но при этом непластичным хрупким. Для улучшения пластичности, снижения хрупкости применяют смягчающую термическую обработку называемую отпуск (для сталей бронз) или старение (для алюминиевых сплавов). При этом немного снижается прочность, но получается оптимальное сочетание свойств прочности, пластичности, упругости, стойкости к ударным нагрузкам.

3.4. Химико-термическая обработка металлов

Химико-термической обработкой (ХТО) называется процесс насыщения поверхностного слоя металла различными элементами путем их диффузии из внешней среды при высокой температуре. Такой процесс называют также **поверхностным легированием**.

При внедрении легирующих элементов в поверхностный слой металла его свойства изменяет. Таким способом можно улучшить различные свойства металлов. Целью химико-термической обработки являются повышение твердости, износостойкости, увеличение усталостной выносливости, придание коррозионной стойкости против воздействия агрессивных сред.

Внедряемые элементы могут быть как металлами, так и неметаллами. Например:

неметаллические – углерод С, азот N, кремний Si, бор В и др.

металлические – хром Cr, алюминий Al, цинк Zn и др.

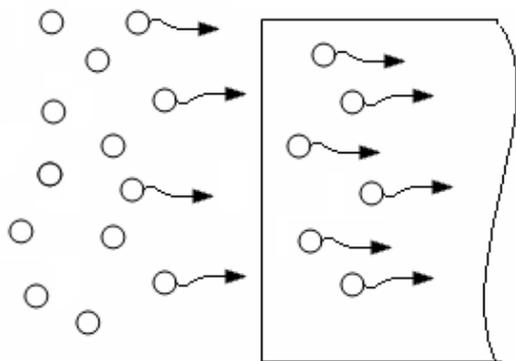


Рис.11. Поверхностное легирование.

Рассмотрим процесс диффузионного насыщения поверхности металла легирующим элементом (рис.11.). На поверхности металла создается избыточная концентрация элемента, который необходимо внедрить в металл, причем элемент должен находиться в

активном атомарном состоянии. Затем происходит адсорбция или связывание атомов поверхностью металла. После чего эти атомы элемента внедряются вглубь металла.

Таким образом, весь процесс ХТО состоит из трех этапов:

1. Создание среды активных атомов
2. Адсорбция атомов поверхностью металла
3. Диффузия атомов вглубь металла

Активная среда может быть в различных агрегатных состояниях:

- Твердом
- Жидком
- Газообразном

Для того чтобы атомы активно перемещались вглубь металла, его нагревают, ускоряя процесс диффузии.

В результате обработки образуется диффузионный слой, т.е. слой материала у поверхности детали, отличающийся по химическому составу, структуре и свойствам от исходного. На рис.12. показан график изменения концентрации насыщающего элемента от глубины от поверхности металла.

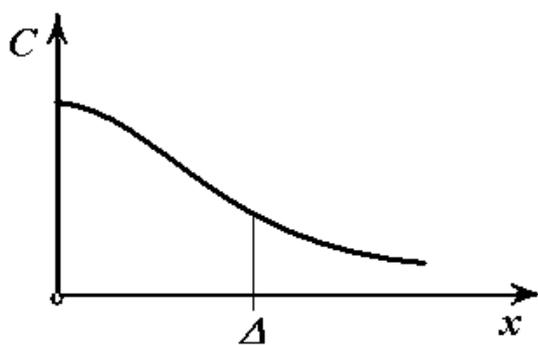


Рис.12. Зависимость концентрации легирующего элемента C от глубины x от поверхности металла.

Толщина образующегося диффузионного слоя зависит от условий протекания процесса насыщения. Чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности металла, тем больше толщина слоя.

Рост толщины диффузионного слоя от длительности процесса при неизменных прочих условиях подчиняется квадратичной закономерности (рис.13а.):

$$\Delta = A \cdot \sqrt{\tau}, \quad (3.1)$$

где τ – длительность процесса ХТО

A – константа

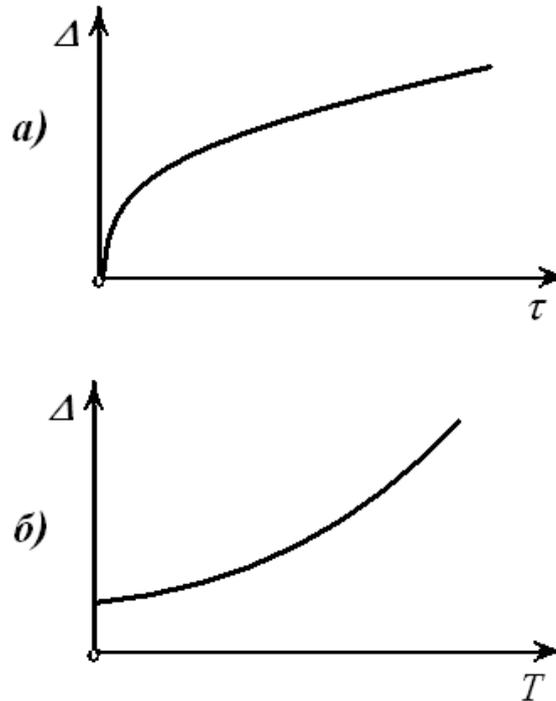


Рис.13. Зависимость толщины диффузионного слоя Δ от длительности процесса τ (а) и от температуры T (б).

А зависимость от температуры, при постоянной длительности процесса и прочих условий, определяется экспоненциальной функцией (рис.47б.):

$$\Delta = B \cdot \exp\left[\frac{-Q}{kT}\right], \quad (3.2)$$

где Q – энергия активации диффузии

T – абсолютная температура

k – постоянная Больцмана

B – константа характеризующая протекающий процесс

По названию внедряемого элемента процесс ХТО имеет разные названия:

при внедрении

Бора – борирование,
 Хрома – хромирование,
 Углерода – цементация, и т.д.

Рассмотрим основные процессы подробнее.

3.3.1. Цементация

Цементацией называется процесс насыщения поверхностного слоя стальных изделий углеродом С.

При этом у металла увеличивается твердость поверхности, но в тоже

время сохраняется вязкость внутренних слоев металла. Такое благоприятное сочетание свойств увеличивает срок службы деталей, подвергающихся трению и ударным нагрузкам.

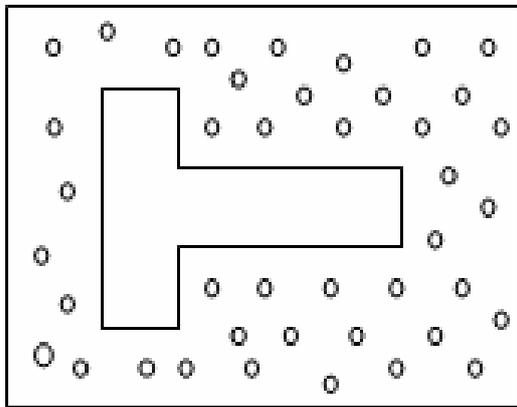


Рис.14. Цементация в твердой среде.

Цементация проходит при условиях

температура $t =$

900–950 °С

длительность $\tau = 6–12$ ч

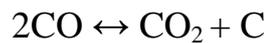
толщина образующегося диффузионного слоя $\Delta = 0,8–$

1,7мм

Различают два способа цементации: в твердой и газовой среде.

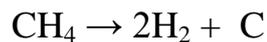
1. В первом используется среда древесный уголь, это почти чистый углерод. Подготовленные для цементации детали укладывают в металлический ящик и засыпают углём (рис.48.). Далее ящик закрывают и нагревают до необходимой температуры . В результате нагрева происходят реакции :





Выделившийся атомарный углерод диффундирует в глубь металла. В итоге один активный атом углерода образует защитный слой.

2. Вторым способом – газовая цементация. Активная среда – метан. При нагреве происходит диссоциация молекул, с выделением атомарного углерода:



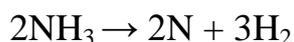
Газовая цементация позволяет механизировать и автоматизировать процесс, поэтому используется при массовом производстве.

В результате цементации механические свойства деталей значительно возрастают:

- твердость поверхности возрастает в 1,5-2 раза
- износостойкость на 30-50%

3.3.2. Азотирование

Азотированием называется процесс насыщения поверхности металла азотом N. Для создания активной среды используют газ аммиак (NH_3), который под действием высокой температуры диссоциирует, выделяя атомарный азот:



Условия протекания процесса :

$$t = 500 - 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau = 24 - 60 \text{ ч}$$

$$\Delta = 0,3 - 0,6 \text{ мм}$$

Азот диффундирует в поверхностные слои металла образуя нитриды, которые придают азотированному слою высокую прочность. Кроме повышения твердости, износостойкости, улучшается коррозионная устойчивость.

3.3.3. Нитроцементация

Нитроцементация – процесс одновременного насыщения поверхности металла азотом N и углеродом C. Средой является газовая смесь метана и аммиака.

Условия протекания процесса:

$$t = 840 - 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\tau = 4 - 10 \text{ ч}$$

$$\Delta = 0,2 - 0,8 \text{ мм}$$

Преимуществом данного процесса является то, что одновременная диффузия азота и углерода происходит гораздо быстрее, чем азотирование и цементация в отдельности. Поэтому из-за большей производительности и соответственно меньших затрат энергии, нитроцементация широко используется на автомобильных и тракторных заводах. Например, на ВАЗе такой химико-термической обработке подвергают 95% деталей.

3.3.4. Цианирование

Обработка металла в жидкой среде расплавленных цианистых солей натрия NaCN.

Условия протекания процесса:

$$t = 820 - 920 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\tau = 0,5 - 1 \text{ ч}$$

$$\Delta = 0,15 - 0,35 \text{ мм}$$

Преимущество цианирования – меньшая продолжительность процесса для получения слоя заданной толщины; более высокое сопротивление износу и повышенная усталостная прочность.

Недостатком цианирования является сильная ядовитость цианистых солей. Поэтому цианирование проводят в специально выделенных помещениях с соблюдением строгих мер предосторожности.

3.3.5. Борирование

Борирование – процесс насыщения поверхности металла бором В. Образующиеся соединения с металлом – бориды, очень твердые вещества. Борирование увеличивает твердость и износостойкость от 2 до 10 раз. Такая обработка подвергают трущиеся детали, штамповый инструмент подвергающийся большим нагрузкам.

3.3.6. Силицирование

Это процесс насыщения металла кремнием Si. Образующиеся силициды железа имеют пористую структуру и невысокую твердость. Однако слой толщиной 0,3–1 мм на поверхности детали после пропитки маслом резко снижает трение и повышает износостойкость. Кроме того повышается коррозионная стойкость к воздействию морской воды и окислению.

3.3.7. Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – процесс насыщения поверхности деталей различными металлами. Диффузия металлов идет значительно медленнее, чем азота или углерода, поэтому образующиеся слои в десятки раз тоньше.

В зависимости от рода металла процессы называют алитирование Al, хромирование Cr, цинкование Zn и т.д. В результате металлизации повышается коррозионная стойкость, твердость, износостойкость. Такой обработке подвергают детали паросилового оборудования, патрубки, вентили, клапаны, работающие в агрессивных средах. Применяют обработку и для декоративных целей, улучшения внешнего вида изделий.

3.5. Поверхностная пластическая деформация

Еще одним видом обработки поверхности для улучшения свойств деталей является поверхностная пластическая деформация. Рассмотрим несколько способов поверхностной пластической деформации:

- **Дробеструйный наклеп.**

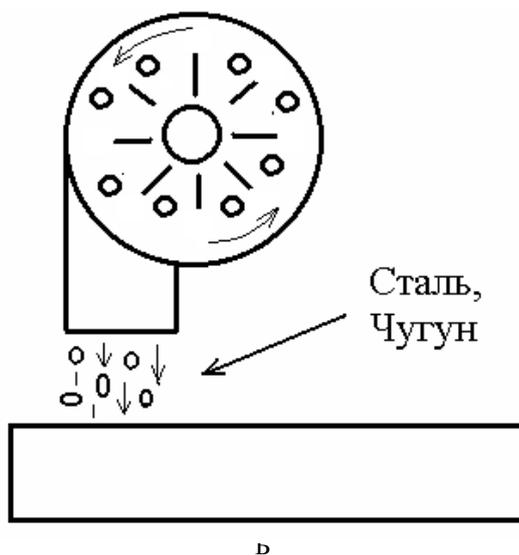


Рис.15. Дробеструйный наклеп.

Мощный вентилятор создает поток воздуха, который разгоняет маленькие стальные шарики или дробинки до больших скоростей (рис.49.). При попадании на обрабатываемую деталь каждая частица ударяется о поверхность металла и образует небольшую вмятину, то есть деформированную область. Таким образом, из-за наклепа происходит упрочнение металла. После многочисленных соударений дробинки образуются сплошной наклепанный слой, который увеличивает прочность поверхностных слоев металла.

- **Центробежный шариковый наклеп.**

В этом случае поверхность металла обрабатывается шариками, которые прикреплены к вращающемуся инструменту (барабану, диску) и могут выдвигаться из него (рис.16.). Барабан раскручивается до больших скоростей и подносят к поверхности обрабатываемого материала. Каждый шарик ударяется о поверхность детали и отскакивает, оставляя вмятинку.

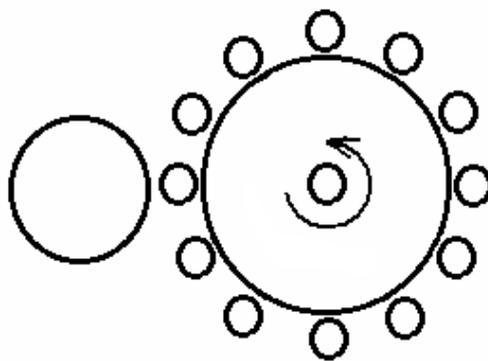


Рис.16. Центробежный шариковый наклеп

Инструмент перемещают вдоль всей поверхности обрабатываемой детали. Образуется деформированный, наклепанный поверхностный слой.

- **Накат (выглаживание)**

Принцип обработки заключается в следующем. Стальной шарик или алмазный инструмент с силой вдавливаются в поверхность детали вызывая её деформацию (рис.17.). Деталь вращается и инструмент перемещается по поверхности обрабатываемой детали. В результате получается «продавленный слой», обладающий повышенной твердостью.

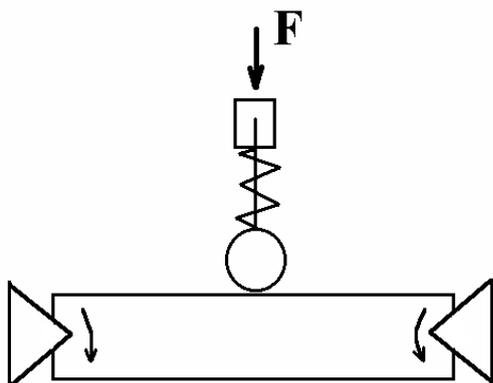


Рис.17. Накат или выглаживание.

После поверхностной пластической деформации получается гладкая блестящая поверхность, устраняются концентрации напряжений на деталях. Обработке подвергают коленчатые валы, гильзы цилиндров, рычаги и др. В результате увеличиваются твердость, износостойкость (в 1,5–2 раза), долговечность (на 30-50%), коррозионная стойкость деталей.

- **Контрольные вопросы**

1. Какие процессы протекают в деформированном металле при нагреве?
2. Что такое рекристаллизация

3. Как изменяются механические свойства металлов после рекристаллизации?
4. При каких условиях происходит горячая деформация?
5. Какие основные виды термической обработки металлов?
6. Цель отжига металлов?
7. Методы закалки металлов?
8. Этапы химико-термической обработки?
9. Цели химико-термической обработки?
10. Закономерность изменения толщины диффузионного слоя от длительности процесса?

IV. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Общие требования, предъявляемые к конструкционным материалам

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, строительных сооружений, опор, перекрытий, мостов, которые подвергающиеся механическим нагрузкам. Эти детали и конструкции характеризуются большим разнообразием форм, размеров, условий эксплуатации. Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к конструкционным материалам, основные из которых эксплуатационные, технологические и экономические.

Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для того, чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, конструкционный материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Конструкционной прочностью называется комплекс свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу машин и аппаратов в условиях эксплуатации. Прежде всего речь идет о механических свойствах: прочность, пластичность, упругость и др. Однако требуемые характеристики механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и воздействия на него *рабочей среды и температуры*.

Среда - жидкая, газообразная, ионизированная, радиационная, в которой работает материал, оказывает существенное влияние на его механические свойства и работоспособность деталей. В частности, рабочая среда может вызывать повреждение поверхности вследствие коррозии, окисления и образования окалина, изменение химического состава поверхностного слоя в результате насыщения нежелательными элементами. Кроме того, возможны разбухание и местное разрушение материала в результате ионизационного и радиационного облучения. Для того чтобы противостоять неблагоприятному воздействию рабочей среде, материал должен обладать не только механическими свойствами, но и стойкостью к электрохимической коррозии, жаростойкостью, радиационной стойкостью, влагостойкостью, способностью работать в условиях вакуума и др.

В некоторых случаях важными оказываются требования определенных магнитных, электрических, тепловых свойств, высокой стабильности размеров деталей (особенно высокоточных деталей приборов).

Технологические требования направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала характеризуют возможные методы его обработки. Она оценивается обрабатываемостью резанием, давлением, свариваемостью, способностью к литью, пайке, а также к термической обработке. Технологичность материала имеет важное значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

Экономические требования сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы по возможности должны содержать минимальное количество легирующих элементов. Использование материалов, содержащих дорогостоящие легирующие элементы, должно быть обосновано повышением свойств деталей. Экономические требования, так же как и технологические, приобретают особое значение при массовом масштабе производства.

Таким образом, конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований.

4.1.1. Критерии оценки конструкционной прочности материалов

Конструкционная прочность - комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. Критериями механической прочности при статистических нагрузках являются временное сопротивление или предел текучести, характеризующие сопротивление материала пластической деформации. Для приближенной оценки статической прочности используют твердость по Бринеллю НВ.

Для ограничения упругой деформации материал должен обладать высоким модулем упругости (или сдвига), являющимся критерием его жесткости. Именно критерии жесткости, а не прочности обуславливают размеры станин станков, корпусов редукторов и других деталей, от которых требуется сохранение точных размеров и формы.

Возможно и противоположное требование. Для пружин, мембран и других упругих элементов приборов, наоборот, важно обеспечить большие упругие перемещения. В этих случаях материал должен обладать большим пределом упругости.

Для материалов, используемых в авиационной и ракетной технике, важное значение имеет плотность материала, удельная прочность.

По величине выбранных критериев прочности рассчитывают допустимые рабочие напряжения. При этом, чем больше прочность материала, тем больше допустимые рабочие напряжения и тем самым меньше размеры и масса детали.

Надежность – свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным из-за протекания с большой скоростью, а также возможных аварийных последствий.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью и ударной вязкостью. Необходимо также учитывать то, что в условиях эксплуатации действуют факторы, увеличивающие опасность хрупкого разрушения: концентраторы напряжений (надрезы), понижение температуры, ударные нагрузки.

Долговечность – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения, обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени. Причины потери работоспособности разнообразны: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии, радиационного разбухания и пр. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение.

Выносливость или циклическая долговечность характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений. Большинство деталей машин испытывает длительные циклические нагрузки. Критерий их прочности - предел выносливости. Процессы постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящие к изменению его свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, называют усталостью, а свойство противостоять усталости выносливостью.

Износостойкость - свойство материала оказывать в определенных условиях трения сопротивление изнашиванию. Изнашивание - процесс постепенного разрушения поверхностных слоев материала под действием сил трения. Результат изнашивания называют износом. Его определяют по изменению размеров, уменьшению объема или массы.

Таким образом, в качестве критериев конструкционной прочности выбирают те характеристики, которые наиболее полно соответствуют условиям эксплуатации.

4.2. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ

Диаграмма состояний сплавов железо-углерод (рис.52.) характеризует фазовый состав и превращения в системе.

Железо и углерод – полиморфные элементы и разных частях диаграммы существуют разные кристаллические фазы и структуры, обозначенные буквами.

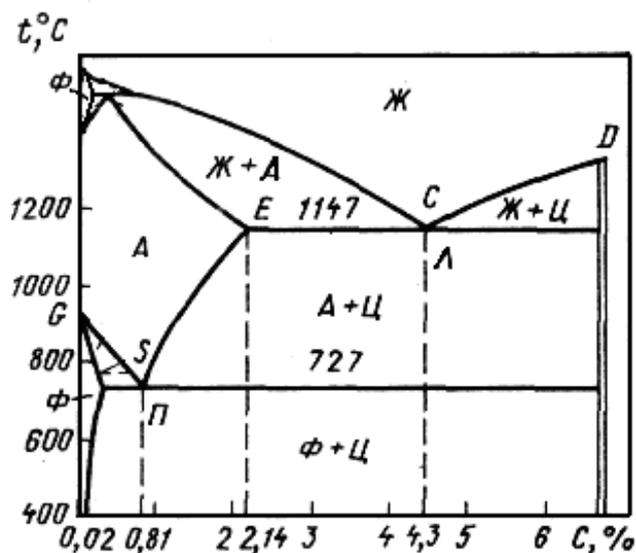


Рис.18. Диаграмма состояний сплавов железо-углерод.

Ф – феррит или α -железо, твердый раствор углерода в α -железе, мягкая, пластичная фаза, имеет ОЦК решетку, $\square = 40\%$, $HV = 1000$ МПа. Существуют области феррита при высокой и при низкой температуре. Растворимость углерода в феррите мала, при низких температурах составляет 0,02%. Высокотемпературный феррит часто называют δ -железом.

А – *аустенит* или α -железо, это твердый раствор углерода в γ -железе, имеет ГЦК решетку, пластичен, его твердость НВ = 2000 МПа. Растворимость углерода в аустените достигает 2,14%.

Ц – *цементит* или соединение Fe_3C . Содержание углерода 6,69%. Это очень твердая и хрупкая фаза. НВ = 8000 МПа.

С – *точка эвтектики*, механическая смесь фаз аустенита и цементита, содержание углерода 4,3%.

Л – *Ледебурит* – эвтектическая смесь аустенита и цементита, содержит чередующиеся зерна фаз цементита и аустенита. Ледебурит твердый, хрупкий и непластичный. НВ = 6000 МПа

S – *эвтектоидная* точка, механическая смесь фаз феррита и цементита. Соответствует содержанию углерода 0.8%

П – *Перлит* – эвтектоидная смесь феррита и цементита. Пластичен $\square = 16\%$, твердость НВ = 2200 МПа.

Ледебурит и перлит оказывают сильное влияние на свойства сплавов, поэтому их рассматривают как самостоятельные структурные составляющие.

Эта диаграмма делит сплавы на две группы.

1. Первая до 2.14% С - сплавы называются *сталями*
2. Вторая более 2.14% С – сплавы называются *чугунами*.

В структуре чугунов присутствует твердый и хрупкий ледебурит, что обуславливает их непригодность к обработке давлением и затрудняет резание.

Чугуны в зависимости от содержания углерода также делятся

– доэвтектические чугуны < 4.3% С

– заэвтектические чугуны > 4.3% С

4.2.1. СТАЛИ

Существует огромное количество марок сталей с разнообразными свойствами. В СССР их выпускалось более 2000 марок. Перечисление их

характеристик занимает 20 томов. Из-за такого разнообразия свойств сталь стала основным конструкционным материалом, который отвечает предъявляемым требованиям машиностроения, промышленности и строительства. Не зря XX век называют веком стали.

Стали классифицируют по различным признакам: по назначению, химическому составу, качеству и т.д. (Рис.19.). Рассмотрим маркировку и общие характеристики некоторых сталей.

- ***Углеродистая сталь***

Сплав железа с легирующим элементом углеродом, называется углеродистая сталь. 80% всех выпускаемых сталей – это углеродистые стали (самые дешевые). Они обладают удовлетворительными механическими свойствами, хорошо обрабатываются давлением, резанием, пластичны.

По ГОСТу **углеродистые стали обыкновенного качества** маркируются буквами Ст и цифрой от 1 до 6, в зависимости от содержания углерода. Степень раскисления обозначается индексом: спокойная сталь – СП, полуспокойная – ПС, кипящая – КП.

Например, **Ст3_{кп}** – сталь обыкновенного качества, марки 3, кипящая.

Из таких сталей изготавливают балки, швеллеры, уголки, прутки для строительства, листовой прокат, проволоку и др.

В углеродистых качественных сталях содержится меньше сопутствующих примесей. По ГОСТу такую сталь обозначают цифрами 45, 85 и т.д., которые указывают процентное содержание углерода в сотых долях процента. То есть в стали 85 содержится

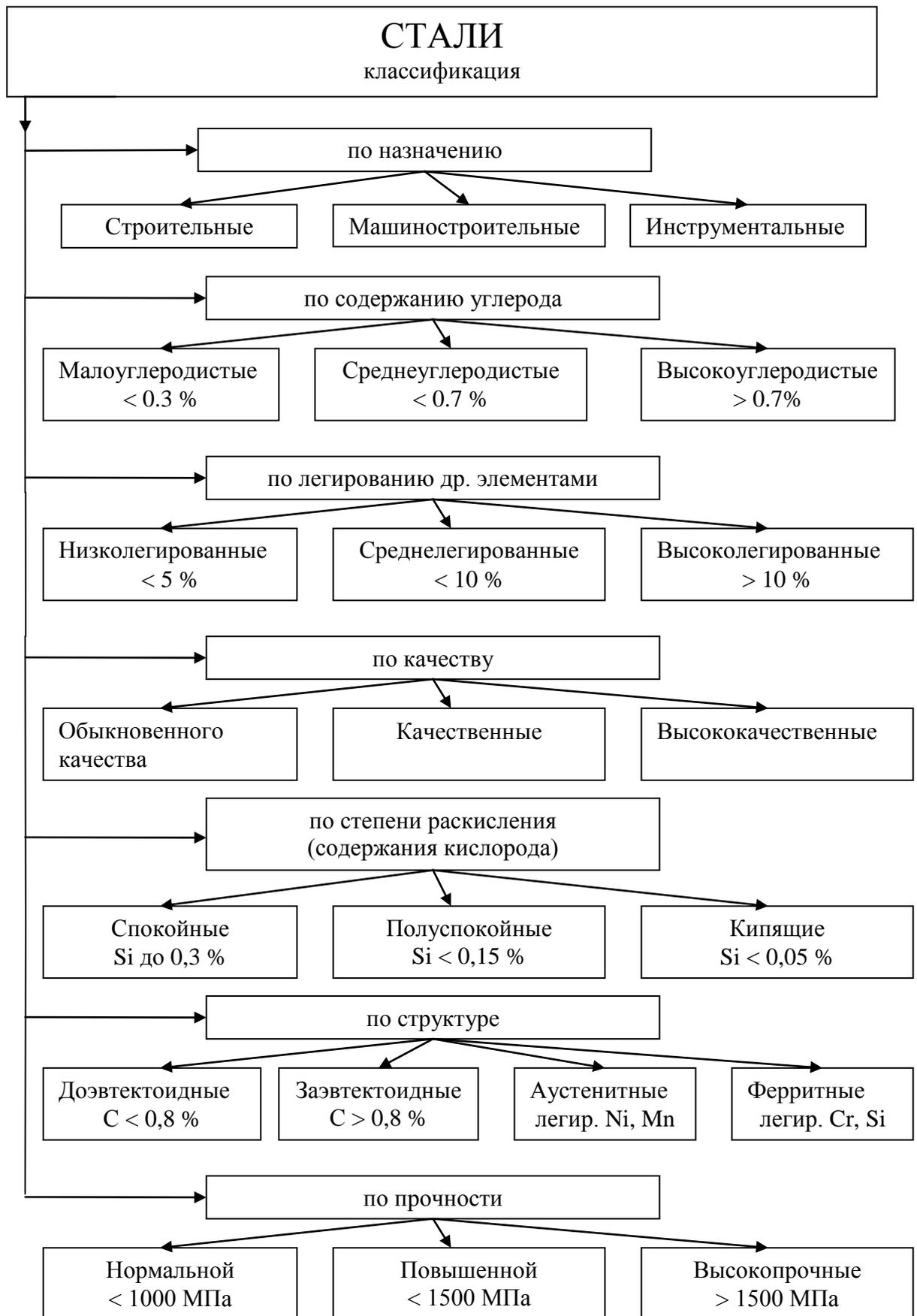


Рис.19. Классификация сталей.

0,85% углерода. Далее аналогично предыдущему добавляются обозначения спокойной, полуспокойной или кипящей стали.

Этот класс сталей используется для изготовления конструкционных деталей в машиностроении: болтов, гаек, пальцев, валов, осей, и т.д.

- ***Углеродистые инструментальные стали***

Они являются высокоуглеродистыми сталями, обладающими высокой твердостью, износостойкостью. Они предназначены для изготовления режущего, штампового, измерительного инструмента. Такая сталь маркируется первой буквой У, и далее идут цифры, указывающие содержание углерода в десятых долях процента. Для высококачественных сталей в конце ставится буква А.

Например, **У10А** – углеродистая инструментальная сталь, содержание углерода 1,0% , высококачественная.

- ***Легированные стали***

Они содержат легирующие элементы, улучшающие свойства этих сталей. В зависимости от количества и типа легирующих элементов эти стали по ГОСТу обозначают цифрами и буквами. Первые две цифры указывают на процентное содержание углерода в сотых долях процента. Далее идет перечисление легирующих элементов и их процентное содержание: Х -хром, Н –никель, Г –марганец, С –кремний, К –кобальт, М – молибден и т.д. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента около 1%. Далее могут следовать буквы: А – высококачественная сталь, Ш – особовысококачественная сталь. Если после обозначения стали не стоит никакой буквы, то мы имеем дело с качественной сталью.

Например, **сталь 20ХН3А** – легированная сталь, содержание углерода 0,2%, другие легирующие элементы: хром – 1% и никель – 3%, высококачественная сталь.

За счет легирования прочность таких сталей возрастает в 5-10 раз по сравнению с чистым железом, материалу можно придать коррозионную стойкость, жаропрочность и др.

Легированные стали дорогие, поэтому их выпускают в относительно небольших количествах и применяют там, где требуются особые свойства материала: высокая механическая прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость и пр.

В табл.5. приведены механические свойства некоторых марок сталей.

Табл.5. Механические свойства сталей

Материал	НВ, МПа	Предел прочности, МПа	Пластичность, %
Fe	800	250	50
Углеродистая сталь обыкновенного качества			
Ст1		370	31
Ст3		440	23
Ст6		600	12
Углеродистые качественные стали			
10	1430	340	31
40	2170	580	19
80	2850	1100	6
Инструментальные стали			
У7	1870	630	21
У12А	2070	700	28
Легированные стали			
40Х		1000	10
20ХГСНА		1850	13
03Н12К15М10		2500	6
03Н12К15М10		2500	6

- **Контрольные вопросы**

1. Какие сплавы называют чугунами?
2. Какие фазы входят в состав сталей?
3. По каким признакам классифицируют стали?
4. Как маркируют углеродистые стали обыкновенного качества?
5. Цели легирования сталей?
6. Маркировка легированных сталей?

4.3. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

В предыдущем разделе рассмотрены сплавы на основе железа, которые называют черными металлами. Все другие металлы (медь, алюминий и др.) и сплавы на их основе называют цветными.

Цветные металлы обладают многими ценными качествами, например, такими как хорошая электропроводность, теплопроводность, легкость и др. которые используются в различных применениях.

4.3.1. Медные сплавы

Медь – металл желтого цвета, высокотехнологичный, хорошо сваривается, паяется, обрабатывается давлением, обладает отличной пластичностью, характеризуется высокими теплопроводностью и электропроводностью, хорошей коррозионной стойкостью.

Его недостаток – он плохо режется. Кроме того это тяжёлый металл, его плотность $8,9 \text{ г/см}^3$. (Для сравнения, у железа плотность $7,8 \text{ г/см}^3$)

По технологическим свойствам медные сплавы подразделяют на деформируемые (обрабатываемые давлением) и литейные.

Так как чистая медь мягкая, поэтому как правило медь применяется в сплавах с другими элементами: Zn, Sn, Al, Be, Si, Mn, Ni.

Сплавы меди подразделяют на 2 группы

1. Латунни – сплавы с цинком Zn
2. Бронзы – сплавы со всеми элементами, кроме цинка.

Свойства медных сплавов приведены в табл.6.

Табл. 6. Механические свойства медных сплавов.

Материал	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
Медь литая	160	25	400
Медь деформированная	450	3	1250
Латунь Л68	320	55	550
Латунь ЛА77-2	400	55	600
Бронза БрОФ6,5-0,4	400	60	1000
Бронза БрАЖН10-4-4	650	35	1500(4000)

Латуни маркируются буквой Л (латунь) и цифрой, показывающей содержание меди в процентах. Маркировка Л68 – означает сплав с содержанием меди 68%, цинка 32%. При добавке других легирующих элементов в маркировке добавляется соответствующая буква (см. табл.7.) и цифра, указывающая его процентное содержание. Например, ЛА77-2 – означает сплав латунь, содержащий меди 77%, алюминия – 2%, остальные 21% цинк.

Табл.7. Обозначения легирующих элементов.

Zn	Sn	Al	Be	Si	Mn	Ni	Pb	Fe	P
Ц	О	А	Б	К	Мц	Н	С	Ж	Ф

Легирование цинком значительно повышает прочность и одновременно пластичность материала. улучшается технологичность. Поэтому латуни получили широкое распространение в качестве конструкционных материалов. Из латуни Л85 изготавливают краны, вентили и другое сантехническое оборудование. Латунь с 30% цинка называют патронной, т.к. из нее делают гильзы патронов. Добавка 1,5% олова придает сплаву

стойкость к воздействию морской воды, поэтому латунь получила название морской, она идет на изготовление обшивки и деталей оборудования судов. Легирование 3% свинца значительно улучшает обрабатываемость резанием, в результате обработки получается гладкая чистая поверхность, из такой латуни получают тонкие детали часов, поэтому такую латунь называли часовой.

Бронзы маркируются буквами Бр за которыми следуют буквы и цифра смысл которых такой же, как и в латунях. Названия бронзам дают по основным элементам входящим в состав. Например, маркировка БрОФ6,5-0,4 означает сплав бронза, оловянно-фосфорная, с содержанием олова 6,5%, фосфора 0,4%.

За счет легирования в медных сплавах удается получить очень хороший комплекс свойств. Например, бронза БрАЖН10-4-4 по прочности сравнима с углеродистыми сталями, твердость после закалки достигает 4000 МПа. При этом обладает коррозионной стойкостью, сохраняет высокую прочность при нагреве до 400 °С. Поэтому из неё изготавливают ответственные детали двигателей внутреннего сгорания работающие в условиях нагрева в химически агрессивных средах: клапана, части турбин, насосов и др.

Интересными механическими свойствами обладает бериллиевая бронза БрБ2 (содержание бериллия 2%). Отличительной ее особенностью является очень высокий предел упругости $\sigma_{0,002} = 600$ МПа (т.е. после приложения напряжения 600 МПа остаточная деформация не превышает 0,002%). Из этого материала получают отличные пружины для часов, измерительных приборов и пр.

Другой сплав Б16 называемый баббит (это сплав с оловом) имеет аномально низкий коэффициент трения со сталью: $K_{тр} = 0.01$ (0.005 со смазкой). Поэтому баббиты используются для изготовления подшипников скольжения для поддержки тяжелых турбин электростанций, достигающих массы сотни тонн.

4.3.2. Алюминиевые сплавы

Алюминий –очень легкий серебристо-белый металл, его плотность 2.7 г/см^3 , т.е. он в три раза легче меди. Алюминий обладает высокой пластичностью, хорошими теплопроводностью и электропроводимостью ($R_{уд} = 27 \text{ нОм}\cdot\text{м}$). Замечательная коррозионная стойкость, поскольку на поверхности металла образуется прочная оксидная пленка Al_2O_3 , которая защищает его от дальнейшего окисления. Хорошо обрабатывается резанием.

Чистый алюминий мягкий, но его сплавы имеют хорошую прочность и твердость. Поэтому в основном используется в виде сплавов. Дешевле меди, из-за чего алюминиевые провода все шире применяют для электропроводки.

Используется в судостроении и авиапромышленности для изготовления корпусов, обшивки, каркасов. Из него делают также трубы, радиаторы, теплообменники, электропроводящие шины, провода. В бытовых нуждах используется для изготовления рам окон, дверей, посуды.

Свойства алюминия и некоторых его сплавов приведены в табл.8.

Табл.8. Механические свойства алюминиевых сплавов

	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	НВ, МПа
Литой Al	50	45	150
АМц (1% Mn)	130	20	300
АМг6 (6% Mg)	340	20	700
Д16	440	18	1050
В95	600	8	1500
В96	700	7	1900

Легирование алюминия позволяет значительно повысить механические свойства. Так сплав АМг6, содержащий 6% примеси магния, имеет твердость и прочность 5-7 раз выше, чем у чистого алюминия. По механическим свойствам этот сплав близок к углеродистой стали, но легче его почти в 3 раза.

По соотношению прочности и плотности вычисляют удельная прочность материала:

$$\sigma_{уд} = \frac{\sigma_{\sigma}}{\rho \cdot g}, \quad (4.1)$$

где σ_{σ} – предел прочности, ρ – плотность материала, g – ускорение свободного падения.

Она имеет размерность длины. По этому параметру алюминиевые сплавы находятся на уровне высокопрочных легированных сталей $\sigma_{уд} = 23$ км (для легированных сталей $\sigma_{уд} = 27$ км).

Немецкий физик Альфред Вильм, живший в городе Дюрен, изучал свойства алюминиевого сплава легированного медью, магнием и марганцем. Для повышения прочности сплав закаляли, но опыты не давали желаемого результата. Помог случай. Однажды нерадивый лаборант не сделал вовремя измерений свойств образцов, просто забыв о них, и вернулся к измерениям только через неделю. Каково же было удивление ученых, когда обнаружили значительное увеличение прочности забытых образцов. Теперь этот процесс называют старением. А найденный сплав получил название дюралюминий, в честь родного города Вильма.

Теперь этот сплав широко применяется. В таблице приведены примеры свойств дюралюминия марки Д16, высокопрочного дюралюминия марок В95, В96. При очень высокой прочности эти сплавы сочетают легкость алюминия.

Другой сплав алюминия с кремнием называется силумин. Он даже легче чистого алюминия, его плотность $2,65 \text{ г/см}^3$. Это хороший литейный

сплав, из которого изготавливают корпуса насосов, компрессоров, картеры двигателей, теплообменники и пр.

4.3.3. Магний и его сплавы

Магний – сверхлегкий металл, легче алюминия, плотность $1,74 \text{ г/см}^3$, температура плавления $651 \text{ }^\circ\text{C}$. Химически чрезвычайно активен, при нагреве на воздухе воспламеняется и горит ослепительно белым пламенем, раньше использовался в качестве вспышки при фотографировании. В качестве конструкционных материалов используют сплавы магния. Сваривать его нельзя, поэтому из них делают несварные детали и обшивку для сверхлегких самолетов, гоночных машин, картеры двигателей, корпуса компрессоров, легкие фермы, челноки ткацких станков.

Свойства магниевых сплавов МА5, МЛ5 приведены в табл.9.

Табл.9. Механические свойства магниевых сплавов

	σ_B , МПа	δ , %	НВ, МПа
Магний (Mg)	120	8	300
МА5 (деформ., Al 8%)	320	14	
МЛ5 (литейный, Al 8%)	255	6	

4.3.4. Титан и его сплавы

Титан – тугоплавкий металл серого цвета, температурой плавления $t = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$, с высокой прочностью $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$ и пластичностью $\delta = 70\%$. При этом плотность его небольшая $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$, в результате удельная прочность титана оказывается рекордно большой $\sigma_{уд} = 30 \text{ км}$. Это позволяет

при изготовлении деталей из титана при равной прочности получать выигрыш по массе 40% по сравнению со сталью. К положительным качествам титана и его сплавов относятся хорошая обрабатываемость давлением, свариваемость, хладостойкость вплоть до абсолютного нуля температур. К отрицательным – плохо режется, низкая жаропрочность, интенсивно окисляется при температурах выше 600 °С.

Свойства титана и его сплавов приведены в табл.10.

Табл.10. Механические свойства титана и его сплавов.

Сплав	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа
Иодидный титан (примесей <0,1%)	300	60	1300
BT1-0 (титан технический, прим.<0,3%)	600	25	2070
BT16 (примесь Al 3%, Mo 4,5%)	1400	5	

• **Контрольные вопросы**

1. Какие металлы называют цветными? Приведите примеры.
2. Охарактеризуйте общие свойства медных сплавов.
3. Каковы свойства и области применения алюминиевых сплавов?
4. Каковы особенности магниевых сплавов?
5. Области применения алюминиевых сплавов?

4.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Неметаллическими материалами называют обширный класс веществ с неметаллическим типом химической связи между атомами, т.е. с ковалентной, ионной и поляризационной связями. По своим свойствам они кардинально отличаются от металлов, поэтому их выделяют в отдельную группу. По молекулярному строению они подразделяются на органические и неорганические материалы. К органическим материалам относятся

разнообразные пластмассы, резины, компаунды, дерево, к неорганическим – стекло, графит, оксиды металлов и др.

4.4.1. Химический состав

В качестве конструкционных материалов широко применяются органические полимеры. Органические полимеры – это вещества, молекулы которых состоят из длинной углеродной цепи к которой присоединены атомы водорода. Кроме того в этих веществах обычно содержатся кислород, азот, сера, фосфор, хлор. В их состав могут входить атомы других элементов: металлов, галогенов и пр. В этом случае материалы называют элементоорганическими.

Полимеры обладают рядом ценных свойств, которые обуславливают их все более широкое применение. Имеют достаточную прочность, жесткость, эластичность при низкой плотности и легкости. Как правило отличаются высокими диэлектрическими свойствами, химической стойкостью, стойкостью к коррозии и воздействию влаги. Являются хорошими тепло- и звуко- изоляторами. Есть полимеры со специальными свойствами: оптически прозрачные, антифрикционные, высокоэластичные и т. д.

Существенный недостаток большинства органических материалов – их горючесть. Но в последнее время созданы практически негорючие элементоорганические полимеры.

Важным достоинством полимеров является их технологичность, они легко формуются литьем, выдуванием, хорошо обрабатываются прессованием, вытяжкой, резанием. Это качество повышает экономичность и обуславливает широкое применения полимеров.

Рассмотрим подробнее

4.4.2. Структура полимеров

Полимеры – вещества, молекулы которых состоят из очень длинных цепочек атомов, называемых макромолекулами. Они состоят из многократно повторяющихся одинаковых звеньев – мономеров. Макромолекула может состоять от тысяч до миллионов атомов. Внутри молекулярной цепи атомы связаны весьма прочными ковалентными связями. Между собой молекулы связаны сравнительно слабыми поляризационными силами. За такого

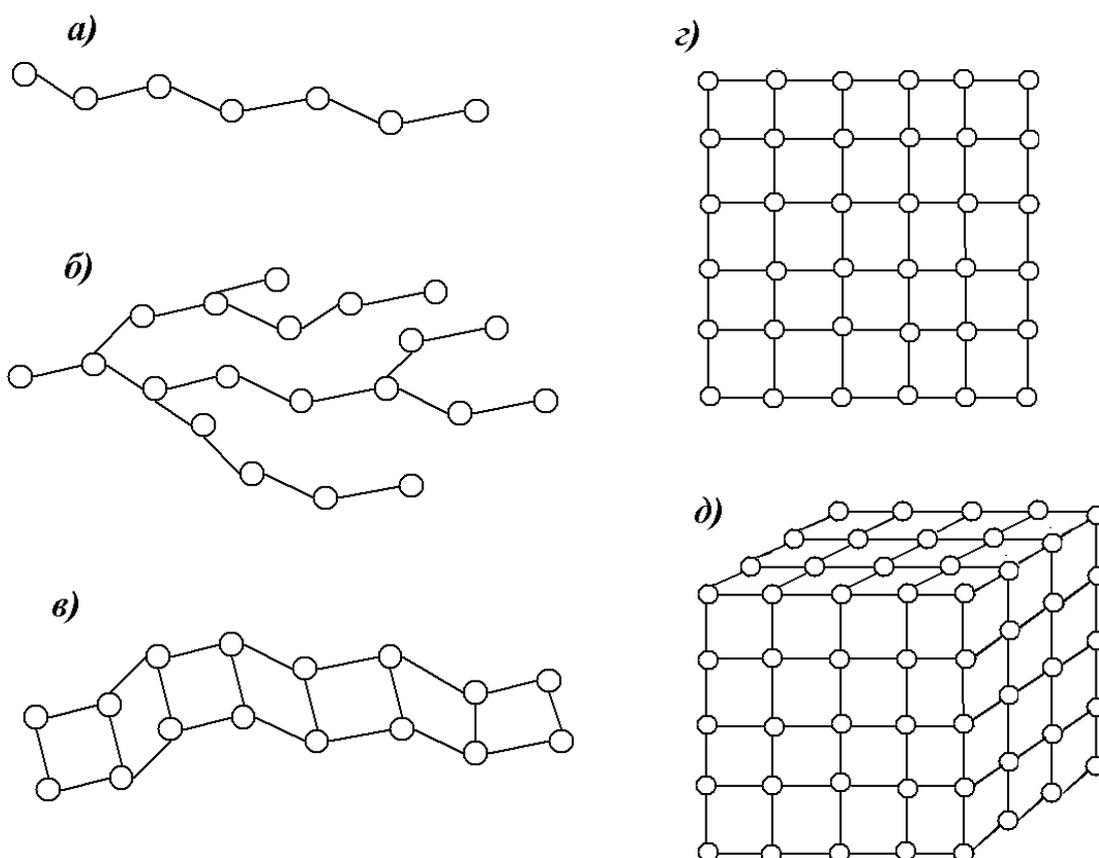


Рис.20. Структуры молекул полимеров:

а) линейная, б) разветвленная, в) ленточная, г) плоская, д) пространственная.

строения полимеров обладают малой плотностью и прочностью по сравнению с металлами, и многие легко плавятся при нагреве. Полимеры различают по структуре молекул (Рис.20.):

1. Линейные, молекулы которых образуют длинные линии, цепочки.
2. Разветвленные – молекулярная цепочка разветвляется, образует многочисленные ответвления, по строению напоминая дерево.

3. Ленточные – атомы образуют ленточную или лестничную структуру.
4. Плоские – атомы соединяются между собой в плоскости, образуя атомные слои.
5. Пространственные – атомы объединяются в пространственную структуру, наподобие атомов кристаллов.

Полимеры с линейной структурой легкоплавки, эластичны, мягкие, они как правило растворимы в органических жидкостях. Это происходит из-за того, что молекулы соседних цепочек достаточно легко могут скользить друг относительно друга. Разветвленная, ленточная или плоская структура молекул увеличивает прочность и теплостойкость материала. Полимеры с пространственной структурой обладают наибольшей твердостью и прочностью. Они стойки к нагреву и органическим растворителям.

По электрическим свойствам молекул полимеры делятся на полярные и неполярные.

Полярные имеют дипольные моменты молекул или групп атомов, которые способствуют поляризации в электрическом поле. Следующие атомные группы расположены в порядке возрастания полярности или дипольного момента:



В неполярных материалах молекулы не имеют дипольного момента.

Полярные полимеры имеют более высокие механические свойства, чем неполярные. Они обладают большей твердостью, механической прочностью и эластичностью, характеризуются хорошей химической стойкостью. Эти материалы притягивают влагу и полярные примеси, поэтому труднее поддаются очистке.

По электрическим свойствам неполярные полимеры – лучшие диэлектрики. Они имеют большее электрическое сопротивление, меньшие диэлектрические потери, чем полярные, могут работать при высоких и сверх-высоких частотах.

По отношению к нагреву полимеры подразделяются на термопластичные и термореактивные

Термопластичные полимеры при нагреве постепенно размягчаются и переходят сначала в вязкое состояние, а потом в жидкое. При охлаждении процесс протекает в обратном направлении вплоть до твердого состояния. Повторный нагрев переводит полимер снова в жидкое состояние.

В термореактивных полимерах при нагревании протекают химические реакции, которые приводят к образованию дополнительных связей между атомами. Вследствие этого свойства материала изменяются необратимо, он затвердевает и при повторном нагреве уже не размягчается. При сильном нагреве может обугливаться или разрушаться. В органических растворителях термореактивные полимеры как правило нерастворимы.

- **Термомеханическая кривая полимера**

Если термопластичный полимер подвергнуть постоянной механической нагрузке, то он будет деформироваться.

При низкой температуре полимер испытывает упругую деформацию на небольшую величину. При нагреве деформация будет увеличиваться. Чем выше температура – тем больше деформация. Таким образом получится график зависимости деформации от температуры, называемый термомеханической кривой полимера.

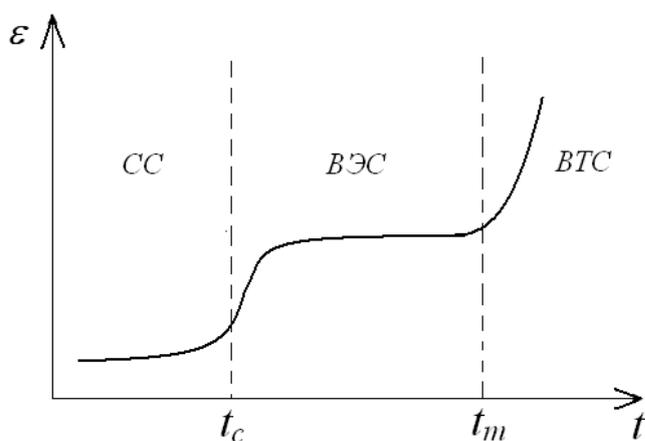


Рис.21. Термомеханическая кривая полимера.

На графике зависимости можно выделить три основных участка (Рис.21.), соответствующие разным состояниям полимера:

1. Стеклообразной состояние (*СС*) – на этом участке полимер деформируется на

небольшую величину и ведет себя как хрупкое тело, трескается при больших нагрузках.

2. Высокоэластичное состояние (ВЭС) – здесь деформация возрастает во много раз, полимер ведет себя как эластичное упругое тело.
3. Вязкотекучее состояние (ВТС). При дальнейшем увеличении температуры полимер постепенно размягчается, деформация может увеличиваться до бесконечности. Полимер ведет себя как вязкая жидкость.

Такая кривая типична для линейных полимеров и слабо разветвленных полимеров, которые не сшиты поперечными межатомными связями.

В состав полимеров часто добавляют компоненты, которые улучшают свойства материалов. Рассмотрим их вкратце.

1. Стабилизаторы

Полимеры – аморфные, термодинамически неустойчивые материалы, поэтому их свойства с течением времени изменяются. Ухудшается пластичность, возрастает твердость, появляется хрупкость и т.д. Такой процесс называют старением полимера. Для замедления старения в полимер добавляют специальные вещества, называемые стабилизаторами.

2. Наполнители – вещества добавляемые в полимерные композиции.

Например, порошковые наполнители: мел, каолин, оксиды TiO_2 , SiO_2 , древесная мука. Их доля может достигать десятков процентов. Их применяют для снижения стоимости материала, плотности, повышения прочности, упругости и пр. Можно придать специальные качества материалу несвойственные полимеру, например электропроводность, ферромагнетизм. Возможно повышение или понижение теплопроводности, снижение усадки, улучшение звукоизоляции и т. д.

3. Пластификаторы - вещества, добавляемые в полимерные материалы для повышения пластичности, эластичности, уменьшения хрупкости

при охлаждении или морозостойкости, для улучшения формуемости при прессовании, штамповке.

4. Специальные добавки

Например красители, для улучшения внешнего вида изделий. Иногда добавляют смазки, чтобы полимеры не прилипали к формирующему оборудованию.

Для материалов используемых в электротехнике применяют специальные добавки для снижения горючести или дугогасящие добавки. Эти вещества при нагреве выделяют газ, прекращающий или затрудняющий горение (фосфорнокислый аммоний, трехокись сурьмы, перхлорвинил и т. п.).

4.4.3. Свойства полимеров

Рассмотрим общие свойства некоторых распространенных полимерных материалов (Табл.11.).

- **Термопласты**

Полиэтилен – продукт полимеризации этилена, структура $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ один из самых распространенных полимеров, обладает достаточной прочностью, стойкостью к действию влаги, кислот, щелочей, хорошо обрабатывается, дешев. Хороший диэлектрик. Широко применяется для изготовления бытовых изделий, химической посуды, труб, используется как изоляционный материал в электротехнике.

Полипропилен– продукт полимеризации пропилена, структура $(-\text{C}_2\text{H}_4-\text{CH}_2-)_n$. За счет бокового ответвления молекулы прочнее полиэтилена, более термостоек. Однако химически менее стоек, быстрее стареет.

Полистирол – полимер со структурой $(-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-\text{CH}_2-)_n$, линейная цепочка с присоединенным бензольным кольцом. За счет громоздкого ответвления получается еще большая прочность материала. К недостаткам следует отнести невысокую нагревостойкость и склонность к растрескиванию.

Политетрафторэтилен (фторопласт или тефлон) – полимер со структурой этилена, в котором атомы водорода заменены на атомы фтора ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$)_n. Прочность связи С–F очень велика 450 кДж/моль. В результате такого замещения получился молочно белый, жирный на ощупь материал с замечательными свойствами. Он не горюч, не смачивается водой, химически чрезвычайно стоек, на него не действуют ни кислоты, ни щелочи, ни органические растворители. Его термостойкость рекордная для полимеров. Диэлектрические свойства фторопласта очень высоки и практически неизменны при нагреве и на высоких частотах. Его недостатком является холодная текучесть при механических нагрузках.

Поливинилхлорид – полимер со структурой ($-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$)_n. За счет сильно полярной связи с хлором, полимер полярный, что значительно увеличивает прочность материала. Из-за наличия хлора практически негорюч. Его изоляционные свойства вполне удовлетворительны в низкочастотных полях.

Табл.11. Механические свойства полимеров

Материал	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	t_{max} , °С
Термопласты		
Полиэтилен	10-20	80
Пилипропилен	26-38	100
Полистирол	40-60	70
Политетрафторэтилен (фторопласт)	20-40	250
Поливинилхлорид	80-160	80
Реактопласты		
Фенолформальдегидные смолы	15-35	200
Полиэфирные	40-70	100
Эпоксидные	30-70	160

Полимер с наполнителем		
Гетинакс (фенолформ. смола + наполнитель бумага)	60-70	120
Текстолит (х/б ткань)	70-100	100
Стеклотекстолит (стеклоткань)	200-600	200-400 (3000)
Пенопласт (газ)	□ = 20-300 кг/м ³	

- **Реактопласты**

Фенолформальдегидные смолы являются основой большого количества пластмасс, лаков и клеев. В результате нагрева происходит химическая реакция, и получается полимер бакелит. Сам по себе он хрупок, поэтому его применяют с наполнителями. Из таких пластмасс изготавливают корпуса приборов, педали, рукоятки, коллекторы электродвигателей, ролики и пр.

Эпоксидные смолы затвердевают при реакции со специальными добавками, называемыми отвердителями. Для этого не требуется нагрева, поэтому они стали незаменимыми материалами в качестве компаундов, заливочных масс.

4.4.4. Полимеры с наполнителями

Полимеры с наполнителями являются композиционными материалами, которые подробнее мы рассмотрим в следующих разделах. Здесь же приведем свойства некоторых из них.

Гетинакс состоит из слоев бумаги пропитанных и склеенных фенолформальдегидной смолой. Он обладает достаточной прочностью и хорошими электроизоляционными свойствами. Из него делают платы, панели, изоляционные прокладки, шайбы, каркасы катушек и др.

Текстолит состоит из слоев хлопчатобумажной ткани пропитанных и склеенных смолой. Обладает большей прочностью, чем гетинакс.

Применяется для изготовления тех же деталей. Кроме того из текстолита делают подшипники скольжения, и бесшумные скоростные шестеренки для редукторов, коробок передач, амортизационных прокладок для поглощения вибраций.

Стеклотекстолит получается так же как текстолит, но в качестве наполнителя берется стеклоткань. Вследствие чего резко повышаются механические и электрические свойства, возрастает нагревостойкость, снижается влагопоглощение.

Пенопласт – важная разновидность пластмасс, получаемая путем вспенивания и затвердевания полимера. Таким образом наполнителем является газ. Пенопласты являются самыми легкими конструкционными материалами, они радиопрозрачны, хорошие диэлектрики. Из них изготавливают обтекатели радиоантенн, тепло- и звуко- изоляционные перегородки в авиации, легкие конструкции в строительстве и упаковка в быту.

4.4.5. Эффективность применения полимеров

Современные полимерные материалы все шире применяются в технике из-за их высоких свойств и технологичности. Так например, для изготовления детали из металла требуется сделать отливку, отрезать, обточить, отшлифовать, термоотработать и т.д. Весь процесс может включать от 30 до 50 технологических операций. В случае изготовления детали из пластмассы зачастую достаточно одной операции формовки, после которой получается готовое изделие. В итоге трудоемкость изготовления снижается в 3-5 раз, стоимость деталей в 4-10 раз, масса в 4-5раз. Поэтому в настоящее время пластмассы составляют 10-25% веса самолетов и 20-50% веса ракет, и эта доля продолжает увеличиваться.

- ***Контрольные вопросы***

1. Каковы основные элементы, входящие в состав органических материалов?

2. Структура молекул полимеров?
3. Термомеханические кривые полимеров?
4. Приведите примеры термопластов?
5. Каковы характерные свойства реактопластов?
6. Цели использования наполнителей полимеров?
7. Перечислите преимущества при применении полимерных материалов.

4.5. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Примерами неорганических материалов являются графит, стекло, керамика, оксиды металлов и неметаллов и т.п. В их состав могут входит практически все элементы периодической системы Менделеева, и всевозможные их соединения. Среди положительных качеств неорганических материалов можно назвать тепло-, и химическую стойкость, высокую твердость и прочность, неорганические материалы обычно негорючи, многие огнеупорны, в отличие от органических материалов не подвержены старению. Но в то же время эти материалы, как правило, хрупкие, «боятся» резких скачков температур, довольно плотные и прочность на растяжение в несколько раз ниже прочности на сжатие. Рассмотрим подробнее свойства некоторых неорганических материалов.

4.5.1. Графит

Графит – это материал состоящий из атомов углерода С, которые образуют слоистый кристалл (Рис.22.). Четыре электрона на внешней оболочке углерода образуют три ковалентные связи и одну металлическую. Прочные ковалентные связи объединяют атомы в атомные плоскости. Вследствие этого прочность кристалла графита вдоль этих атомных плоскостей очень высокая. Между собой атомные плоскости связаны слабыми Ван-дер-ваальсовыми силами. Отсюда прочность графита

перпендикулярно атомным плоскостям весьма малая. Одна металлическая связь придает ему хорошую электропроводность.

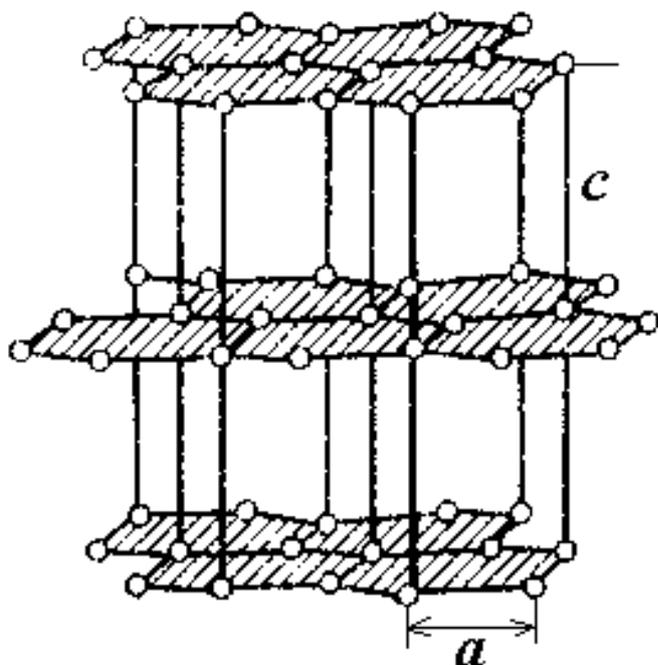


Рис.22. Строение кристалла графита.

$t_{пл} = 3700^{\circ}C$. Графит является абсолютным рекордсменом термостойкости среди всех существующих материалов. Слоистая структура графита и слабая связь между соседними плоскостями обуславливают анизотропию всех физических свойств кристаллов графита во взаимно перпендикулярных направлениях.

Графит встречается в природе в естественном виде, а также получается искусственным путем (технический и пиролитический графит). Потребительские качества природного графита невысоки, он содержит много примесей, порист, непрочен, его свойства почти изотропны. Используется только в качестве антифрикционного материала. Более чистый технический графит получают из нефтяного кокса и каменноугольного пека при нагреве до температуры $3000^{\circ}C$. Степень анизотропии его свойств достигает значения 3:1. Ещё более качественный графит получают в результате реакции пиролиза углеводородов (метана). Атомы углерода осаждаются на нагретых

Такое необычное строение кристалла приводит к очень интересным сочетаниям свойств графита. Он сильно анизотропен: длина ковалентной связи $a = 1,43 \text{ \AA}$, а расстояние между атомными плоскостями намного больше и составляет $c = 3,35 \text{ \AA}$. Вследствие прочности ковалентных связей температура плавления графита чрезвычайно высока

до температуры 2500⁰С поверхностях, изготовленных из технического графита или керамики. После охлаждения и кристаллизации получается пиролитический графит. В этом случае степень анизотропии свойств достигает значения 100:1 и более. Его свойства приведены в табл.12.

Табл.12. Свойства пиролитического графита

$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\sigma_{\epsilon}, \text{МПа}$				$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$		$\alpha, 10^{-6} 1/\text{К}$	
	Растяжение		Сжатие					
	\perp	//	\perp	//	\perp	//	\perp	//
2000–2200	–	120	470	120	2	370	24	0,023

где ρ – плотность, σ_{ϵ} – прочность, λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент теплового расширения.

Как видно, один и тот же материал обладает совершенно разными свойствами по разным направлениям. Например, если его сориентировать перпендикулярно атомным слоям, то это будет теплоизолятор, а если параллельно – теплопроводник.

Проводящие свойства графита используются при изготовлении из него щеток электродвигателей, генераторов. Теплостойкость – при изготовлении сильно нагреваемых деталей конструкций летательных аппаратов и их двигателей, в энергетических ядерных реакторах. Из-за малого коэффициента трения графит используют в качестве антифрикционного материала, твердой смазки, которая сохраняет свойства при высоких температурах и при сильном охлаждении. Прочные углеграфитовые волокна добавляют в качестве наполнителя в композиционные материалы.

4.5.2. Стекло

Стекло представляет собой затвердевший высоковязкий раствор оксидов кремния (Si), бора (B), фосфора (P) и других элементов. Кроме того для придания дополнительных качеств в состав стекла добавляют металлы и их

оксиды: Na, K, Al, Fe, Pb и др. Важнейшим отличительным качеством стекла является его прозрачность.

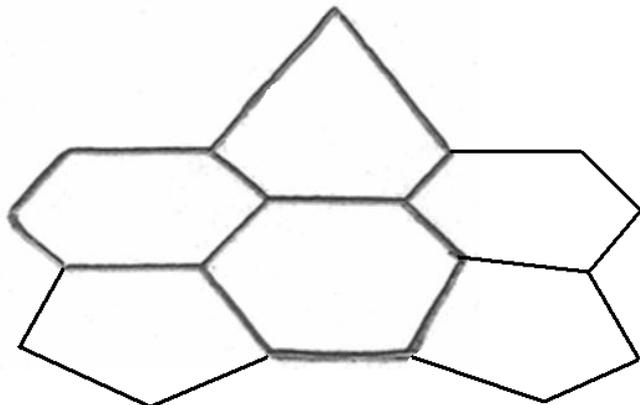


Рис.23. Нерегулярное строение стекла.

Стекло, в отличие от кристалла, имеет беспорядочную структуру, которую называют аморфным состоянием (Рис.23.). При нагреве стекло плавится не сразу, а постепенно, размягчаясь все больше и больше, вплоть до жидкого

состояния. Т.е. переход из твердого состояния в жидкое происходит в широком температурном интервале. При температуре ниже t_c , называемой температурой стеклования, аморфный материал ведёт себя как хрупкое твердое тело. При превышении температуры t_c стекло переходит в вязкое пластичное состояние. В таком состоянии проводят формовку стеклянных изделий на производстве. При дальнейшем повышении температуры выше t_p , называемой температурой размягчения, стекло уже переходит в жидкое состояние.

Обычное стекло, которое часто встречается в повседневной жизни, в основе состоит из оксида кремния (SiO_2), и поэтому называется силикатным стеклом. Рассмотрим его свойства. Для силикатного стекла температура стеклования $t_c = 400 - 600^\circ C$, температура размягчения $t_p = 600 - 800^\circ C$.

Стекло выпускают различное по химическому составу и по свойствам. В зависимости от назначения различают стекло техническое, строительное и бытовое. Технические стёкла идут на изготовление оптических приборов, линз, отражателей, подложек, химической лабораторной посуды, труб, светотехнических приборов и пр. Из строительного делают оконные стекла, витрины, стеклоблоки, облицовку. Из бытового стекла производят

всевозможную посуду, стеклотару, бытовые зеркала и пр. Механические свойства характерные для стёкол приведены в Табл.13.

Табл.13. Механические свойства стекол

$\rho, \text{кг/м}^3$	$\sigma_s, \text{МПа}$		Твердость по Моосу	$\alpha, 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$	Термостойкость, $^{\circ}\text{C}$
	Растяжение	Сжатие			
2200 – 6500	30-40	500-2000	5-7 (10 у алмаза)	9	90-170

Ввиду того, что прочность на растяжение сильно отличается от прочности на сжатие, изготавливают так называемое закаленное стекло. Закалка заключается в нагреве стекла до температуры выше температуры стеклования и последующем быстром и равномерном охлаждении в потоке воздуха или в масле. За счет закалки поверхностные слои испытывают сжимающие напряжения, из-за чего прочность стекла увеличивается в 3–6 раз. Его применяют например для изготовления стёкол автомобиля. Если лобовое стекло будет сделано из простого стекла, то при аварии стекло разобьется на крупные части и каждая из них острыми краями будет срезать все на своем пути. Если же поставить закаленное стекло, то при аварии оно распадается на мелкие осколки из-за больших напряжений на поверхности. В результате мелкие осколки нанесут намного меньше вреда. Сегодня при изготовлении лобовых стекол применяют два закаленных стекла, между которыми находится слой полимера, который не дает разлететься в разные стороны осколкам стекла. Такое безопасное стекло называют триплекс.

Производят стекло также в виде волокон – стекловата. Это отличный теплоизолятор, которые выдерживает нагрев до 400°C , не боится сырости и грызунов паразитов. Стекловату применяют для тепло– и шумо– изоляции кабин самолетов, кузовов автомобилей, железнодорожных вагонов, тепловозов, электровозов, ею теплоизолируют различные трубопроводы и т. д.

Стекло с добавками оксида свинца получается очень плотным 8000 кг/м^3 , оно не пропускает рентгеновское и γ -излучение. Из него делают смотровые окна для рентгеновских аппаратов, манипуляторов для работы с радиоактивными препаратами. Примесь оксида железа придает стеклу способность поглощать инфракрасное излучение, такое стекло необходимо для работы в горячих цехах, литейных и прокатных производствах.

Необычны свойства так называемого кварцевого стекла, которое состоит из чистого оксида кремния SiO_2 . Оно имеет аномально низкий коэффициент теплового расширения $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$. Вследствие этого кварцевое стекло обладает огромной термостойкостью. Под этим свойством подразумевают способность материала выдерживать перепады температуры при резком охлаждении в воду. Для большинства стекол это около 100°C , а у кварцевого $800\text{--}1000^\circ\text{C}$. Кроме того оно характеризуется высокой химической стойкостью, поэтому из него изготавливают лабораторную посуду, тигли для плавки металлов, формы для точного литья.

4.5.3. Ситаллы

Ситаллы получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной кристаллизации с помощью добавок катализаторов. В результате доля кристаллической фазы составляет $30\text{--}90\%$, размеры кристалликов $1\text{--}2 \text{ мкм}$). Термин ситаллы образован комбинацией слов: стекло и кристаллы. Еще их называют стеклокерамикой или пирокерамами.

Ситаллы подразделяют на фотоситаллы и термоситаллы. Фотоситаллы кристаллизуются под действием света. Они чувствительны к свету, соответственно, там, где произошло облучение, произойдет кристаллизация, а в других местах нет. Термоситаллы кристаллизуются под действием нагрева.

Механические свойства ситаллов весьма высоки (Табл.14.).

Табл.14. Свойства ситаллов.

$\rho, \text{кг/м}^3$	$\sigma_s, \text{МПа}$		Твердость, МПа	Жаропрочность, °С	$\alpha, 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$	Термостойкость, °С
	Растяжение	Сжатие				
2400-3000	110-160	700-2000	7000-10500	800-1200	0,7-12	500-900

Как видно из таблицы, плотность ситалла как у алюминиевых сплавов, твердость как у закаленной углеродистой стали, при этом он обладает высокой термостойкостью и химической стойкостью как у кварцевого стекла. Это прекрасный стабильный диэлектрик. Ввиду такого уникального сочетания свойств (очень легкий и при этом очень твердый и прочный) ситаллы находят всё более широкое применение.

Из ситаллов изготавливают обтекатели радиоантенн летательных аппаратов, лопасти воздушных компрессоров, сопла реактивных двигателей; подшипники, детали двигателей внутреннего сгорания, трубы для химической промышленности. Их используют в качестве жаростойких покрытий для защиты металлов от действия высоких температур и коррозии. Они применяются при изготовлении калибров, оснований точных приборов, подложек микросхем.

Фотоситаллы используют для изготовления фильер (пластины, в которых проделаны небольшие отверстия) для вытягивания синтетических волокон. Для этого на пластинке засвечиваются те участки, которые должны быть закристаллизованы. Соответственно те области, на которые не попал свет остаются в аморфном состоянии. Затем с помощью специальной жидкости–травителя растворяют аморфную фазу. В результате на очень твердой пластинке получают отверстия нужной формы и размера. Затем через эти отверстия выдавливают синтетическое волокно.

4.5.4. Керамика

Керамика — неорганический материал, получаемый путем обжига при высокой температуре 1200—2500°С. Первоначально керамикой называли обожженную глину, «керамикос» по гречески глиняный. Сейчас этот термин применяется к широкому кругу материалов с разнообразным химическим составом. В результате обжига или спекания формируется структура материала, состоящая из кристаллической и аморфной фазы, с газовыми включениями или порами. В результате изделия приобретает необходимые физико-механические свойства.

Кристаллическая фаза составляет основу керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других ее основных свойств.

Аморфная фаза в количестве 1—10 % находится в керамике в виде прослоек стекла, связывающих кристаллическую фазу. Стеклообразующие компоненты (или глинистые вещества) облегчают технологию изготовления изделий.

Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики. По количеству этой фазы керамику подразделяют на плотную и пористую. Наличие пор как правило нежелательно, так как снижается механическая прочность и другие свойства материала.

Большинство видов технической керамики обладает плотной спекшейся структурой поликристаллического строения.

По химическому составу керамику подразделяют на две большие группы: оксидная и бескислородная керамика.

- ***Керамика на основе оксидов***

В производстве оксидной керамики используют в основном следующие оксиды: Al_2O_3 (корунд), SiO_2 , ZrO_2 , MgO , CaO , BeO и др. Температура плавления чистых оксидов превышает 2000 °С, поэтому такую керамику относят к классу высокоогнеупоров. Оксиды химически стабильные

соединения не подверженные дальнейшему окислению при нагреве. Как и для других неорганических материалов, оксидная керамика обладает значительно большей прочностью при сжатии, по сравнению с прочностью при растяжении или изгибе.

Корундовая керамика (на основе Al_2O_3) обладает чрезвычайной прочностью, которая сохраняется при высоких температурах. По прочности корунд занимает второе место, уступая только алмазу. Керамика химически стойка, является отличным диэлектриком. Другие её свойства приведены в Табл.15.

Табл.15. Свойства корундовой керамики.

$\rho, \text{кг/м}^3$	$\sigma_s, \text{МПа}$	Твердость, HRA	Жаропрочность, °C
	Сжатие		
3940	5000	92	2200

Изделия из корундовой керамики широко применяют во многих областях техники. В электротехнике из неё изготавливают изоляторы, диэлектрические основания, платы. В машиностроении делают высокоскоростные резцы, калибры, фильеры для протяжки стальной проволоки, детали высокотемпературных печей, подшипники печных конвейеров, детали насосов, свечи зажигания в двигателях внутреннего сгорания и т.д.. Керамику с плотной структурой используют в вакуумной технике, пористую – как термоизоляционный материал. В корундовых тиглях проводят плавку металлов.

Керамика на основе оксида циркония (ZrO_2) может работать до температуры 2200°C, имеет малую теплопроводность. Она используется для изготовления огнеупорных тиглей для плавки металлов и сплавов, как тепловая изоляция печей, аппаратов и реакторов, в качестве теплозащитных покрытий металлов.

Керамика на основе оксида бериллия (BeO) напротив отличается высокой теплопроводностью, что сообщает ей высокую термостойкость. Прочность материала невысокая. Применяется для изготовления тиглей для плавки металлов, в качестве вакуумной керамики в ядерных реакторах.

- **Бескислородная керамика**

К тугоплавким бескислородным соединениям относятся соединения элементов с углеродом — карбиды, с бором — бориды, с азотом — нитриды, с кремнием — силициды и с серой — сульфиды. Эти соединения отличаются высокими огнеупорностью (2500—3500°C), твердостью (иногда как у алмаза), износостойкостью и химической стойкостью по отношению к агрессивным средам. Их недостатком является хрупкость. Сопротивление окислению при высоких температурах карбидов и боридов составляет 900—1000°C, несколько ниже оно у нитридов. Силициды могут выдерживать температуру 1300—1700°C.

Карбиды. Широкое применение получила керамика из **карбида кремния — карборунд (SiC)**. Он обладает полупроводниковыми свойствами, высокой жаростойкостью до 1600°C, твердостью, устойчивостью к кислотам. При подключении к нему электрического напряжения, протекает значительный ток, и материал греется. Этот эффект используют для изготовления нагревательных стержней из карбокорунда.

Карбид бора B₄C легкий и прочный материал, используется как керамическая броня для бронежилетов. Слой 6 мм по эффективности защиты заменяет 10 мм металлической брони, при этом сам жилет становится в 4 раза легче.

Силициды тоже полупроводники, отличаются окалиностойкостью, стойкостью к действию кислот и щелочей. Например, **дисилицид молибдена MoSi₂** используется в качестве электронагревателя в печах, который стабильно работает в течение нескольких тысяч часов при температуре 1700°C. Из такой керамики изготавливают лопатки газовых турбин, сопло-

вые вкладыши реактивных двигателей; её применяют для защитных покрытий тугоплавких металлов от окисления при высоких температурах.

Бориды. Эти соединения обладают металлическими свойствами, их электропроводность очень высокая. Они износостойки, тверды, стойки к окислению. В технике получили распространение дибориды тугоплавких металлов (TiB_2 , ZrB_2 и др.). **Диборид циркония** стоек в расплавах алюминия, меди, чугуна, стали и др. Его используют для изготовления термопар, работающих при температуре свыше $2000^\circ C$ в агрессивной среде. Покрытия из боридов сильно повышают твердость, химическую стойкость и износостойкость изделий.

Нитриды. Неметаллические нитриды являются огнеупорными материалами, имеют низкие теплопроводность и электропроводность. Так **нитрид бор (эльбор)** очень твердый и прочный материал, это заменитель алмаза. Но алмаз стоек к окислению при нагреве до $800^\circ C$, а эльбор – до $2000^\circ C$. Другой материал **нитрид кремния Si_3N_4** устойчив к окислению до $1600^\circ C$, очень прочен, обладает малой плотностью. Этот материал рекордсмен по удельной прочности при высоких температурах. При этом он в несколько раз дешевле жаропрочных металлических сплавов. Из него изготавливают керамические детали для двигателей внутреннего сгорания работающие в условиях нагрева: поршни и цилиндры.

• **Контрольные вопросы**

1. Приведите примеры неорганических материалов.
2. Каков химический основной химический состав силикатного стекла?
3. Свойства стекла?
4. Что такое ситаллы?
5. Какие материалы называют керамикой?
6. Каков фазовый состав керамики?

4.6. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционными называют материалами, состоящие из двух (и более) материалов. При таком сочетании возможно совмещение положительных качеств каждого составляющего, и получение нового материала с улучшенными прочностными свойствами. Композиционные материалы (КМ) состоят из матрицы (или связующего) и упрочняющего (или армирующего) материала. В зависимости от рода входящих в состав материалов различают металлические и неметаллические композиционные материалы. По способу упрочнения подразделяют дисперсноупрочненные и волокнистые КМ.

4.6.1. Дисперсноупрочнённые композиционные материалы

В дисперсноупрочненные КМ состоят из основного материала (матрицы) и вкрапленных в неё мелких частиц 10–500 нм (Рис.58.). Матрица несет основную нагрузку, а дисперсные частицы затрудняют движение дислокаций. Для достижения высокой прочности частицы должны быть равномерно распределены по матрице. В качестве дисперсных частиц используют тугоплавкие нерастворимые оксиды металлов в количестве 5–10% от массы.

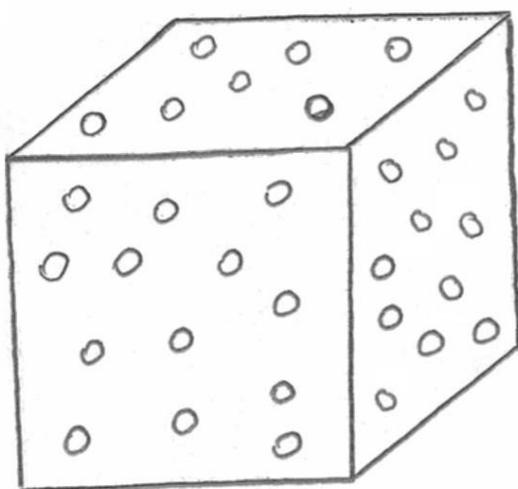


Рис.24. Дисперсноупрочнённые композиционные материалы.

У металлических КМ предел за счет упрочнения прочность повышается на 50-100% , увеличиваются модуль, упругости и жесткость, жаропрочность приближается вплотную к температуре плавления $0,9-0,95 t_{пл}$. Снижается вероятность трещинообразования, практически устраняется склонность к внезапному хрупкому разрушению,

т.к. трещины активно тормозятся дисперсными частицами. Это важное положительное качество композиционных материалов.

В качестве примера рассмотрим широко применяемый спеченный алюминиевый порошок САП.

Он изготавливается из алюминиевого порошка, который спекается при высокой температуре под давлением. Частицы порошка алюминия покрыты тонким слоем прочного тугоплавкого оксида Al_2O_3 . При прессовании и спекании пленки разламывается на кусочки и распределяется по алюминиевой матрице. Получается дисперсноупрочненный КМ.

САП обладает следующими свойствами.

- 1) предел прочности $\sigma = 400$ МПа
- 2) пластичность около 3%
- 3) прочность при высоких температурах (250–500 °С) 50 МПа.

САП материал легкий, как алюминий $\rho = 2700$ кг/см³, у него прочность при температурах 250–500 °С, как у титана и сталей. Т.е. он сочетает легкость и высокую прочность. По этим свойствам он заменяет титан при температурах до 500 °С, а по стоимости он намного дешевле его.

Другой пример КМ на основе никеля, который упрочняется тугоплавкими частицами оксида тория или оксида гафния. Получается очень хороший жаропрочный и коррозионностойкий материал сохраняющий высокие свойства до температуры $t_{\text{раб}} = 1200$ °С.

4.6.2. Волокнистые композиционные материалы

Волокнистые композиционные материалы представляют собой относительно мягкую матрицу, которая связывает прочные волокна (Рис.25.). Основную механическую нагрузку несут волокна, а матрица равномерно распределяет её. Упрочняющие (или армирующие) волокна могут быть диаметром $d = 10$ нм – 100 мкм, как длинные, так и короткие. Если отношение длины волокон к диаметру $(l/d) = 10 - 1000$, то такие волокна называются дискретными. Если $(l/d) > 1000$, то такие волокна называют непрерывными. В процентном содержании волокна могут составлять 20–80% массы материала.

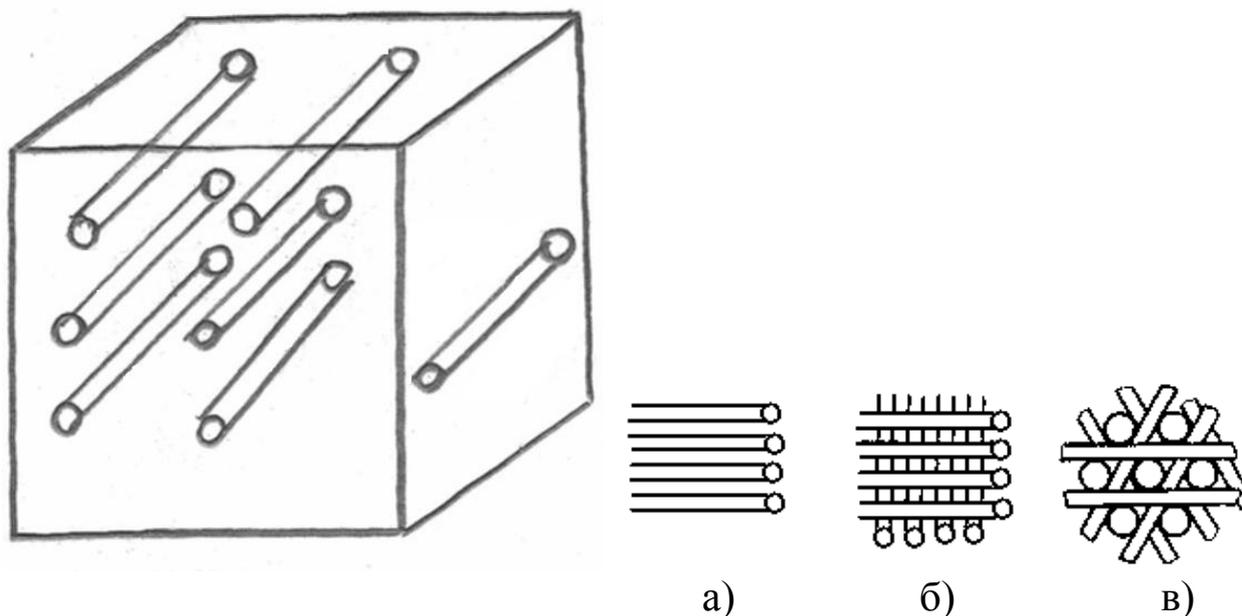


Рис.25. Волокнистые композиционные материалы и способы укладки волокон:
 а – однонаправленная, б – сотканная, в – объёмная.

В зависимости от способа укладки волокон различают структуры композиционных материалы:

1. Однонаправленные – волокна укладываются вдоль одного направления.
2. Сотканые – волокна уложены перекрестно в двух направлениях, как в ткани..
3. Объемные –пространственная укладка волокон. Волокна сшиваются в объёмную структуру в трёх и более направлениях.

Сотканые и слоистые материалы анизотропны, прочность вдоль слоев волокон заметно больше, чем в поперечном направлении. Наибольшей прочностью обладают материалы с объемной структурой. Они почти изотропные, т.е. в разных направлениях свойства одинаковы.

В качестве армирующих волокон используются сверхпрочные борные волокна, углеродные, карбидные, нитридные, оксидные и т.д. Из

металлических материалов для армирования применяют проволоку из вольфрама, молибдена, углеродистой стали.

В качестве матрицы используются как металлы, так и не металлы, органические и не органические соединения – все подряд. При этом материалы выбираются таким образом, чтобы комбинировать и получить определенные сочетания положительных свойств матрицы и армирующих соединений.

Рассмотрим примеры волокнистых КМ композиционных материалов.

- ***Бор – алюминий***

Алюминиевая матрица . Алюминий мягкий материал. Борные волокна – это прочный материал, но хрупкий. В сочетании эти два материала дают вязкий и прочный композиционный материал. С пределом прочности $\sigma_B = 1300$ МПа. Т.е. по прочности как легированная сталь, по весу как алюминий.

- ***Алюминий – сталь***

Алюминиевая матрица. Стальные волокна. Обладает пределом прочности $\sigma_B = 1600$ МПа. Т.е. прочность ещё выше, но значительно легче стали.

- ***Никель-вольфрам***

Никель – матрица, вольфрамовая нить – армирующий материал. Это жаростойкий материал. Имеет прочность $\sigma_B = 700$ МПа. Высокая прочность при высоких температурах.

- ***Углепласт***

Углеродные волокна , которые пропитываются связующим – полимерной смолой.

После полимеризации смолы получается сверхпрочный материал углепласт $\sigma_B = 1000$ МПа. При этом он чрезвычайно легкий $\rho = 1500$ кг/см³,

легче алюминия, сохраняет прочность при кратковременном нагреве до температуры 2200 °С .

- ***Борноволокнистые материалы***

Для армирования используют борные волокна. Такой КМ обладают еще большей прочностью $\sigma_b = 1300$ МПа, легкий $\rho = 2000$ кг/см³, выдерживает длительный нагрев до температуры $t_{раб} = 300$ °С.

Композиционные материалы благодаря своим уникальным свойствам все более широко используется в самых разнообразных областях. Это современные перспективные материалы, которые востребованы в первую очередь авиационной, автомобильной , ракетной технике. Их стоимость снижается и потому они все шире и чаще используются для изготовления легких конструкций и деталей в строительстве, машиностроении, бытовой техники и т.д..

- ***Контрольные вопросы***

1. Какие материалы называют композиционными?
2. Строение дисперсноупрочнёных композиционных материалов.
3. Принципы упрочнения волокнистых материалов.
4. Способы укладки волокон.
5. Преимущества композиционных материалов?
6. Приведите примеры композиционных материалов.

Список литературы

1. ЭБС Книгофонд: Материаловедение и технология материалов: Учебное пособие / под общей ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина.- М: изд-во МГОУ, 2010.-324с.
2. ЭБС Книгофонд: Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: Учебник для вузов. - М: Химиздат, 2007.- 783 с.
3. ЭБС Книгофонд: Земсков Ю.П., Ткаченко Ю.С., Лихачёва Л.Б., Квашнин Б.Н. Материаловедение: учебное пособие // - Изд-во: ВГУИТ, 2013.-199 с.
4. Вернер А.К., Курбатова И.А., Парфеновская О.А. Технология конструкционных материалов: курс лекций, - М.: МГИУ, 2006
5. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: уч. пособие, М.: Высшая школа,2004
6. Гончаров Ю.И., Малькова М.Ю. Геология, минералология, петрография. Спр. Руководство.- М.: Издательство АСВ,2008

Подписано в печать 24.07.18. Формат 84x108/32
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Бумага мелованная. Усл. Печ. л. – 3,99.
Тираж 50 экз.

Издательство Современный технический университет
390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.
(4912) 300630, 30 08 30