

## Введение

Материаловедение относится к числу основополагающих дисциплин для машиностроительных специальностей. Это связано с тем, что получение, разработка новых материалов, способы их обработки являются основой современного производства и во многом определяют уровень своего развития научно-технический и экономический потенциал страны. Проектирование рациональных, конкурентноспособных изделий, организация их производства невозможны без достаточного уровня знаний в области материаловедения.

Материаловедение является основой для изучения многих специальных дисциплин.

Разнообразие свойств материалов является главным фактором, предопределяющим их широкое применение в технике. Материалы обладают отличающимися друг от друга свойствами, причем каждое зависит от особенностей внутреннего строения материала. В связи с этим материаловедение как наука занимается изучением строения материала в тесной связи с их свойствами. Основные свойства материалов можно подразделить на физические, механические, технологические и эксплуатационные.

От физических и механических свойств зависят технологические и эксплуатационные свойства материалов.

Среди механических свойств прочность занимает особое место, так как прежде всего от нее зависит неразрушаемость изделий под воздействием эксплуатационных нагрузок. Учение о прочности и разрушении является одной из важнейших составных частей материаловедения. Оно является теоретической основой для выбора подходящих конструкционных материалов для деталей различного целевого назначения и поиска рациональных способов формирования в них требуемых прочностных свойств для обеспечения надежности и долговечности изделий.

Основными материалами, используемыми в машиностроении, являются и еще долго будут оставаться металлы и их сплавы. Поэтому основной частью материаловедения является металловедение, в развитии которого, ведущую роль сыграли российские ученые: Аносов П.П., Чернов Д.К., Курнаков Н.С., Гуляев А.П. и другие.

В настоящих лекциях рассмотрены физические основы строения и свойств конструкционных материалов, приводятся широко используемые методы определения механических свойств материалов при различных видах нагружения, излагаются основы термической обработки и поверхностного упрочнения деталей, даются характеристики основных групп конструкционных материалов.

## Элементы кристаллографии

Почти все металлы – поликристаллические вещества, состоящие из отдельных мелких кристаллов.

Кристалл – атомная структура, состоящая из атомов, зафиксированных друг относительно друга. Места расположения атомов – узлы кристаллической решетки. Особенность кристаллов – упорядоченное строение.

Ячейка кристаллической решетки – группа атомов, упорядоченно расположенных друг относительно друга и периодически повторяющихся в кристалле по всем направлениям. В зависимости от расположения атомов в ячейке различают различные типы кристаллических решеток. Всего типов решеток – 14.

Плотность упаковки атомов в решетке определяется полным числом атомов, находящихся внутри объемного тела, образованного плоскостями, проходящими через центры внешних атомов ячейки

### Основные типы решеток:

ОЦК - объемно-центрированная кубическая (хром, вольфрам, молибден)

ГЦК - гранецентрированная кубическая (алюминий, медь, никель)

ГПУ - гексагональная плотноупакованная (магний, цинк).

Твердые тела делят на кристаллические и аморфные. Кристаллические тела при нагреве остаются твердыми до определенной температуры (температуры плавления), при которой они переходят в жидкое состояние. Аморфные тела при нагреве размягчаются в большом температурном интервале; сначала они становятся вязкими и лишь затем переходят в жидкое состояние.

Все металлы и их сплавы - тела кристаллические. Металлами называют химические элементы, характерными признаками которых являются непрозрачность, блеск, хорошая электро- и теплопроводность, пластичность, а для многих металлов также способность свариваться. Не потеряло своего научного значения определение металлов, данное более 200 лет назад великим русским ученым М. В. Ломоносовым: "Металлы суть светлые тела, которые ковать можно". Для металлов характерно то, что, вступая в химические реакции с элементами, являющимися неметаллами, они отдают последним свои внешние валентные электроны. Это объясняется тем, что у атомов металла внешние электроны непрочно связаны с его ядром. Металлы имеют на наружных оболочках всего 1 -2 электрона, тогда как у неметаллов таких электронов много (5-8).

Чистые химические элементы металлов (например, железо, медь, алюминий и др.) могут образовывать более сложные вещества, в состав которых могут входить несколько элементов-металлов, часто с примесью заметных количеств элементов-неметаллов. Такие вещества называются металлическими сплавами. Простые вещества, образующие сплав, называют компонентами сплава.

Для описания кристаллической структуры металлов пользуются понятием кристаллической решетки. Кристаллическая решетка- это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие металл. Частицы вещества (ионы, атомы), из которых построен кристалл, расположены в определенном

геометрическом порядке, который периодически повторяется в пространстве. В отличие от кристаллов в аморфных телах (стекло, пластмассы) атомы располагаются в пространстве беспорядочно, хаотично.

Формирование кристаллической решетки в металле происходит следующим образом. При переходе металла из жидкого в твердое состояние расстояние между атомами сокращается, а силы взаимодействия между ними возрастают. Характер взаимодействия атомов определяется строением их внешних электронных оболочек. При сближении атомов электроны, находящиеся на внешних оболочках теряют связь со своими атомами вследствие отрыва валентного электрона одного атома положительно заряженным ядром другого и т. д. Происходит образование свободных электронов, так как они не принадлежат отдельным атомам. Таким образом, в твердом состоянии металл представляет собой структуру, состоящую из положительно заряженных ионов, омываемых свободными электронами.

Связь в металле осуществляется электростатическими силами. Между ионами и свободными электронами возникают электростатические силы притяжения, которые стягивают ионы. Такую связь между частицами металла называют металлической.

Силы связи в металлах определяются силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами. Ионы находятся на таком расстоянии один от другого, при котором потенциальная энергия взаимодействия минимальна. В металле ионы располагаются в определенном порядке, образуя кристаллическую решетку. Такое расположение ионов обеспечивает взаимодействие их с валентными электронами, которые связывают ионы в кристаллической решетке.

### **Анизотропия кристаллов**

Неодинаковость физических свойств среды в разных направлениях называют анизотропией. Анизотропия кристаллов обусловлена различием плотности упаковки атомов в решетке в различных направлениях. Все кристаллы анизотропны, аморфные тела (стекло, смола) изотропны, т. е. имеют одинаковую плотность атомов в различных направлениях.

Анизотропия свойств важна при использовании монокристаллов— одиночных кристаллов, частицы которых расположены единообразно по всему их объему. Монокристаллы имеют правильную кристаллическую огранку (в форме естественных многогранников), анизотропны по механическим, электрическим и другим физическим свойствам. Так, для монокристалла меди предел прочности  $\sigma_B$  изменяется от 120 до 360 МПа в зависимости от направления приложения нагрузки.

Металлы и сплавы, применяемые в технике, обычно имеют поликристаллическую структуру, т. е. состоят из множества мелких и различно ориентированных кристаллов, не имеющих правильной кристаллической огранки и называемых кристаллитами (или зернами). В каждом зерне поликристалла наблюдается анизотропия. Однако вследствие разнообразной, беспорядочной ориентировки кристаллографических плоскостей в различных зернах поликристалл может иметь одинаковые свойства по разным направлениям и не обнаруживать анизотропию (когда размеры зерен значительно меньше размеров поликристалла и количество их весьма велико). Это обстоятельство во многих случаях позволяет рассматривать поликристаллическое тело как подобное изотропному, несмотря на анизотропию свойств отдельных составляющих его зерен.

## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

### Кристаллизация металлов.

Процесс образования в металлах кристаллической решетки называется кристаллизацией. Для изучения процесса кристаллизации строят кривые охлаждения металлов, которые показывают изменение температуры ( $t$ ) во времени ( $\tau$ ). (рис.) Затвердевание аморфного вещества происходит постепенно, без резкой границы между жидким и тв. состоянием. На кривой охлаждения кристаллического вещества имеется участок с  $t_{кр}$ , называемой температурой кристаллизации. Наличие этого участка говорит о том, что процесс сопровождается выделением теплоты кристаллизации. Длина горизонтального участка – это время кристаллизации.

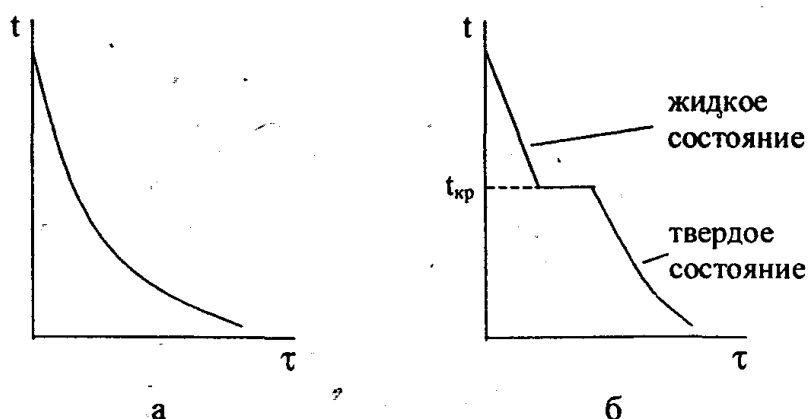
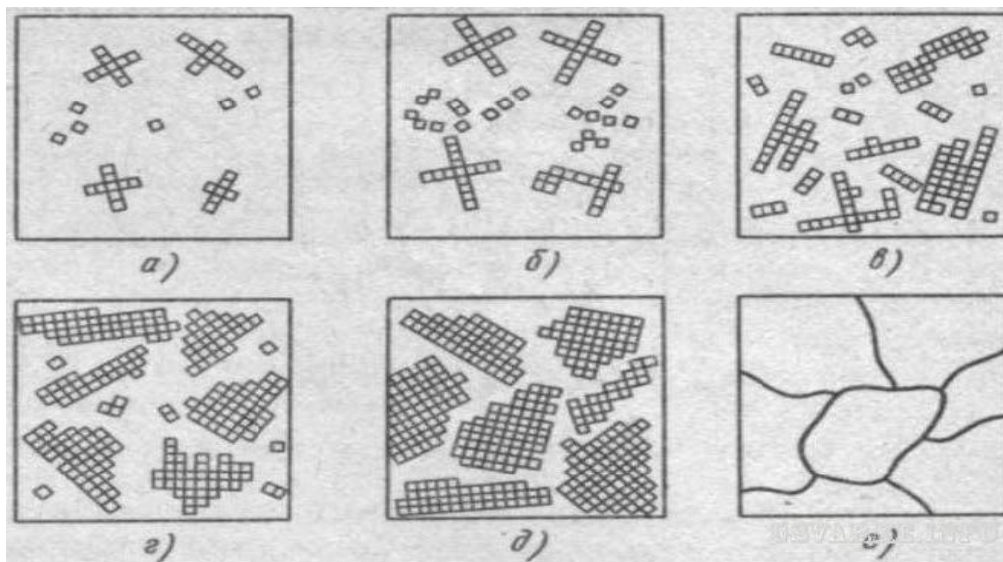


Рис. 3. Кривые охлаждения аморфного и кристаллического тел.

Кристаллизация металла происходит постепенно. Она объединяет 2 процесса одновременно: возникновение центров кристаллизации и рост кристаллов. После окончания кристаллизации образуются кристаллы неправильной формы, которые называются зернами или кристаллитами.



## Полиморфизм (аллотропия).

Некоторые металлы в зависимости от температуры могут существовать в различных кристаллических формах. Это явление называется полиморфизм или аллотропия. Процесс перехода одной кристаллической формы к другой наз. полиморфным превращением.

Полиморфные модификации обозначают строчными греческими буквами  $\alpha, \beta, \gamma$  и т.д. Полиморфизм характерен для железа, олова, кобальта, титана и некоторых других металлов.

Важное значение имеет полиморфизм железа. (рис.5)

Полиморфные превращения характеризуются горизонтальными участками на кривой охлаждения, т.к. при них происходит полная перекристаллизация металла. До  $911^\circ\text{C}$  устойчиво  $\text{Fe}_\alpha$ , имеющее ОЦК решетку.

В интервале температур  $911 - 1392^\circ\text{C}$  существует  $\text{Fe}_\gamma$  с ГЦК решеткой.

При  $1392 - 1539^\circ\text{C}$  вновь устойчиво  $\text{Fe}_\alpha$ .

Остановка на кривой при  $768^\circ\text{C}$  связана не с полиморфным превращением, а с изменением магнитных свойств. До  $768^\circ\text{C}$  железо магнитно, а выше – немагнитно.

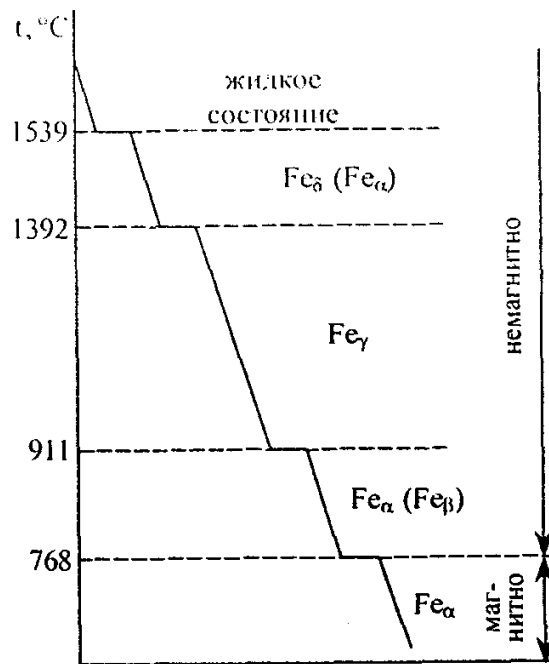


Рис. 5. Кривая охлаждения железа.

## Свойства и методы испытаний

Основная цель: изучить внутренние строения конструкционных материалов и определить связи строения с механическим, физическим свойствами и химическим составом.

Конструкционные материалы – материалы для изготовления деталей машин и механизмов, обеспечивающие механическую прочность деталей под действием нагрузки.

Выделяют статические (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, температурные воздействия) и динамические (вибрация, удар) нагрузки.

Деталь должна сохранять форму, размеры, не разрушаться. Основным материалом для изготовления деталей – металл.

К металлам относят вещества, у которых при повышении температуры увеличивается сопротивление.

Основные признаки:

- наличие кристаллической решетки в твердом состоянии
- высокая тепло- и электропроводность
- способность к упругому и пластичному деформированию

Косвенные признаки: металлический блеск.

.

Методы изучения строения металлов. Изучение строения металлов и сплавов производится методами макро- и микроанализа, рентгеновского, а также дефектоскопии (рентгеновской, магнитной, ультразвуковой). Методом макроанализа изучается макроструктура, т.е. структура, видимая невооруженным глазом или с помощью лупы, при этом выявляются крупные дефекты: трещины, усадочные раковины, газовые пузыри и т. д., а также неравномерность распределения примесей в металле. Макроструктуру определяют по изломам металла, по макрошлифам. Макрошлиф — это образец металла или сплава, одна из сторон которого отшлифована, тщательно обезжирена, протравлена и рассматривается с помощью лупы с увеличением в 5—10х.

Микроанализ выявляет структуру металла или сплава по микрошлифам, приготовленным так же, как и для макроанализа, но дополнительно отполированным до зеркального блеска. Шлифы рассматриваются в отраженном свете под оптическим микроскопом при увеличении до 3000х. Из-за различной ориентировки зерен металла они травятся не в одинаковой степени и под микроскопом свет также отражается неодинаково. Границы зерен, благодаря примесям, травятся сильнее, чем основной металл, и выявляются более рельефно. В сплаве структурные составляющие травятся также различно.

В электронном микроскопе рассматривают реплику — слепок с особо тонкой структуры металла при увеличениях до 100 000х. Этот важнейший анализ определяет размеры и форму зерен, структурные составляющие, неметаллические включения и их характер — трещины, пористость и т. д., качество термической обработки. Зная микроструктуру, можно объяснить причины изменения свойств металла.

С помощью рентгеновского анализа изучают атомную структуру металлов, типы и параметры кристаллических решеток, а также дефекты, лежащие в глубине. Этот анализ, основанный на дифракции рентгеновских лучей рядами атомов кристаллической решетки, позволяет обнаружить дефекты (пористость, трещины, газовые пузыри, шлаковые включения и т. д.), не разрушая металла. В местах дефектов рентгеновские лучи поглощаются меньше, чем в сплошном металле, и поэтому на фотопленке такие лучи образуют темные пятна, соответствующие форме дефекта.

Для исследования структуры металла и дефектов изделий широко применяют гамма-лучи, которые проникают в изделие на большую глубину, чем рентгеновские.

Магнитным методом исследуют дефекты в магнитных металлах (сталь, никель и др.) на глубине до 2 мм (трещины различного происхождения, неметаллические включения и т. д.). Для этого испытуемое изделие намагничивают, покрывают его поверхность порошком железа; осматривают его поверхность и размагничивают изделие. Вокруг дефекта образуется неоднородное поле, вследствие чего магнитный порошок повторяет очертания дефекта. Другой метод - магнитный индукционный - часто используют для оценки полноты структурных превращений в сплавах (изделиях) после их термической обработки.

Ультразвуковым методом осуществляется эффективный контроль качества металла изделий и заготовок практически любых размеров. В импульсных ультразвуковых дефектоскопах ультразвуковая волна от щупа-излучателя распространяется в контролируемом изделии и при встрече с каким-либо дефектом отражается от него. При этом отраженные волны принимаются, усиливаются и передаются на показывающий индикатор. Ультразвук используют для контроля качества роторов, рельсов, поковок, проката и других изделий при необходимости сохранения целостности изделий.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Физические свойства. К физическим свойствам металлов относят цвет, плотность, температуру плавления, теплопроводность, тепловое расширение, теплоемкость, электропроводность, магнитные свойства и др.

Цветом называют способность металлов отражать световое излучение с определенной длиной волны. Например, медь имеет розово-красный цвет, алюминий - серебристо-белый.

Плотность металла характеризуется его массой, заключенной в единице объема. По плотности все металлы делят на легкие (менее 4500 кг/м<sup>3</sup>) и тяжелые. Плотность имеет большое значение при создании различных изделий. Например, в самолето- и ракетостроении стремятся использовать более легкие металлы и сплавы (алюминиевые, магниевые, титановые), что способствует снижению массы изделий.

Температурой плавления называют температуру, при которой металл переходит из твердого состояния в жидкое. По температуре плавления различают тугоплавкие металлы (вольфрам 3416°C, тантал 2950°C, титан 1725°C и др.) и легкоплавкие (олово 232°C, свинец 327°C, цинк 419,5°C, алюминий 660°C). Температура плавления имеет большое значение при выборе металлов для изготовления литых изделий, сварных и паяных соединений, термоэлектрических приборов и других изделий. В системе СИ температуру плавления выражают в градусах Кельвина (К).

Теплопроводностью называют способность металлов передавать тепло от более нагретых к менее нагретым участкам тела. Серебро, медь, алюминий обладают большой теплопроводностью. Железо имеет теплопроводность примерно в три раза меньше, чем алюминий, и в пять раз меньше, чем медь. Теплопроводность имеет большое значение при выборе металла для деталей. Например, если металл плохо проводит тепло, то при нагреве и быстром охлаждении (термическая обработка, сварка) в нем образуются трещины. Некоторые детали машин (поршни двигателей, лопатки турбин) должны быть изготовлены из материалов с хорошей теплопроводностью. В системе СИ теплопроводность имеет размерность Вт/(м • К).

Тепловым расширением называют способность металлов увеличиваться в размерах при нагревании и уменьшаться при охлаждении. Тепловое расширение характеризуется коэффициентом линейного расширения  $\alpha = (l_2 - l_1) / [l_1(t_2 - t_1)]$ , где  $l_1$  и  $l_2$  длины тела при температурах  $t_1$  и  $t_2$ . Коэффициент объемного расширения равен  $3\alpha$ . Тепловые расширения должны учитываться при сварке, ковке и горячей объемной штамповке, изготовлении литейных форм, штампов, прокатных валков, калибров, выполнении точных соединений и сборке приборов, при строительстве мостовых ферм, укладке железнодорожных рельсов.

Теплоемкостью называют способность металла при нагревании поглощать определенное количество тепла. В системе СИ имеет размерность Дж/К. Теплоемкость различных металлов сравнивают по величине удельной теплоемкости — количеству тепла, выраженному в больших калориях, которое требуется для повышения температуры 1 кг металла на 1°C (в системе СИ — Дж/(кгК)).

Способность металлов проводить электрический ток оценивают двумя взаимно противоположными характеристиками — электропроводностью и электросопротивлением. Электрическая проводимость оценивается в системе СИ в сименсах (См), а удельная электропроводимость — в См/м, аналогично электросопротивление выражают в омах (Ом), а удельное электросопротивление — в Ом/м. Хорошая электропроводимость необходима, например, для токонесущих проводов (медь, алюминий). При изготовлении электронагревательных приборов и печей необходимы сплавы с высоким электросопротивлением (нихром, константан, манганин). С повышением температуры металла его электропроводимость уменьшается, а с понижением — увеличивается.

Магнитные свойства характеризуются абсолютной магнитной проницаемостью или магнитной постоянной, т. е. способностью металлов намагничиваться. В системе СИ магнитная постоянная имеет размерность Гн/м. Высокими магнитными свойствами обладают железо, никель, кобальт и их сплавы, называемые ферромагнитными. Материалы с магнитными свойствами применяют в электротехнической аппаратуре и для изготовления магнитов.

Химические свойства. Химические свойства характеризуют способность металлов и сплавов сопротивляться окислению или вступать в соединение с различными веществами: кислородом воздуха, растворами кислот, щелочей и др. Чем легче металл вступает в соединение с другими элементами, тем быстрее он разрушается. Химическое разрушение металлов под действием на их поверхность внешней агрессивной среды называют коррозией.



Металлы, стойкие к окислению при сильном нагреве, называют жаростойкими или окислостойкими. Такие металлы применяют для изготовления деталей, которые эксплуатируются в зоне высоких температур.

Сопротивление металлов коррозии, окислению и растворению определяют по изменению массы испытываемых образцов на единицу поверхности за единицу времени.

Химические свойства металлов обязательно учитываются при изготовлении тех или иных изделий. Особенно это относится к изделиям или деталям, работающим в химически агрессивных средах.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА**

**Технологические свойства.** Эти свойства характеризуют способность металлов подвергаться обработке в холодном и горячем состояниях. Технологические свойства определяют при технологических пробах, которые дают качественную оценку пригодности металлов к тем или иным способам обработки. Образец, подвергнутый технологической пробе (рис. 12), осматривают. Признаком того, что образец выдержал испытание, является отсутствие трещин, надрывов, расслоения или излома. К основным технологическим свойствам относят: обрабатываемость резанием, свариваемость, ковкость, литейные свойства и др.

**Обрабатываемость резанием** — одно из важнейших технологических свойств, потому что подавляющее большинство заготовок, а также деталей сварных узлов и конструкций подвергается механической обработке. Одни металлы обрабатываются хорошо до получения чистой и гладкой поверхности, другие же, имеющие высокую твердость, плохо. Очень вязкие металлы с низкой твердостью также плохо обрабатываются: по верхность получается шероховатой, с задирами. Улучшить обрабатываемость, например, стали можно термической обработкой, понижая или повышая ее твердость.

**Свариваемость** — способность металлов образовывать сварное соединение, свойства которого близки к свойствам основного металла. Ее определяют пробой сваренного образца на загиб или растяжение.

**Ковкость** — способность металла обрабатываться давлением в холодном или горячем состоянии без признаков разрушения.

**Литейные свойства** металлов характеризуют способность их образовывать отливки без трещин, раковин и других дефектов. Основными литейными свойствами являются жидкотекучесть, усадка и ликвация.

**Жидкотекучесть** — способность расплавленного металла хорошо заполнять полость литейной формы.

**Усадка при кристаллизации** — это уменьшение объема металла при переходе из жидкого состояния в твердое; является причиной образования усадочных раковин и усадочной пористости (см. рис. 6) в слитках и отливках.

**Ликвация** — неоднородность химического состава сплавов, возникающая при их кристаллизации, обусловлена тем, что сплавы, в отличие от чистых металлов, кристаллизуются не при одной температуре, а в интервале температур. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава, тем сильнее развивается ликвация,

причем наибольшую склонность к ней проявляют те компоненты сплава, которые наиболее сильно влияют на ширину температурного интервала кристаллизации (для стали, например, сера, кислород, фосфор, углерод).

Эксплуатационные свойства. Эти свойства определяют в зависимости от условий работы детали специальными испытаниями. Одним, из важнейших эксплуатационных свойств является износостойкость.

**Износостойкость** — свойство материала оказывать сопротивление износу, т.е. постепенному изменению размеров и формы тела вследствие разрушения поверхностного слоя изделия при трении. Испытание металлов на износ проводят на образцах в лабораторных условиях, а деталей - в условиях реальной эксплуатации. При испытаниях образцов моделируются условия трения, близкие к реальным. Величину износа образцов или деталей определяют различными способами: измерением размеров, взвешиванием образцов и другими методами.

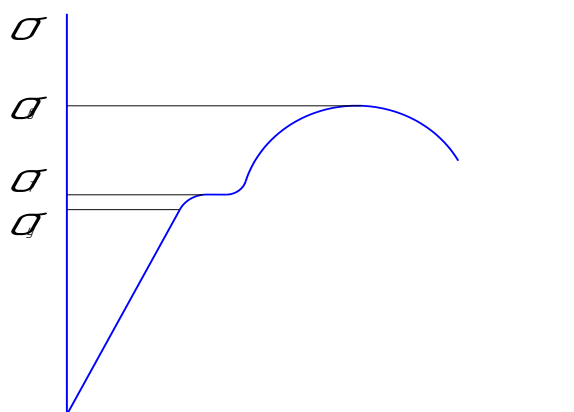
К эксплуатационным свойствам следует также отнести хладостойкость, жаропрочность, антифрикционность и др. Указанные технологические свойства будут рассмотрены далее.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Способность металла сопротивляться воздействию внешних сил характеризуется механическими свойствами. Поэтому при выборе материала для изготовления деталей необходимо прежде всего учитывать его механические свойства: прочность, упругость, пластичность, ударную вязкость, твердость и выносливость. Эти свойства определяют по результатам механических испытаний, при которых металлы подвергают воздействию внешних сил (нагрузок). Внешние силы могут быть статическими, динамическими или циклическими (повторно-переменными). Нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию.

Напряжение— величина нагрузки, отнесенная к единице площади поперечного сечения испытуемого образца. Деформация - изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Различают деформации растяжения (сжатия), изгиба, кручения, среза (рис.8). В действительности материал может подвергаться одному или нескольким видам деформации одновременно.

Для определения прочности, упругости и пластичности металлы в виде образцов круглой или плоской формы испытывают на статическое растяжение. Испытания проводят на разрывных машинах. В результате испытаний получают диаграмму растяжения



Предел текучести (физический)  $\sigma_T$  — это наименьшее напряжение (в МПа), при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки:  $\sigma_T = P_T / F_0$ , где  $P_T$  — нагрузка, при которой в диаграмме растяжения наблюдается площадка текучести, Н.

Площадку текучести имеют в основном только малоуглеродистая сталь и латуни. Другие сплавы площадки текучести не имеют. Для таких материалов определяют предел текучести (условный), при котором остаточное удлинение достигает 0,2% от расчетной длины образца:  $\sigma_{0.2} = P_{0.2} / F_0$ .

Упругость — способность материала восстанавливать первоначальную форму и размеры после прекращения действия нагрузки. Руп оценивают пределом пропорциональности  $\sigma_{пц}$  и пределом упругости  $\sigma_{уп}$ .

Предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$  — напряжение (МПа), выше которого нарушается пропорциональность между прилагаемым напряжением и деформацией образца  $\delta_{пц} = P_{пц} / F_0$ .

Предел упругости (условный)  $\sigma_{0,05}$  — это условное напряжение в МПа, соответствующее нагрузке, при которой остаточная деформация впервые достигает 0,05% от расчетной длины образца:  $\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0$ , где  $P_{0,05}$  — нагрузка предела упругости, Н.

Пластичность — это способность материала принимать новую форму и размеры под действием внешних сил не разрушаясь. Характеризуется относительным удлинением и относительным сужением.

Относительное удлинение (после разрыва)  $\delta$  — это отношение приращения  $(l_k - l_0)$  расчетной длины образца после разрыва к его первоначальной расчетной длине  $l_0$ , выраженное в процентах:  $\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100\%$ .

Относительное сужение (после разрыва)  $\sigma$  — это отношение разности начальной и минимальной площадей  $(F_0 - F_k)$  поперечного сечения образца после разрыва к начальной площади  $F_g$  поперечного сечения, выраженное в процентах:  $\sigma = [(F_0 - F_k) / F_0] \cdot 100\%$ .

Чем больше значения относительного удлинения и сужения для материала, тем он более пластичен. У хрупких материалов эти значения близки к нулю. Хрупкость конструкционного материала является отрицательным свойством.

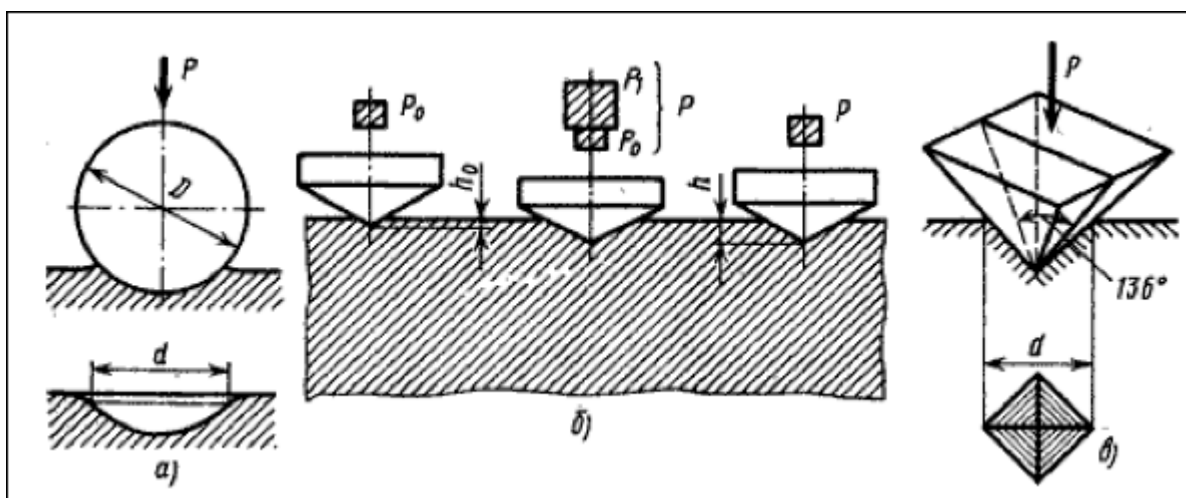
Ударная вязкость — это способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам. Определяется как отношение затраченной на излом образца работы  $W$  (в МДж) к площади его поперечного сечения  $F$  (в м<sup>2</sup>) в месте надреза  $KC = W / F$ .

Для испытания изготавливают специальные стандартные образцы, имеющие форму квадратных брусочков с надрезом. Испытывают образец на маятниковых копрах. Свободно падающий маятник копра ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу. При этом фиксируется работа, затраченная на излом.

Определение ударной вязкости особенно важно для некоторых металлов, работающих при минусовых температурах и проявляющих склонность к хладноломкости. Чем ниже порог хладноломкости, т.е. температура, при которой вязкое разрушение материала переходит в хрупкое, и чем больше запас вязкости материала, тем больше ударная вязкость материала. Хладноломкость — снижение ударной вязкости материалов при низких температурах.

Твердостью называют способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого тела. Высокой твердостью должны обладать металлорежущие инструменты: резцы, сверла, фрезы, а также поверхностно-упрочненные детали. Твердость металла определяют способами Бринелля, Роквелла и Виккерса.(рис)

Способ Бринелля основан на том, что в плоскую поверхность металла вдавливают под постоянной нагрузкой стальной закаленный шарик. Диаметр шарика и величину нагрузки устанавливают в зависимости от твердости и толщины испытываемого металла. Твердость по Бринеллю определяют на твердомере ТШ (твердомер шариковый). Испытание проводят следующим образом. На поверхности образца, твердость которого нужно измерить, напильником или абразивным кругом зачищают площадку размером 3—5 см<sup>2</sup>.



Образец ставят на столик прибора и поднимают до соприкосновения со стальным шариком, который укреплен в шпинделе прибора. Груз опускается и вдавливает шарик в испытываемый образец. На поверхности металла образуется отпечаток. Чем больше отпечаток, тем металл мягче.

За меру твердости НВ принимают отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка диаметром  $d$  и глубиной  $t$ , который образуется при вдавливании силой  $P$  шарика диаметра  $D$ .

Числовое значение твердости определяют так: измеряют диаметр отпечатка с помощью оптической лупы (с делениями) и по полученному значению находят в таблице соответствующее число твердости.

Преимущество способа Бринелля заключается в простоте испытания и точности получаемых результатов. Способом Бринелля не рекомендуется измерять твердость материалов с  $HV > 450$ , например закаленной стали, так как при измерении шарик деформируется и показания искажаются.

Для испытания твердых материалов применяют способ Роквелла. В образец вдавливают алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной закаленный шарик диаметром 1,59 мм. Твердость по Роквеллу измеряется в условных единицах. Условная величина единицы твердости соответствует осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Испытание проводят на приборе ТК. Значение твердости определяют по глубине

отпечатка П и отсчитывают по циферблату индикатора, установленному на приборе. Во всех случаях предварительная нагрузка P<sub>0</sub> равна 100 Н.

При испытании металлов с высокой твердостью применяют алмазный конус и общую нагрузку  $P=P_0+P_1=1500$  Н. Твердость отсчитывают по шкале "С" и обозначают HRC.

Если при испытании берется стальной шарик и общая нагрузка 1000 Н, то твердость отсчитывается по шкале "В" и обозначается HRB.

При испытании очень твердых или тонких изделий используют алмазный конус и общую нагрузку 600 Н. Твердость отсчитывается по шкале "А" и обозначается HRA. Пример обозначения твердости по Роквеллу:

H RC 50 - твердость 50 по шкале "С".

При определении твердости способом Виккерса в качестве вдавливаемого в материал наконечника используют четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136°. При испытаниях применяют нагрузки от 50 до 1000 Н (меньшие значения нагрузки для определения твердости тонких изделий и твердых, упрочненных поверхностных слоев металла). Числовое значение твердости определяют так: замеряют длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки и с помощью микроскопа и по полученному среднему арифметическому значению длины диагонали находят в таблице соответствующее число твердости. Пример обозначения твердости по Виккерсу — HV 500.

Для оценки твердости металлов в малых объемах, например, на зернах металла или его структурных составляющих применяют способ определения микротвердости. Наконечник (индентор) прибора представляет собой алмазную четырехгранную пирамиду (с углом при вершине 136°, таким же, как и у пирамиды при испытании по Виккерсу). Нагрузка на индентор невелика и составляет 0,05-5 Н, а размер отпечатка 5-30 мкм. Испытание проводят на оптическом микроскопе ПМТ-3, снабженном механизмом нагружения. Микротвердость оценивают по величине диагонали отпечатка.

Усталостью называют процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к образованию трещин и разрушению. Усталость металла обусловлена концентрацией напряжений в отдельных его объемах, в которых имеются неметаллические включения, газовые пузыри, различные местные дефекты и т. д. Характерным является усталостный излом, образующийся после разрушения образца в результате многократного нагружения и состоящий из двух разных по внешнему виду частей. Одна часть излома с ровной (затертой) поверхностью образуется вследствие трения поверхностей в области трещин, возникших от действия повторно-переменных нагрузок, другая часть с зернистым изломом возникает в момент разрушения образца. Испытания на усталость проводят на специальных машинах. Наиболее распространены машины для повторно-переменного изгибания вращающегося образца, закрепленного одним или обоими концами, а также машины для испытаний на растяжение-сжатие и на повторно-переменное кручение. В результате испытаний определяют предел выносливости, характеризующий сопротивление усталости.

Выносливость — свойство материала противостоять усталости. Предел выносливости — это максимальное напряжение, которое может выдержать металл без разрушения заданное число циклов нагружения. Между пределом выносливости и пределом прочности существует приближенная зависимость:  $\sigma_{-1} \approx 0,43\delta\sigma$ ;  $\sigma_{-1p} \approx 0,36\delta\sigma$ , где  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{-1p}$  — соответственно пределы выносливости при изгибе и растяжении-сжатии.

## 1.2. Формирование структуры литых материалов

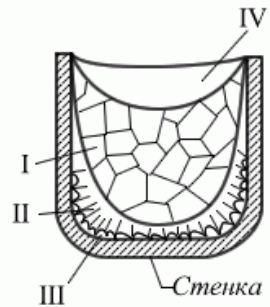
Строение металлического слитка.

Зона I: Высокая скорость охлаждения. Структура – мелкие, равноосные кристаллы.

Зона II: Быстрое охлаждение, большая разность температур, мелкие кристаллы, растущие навстречу оттоку тепла. Игольчатые (столбчатые) дендриты.

Зона III: Центральная часть слитка. Медленное охлаждение. Форма кристаллов: крупные равноосные. Чем ближе к центру, тем больше содержание вредных примесей. Примеси можно удалить механически,

Зона IV: В верхней части слитка, концентрируется наибольшая часть легких примесей (шлаки), газовых пузырей, трещин, раковин, и т. д. После изготовления эту часть удаляют.



Наиболее качественными являются слитки с одинаковой структурой кристаллов по всему объему, поэтому зону I часто механически удаляют.

Кристаллизация – переход из жидкого в твердое состояние с образованием кристаллической решетки. Выделяют самопроизвольную и несамопроизвольную кристаллизацию.

Упорядоченность. Мера упорядоченности – энтропия ( $S$  [ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ]). Энтропия возрастает, если энергия подводится в хаотическом движении. При кристаллизации порядок повышается, следовательно энтропия убывает.

Главный термодинамический параметр – температура. При анализе кристаллизации не рассматривается поведение отдельных атомов или молекул. Применяют термодинамический подход: вещество рассматривается как некая система, которая характеризуется общими усредненными параметрами:

- 1) Энтропия  $S$ .
- 2) Полная внутренняя энергия  $U$  [Дж/кг].
- 3) Температура (пропорциональна  $\langle W_k \rangle$ )  $T$  [К].
- 4) Свободная энергия  $F_{св} = U - TS$  – часть полной внутренней энергии системы, которой система может обменяться с внешней средой без изменения агрегатного состояния.

Принцип минимума свободной энергии.

При заданной температуре из всех возможных агрегатных состояний вещество будет стремиться перейти в то агрегатное состояние свободная энергия которого минимальна.

Самопроизвольная кристаллизация – процесс, который происходит в веществах под действием естественных механизмов без посторонних вмешательств. Формула  $F_{св} = U - TS$  означает, что для каждого агрегатного состояния может быть написано уравнение, определяющее изменение внутренней энергии в зависимости от температуры.



При высоких температурах по принципу минимальной свободной энергии энергетически более выгодно жидкое агрегатное состояние, при низких – твердое.

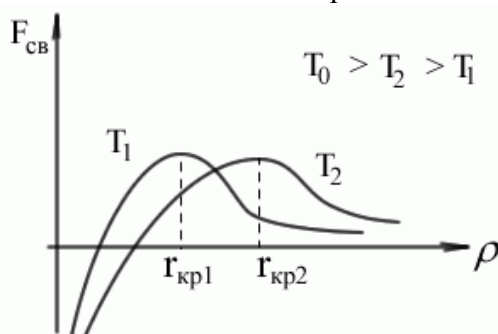
$T_0$  – теоретическая температура кристаллизации – температура, при которой уровни свободной энергии жидкости и твердого состояния одинаковы. При температуре кристаллизации вещество находится в безразличном состоянии.  $0^\circ\text{C}$  – теоретическая температура кристаллизации воды. Для начала кристаллизации необходимо, чтобы  $T_\partial < T_0$ , где  $T_\partial$  – действительная температура начала кристаллизации.

Важнейшая характеристика процесса кристаллизации – степень переохлаждения:  $\Delta T = T_0 - T_\partial$ . Начало кристаллизации при  $T < T_0$  сопровождается образованием внутри жидкости мельчайших зародышей кристаллов, то есть небольших групп атомов, располагающихся фиксировано друг относительно друга и образующих кристаллическую решетку.

При образовании кристаллической решетки происходят следующие процессы:

1) Уменьшение свободной энергии при  $T < T_0$  за счет образования кристаллической решетки, так как кристаллообразное состояние более выгодно.

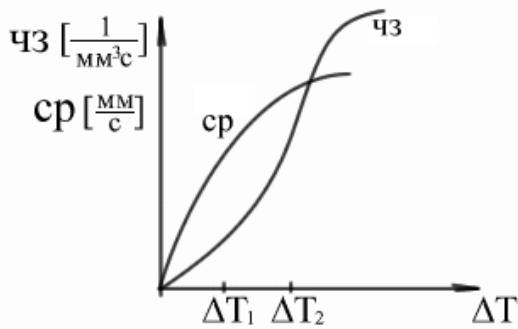
2) Увеличение свободной энергии за счет образования поверхности раздела между жидкостью и кристаллом. Возникновение поверхности натяжения. Устойчивым будет тот кристалл, для которого уменьшение свободной энергии больше чем ее увеличение.



$r_{кр}$  – критический радиус кристалла.

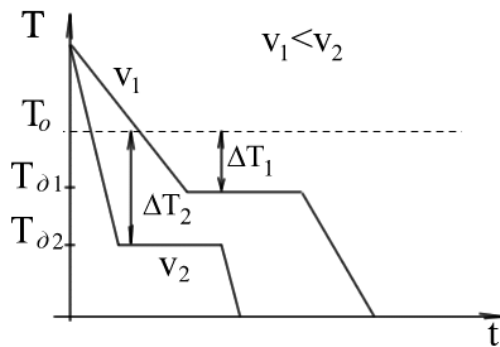
$r_{кр1} < r_{кр2}$  означает, что при некоторой температуре  $T_2$  начальный объем зародыша должен быть больше, следовательно вероятность его самопроизвольного развития меньше. Чем меньше степень переохлаждения, тем меньше зародышей кристаллов образуется в единице объема жидкости за единицу времени.

Зависимость числа зародышей кристаллов и скорости их роста от степени переохлаждения.



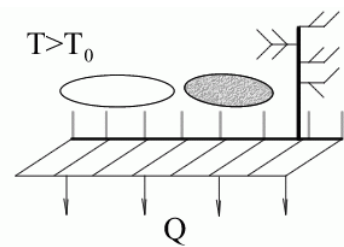
Чем больше  $\Delta T = T_0 - T_\partial$ , тем меньше  $T_\partial$ . При  $\Delta T_1$  – число зародышей мало, скорость роста отлична от нуля. В результате кристаллы вырастают до крупных размеров. При  $\Delta T_2$  – число зародышей резко возрастает, скорость роста увеличивается, но кристаллы из-за большого количества не успевают вырасти до крупных размеров (структура из мелких кристаллов).

Чем мельче кристаллы в структуре металла, тем выше прочность и твердость, меньше пластичность. Для малых объемов металла  $\Delta T$  можно изменять за счет изменения скорости охлаждения.



Для крупных слитков это неприемлемо, так как внутренние слои слитка будут охлаждаться с малой скоростью. Если охлаждать слиток снаружи, то обнаружится существенная неоднородность структуры слитка.

При охлаждении слитка возникает существенная разность температур, которая приводит к возникновению дендритных кристаллов (древовидные кристаллы). Они имеют оси, вызывающие сильную неоднородность свойств металла. Наличие крупных дендритных кристаллов является литейным браком.



Несамопроизвольная кристаллизация – происходит при температурах ниже  $T_0$  с участием специальных веществ. Они влияют на размер и форму кристалла и называются модификаторы. Процесс влияния – модифицирование.

Выделяют два вида модификаторов объемные и поверхностные. Объемные модификаторы создают дополнительные центры кристаллизации. Тугоплавкие металлы в виде мелкодисперсного порошка. Необходимо, чтобы металл имел аналогичные кристаллические решетки и атомные параметры. Для железа модификатор – вольфрам. Поверхностные модификаторы уменьшают скорость роста кристаллов, изменяют поверхностную энергию на границе кристалл-жидкость. Атомы модификатора прилипают к поверхности кристалла, новые кристаллы не растут. В качестве модификатора используются неметаллы с малой атомной массой. Для железа модификатор – бор. Модификаторы позволяют улучшить структуру металла и управлять размерами и формой кристаллов.



## Основы теории сплавов.

Сплав – вещество, содержащее в своем составе два или более компонентов, по крайней мере один из которых – металл.

Компонент – химическое вещество, входящее в состав сплава.

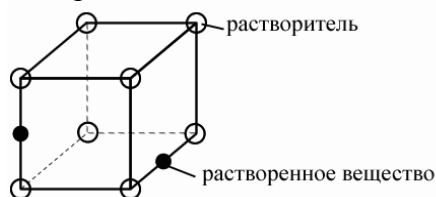
В дальнейшем будем рассматривать двойные сплавы.

### Различные типы кристаллических сплавов.

1. Твердые растворы – кристаллы, у которых один из компонентов образует собственную кристаллическую решетку, а второй присутствует в виде отдельных атомов, то есть собственной кристаллической решетки не имеет. Первый компонент называют растворителем, а второй – растворенным компонентом.

Выделяют твердые растворы внедрения и твердые растворы замещения.

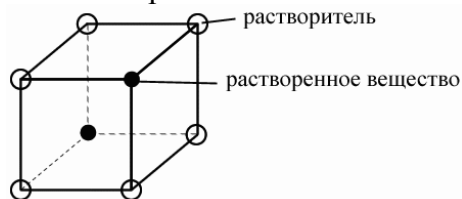
В твердых растворах внедрения – атомы растворенного вещества находятся в межатомных промежутках растворителя.



Особенности:

- растворенные вещества должны иметь малый атомный радиус (обычно это неметалл);
- ограниченная растворимость;

В твердых растворах замещения – атомы растворенного вещества замещают атомы растворителя в узлах кристаллической решетки.



Особенности

- растворенное вещество такого же типа, как и растворитель (атомы близки по размеру);
- часто имеют неограниченную растворимость;

2. Химические соединения. Кристаллы, в структурах которых атомы двух компонентов образуют химическую связь.

Особенности:

- сложная кристаллическая решетка, в которой оба компонента занимают строгоопределенные места;
- постоянный химический состав (стехиометрический) металл-неметалл;

3. Интерметаллидные соединения – химические соединения между двумя металлами.  $Me_nMe_m$ .

Особенности:

- постоянный состав;
- способность образовывать твердые растворы (внедрения);

### Правило Гиббса.

Фаза – часть объема вещества, ограниченная поверхностью раздела, при переходе через которую скачком меняется структура, химический состав, свойства вещества.

Изменение фазового состава вещества возможно при изменении следующих термодинамических параметров:

1. Химический состав.
2. Давление.

### 3. Температура.

или всех трех вместе. В дальнейшем будем считать, что:

- химический состав сплава в целом остается неизменным;
- все процессы происходят при постоянном давлении;
- изменение фазового состава связано с изменением температуры;

Число степеней свободы – количество термодинамических параметров, при изменении которых фазовый состав вещества остается неизменным.

Правило Гиббса устанавливает связь между числом компонентов, числом степеней свободы и количеством фаз в системе.

$$c = k - f + 1$$

$c$  – число степеней свободы;

$k$  – число компонентов;

$f$  – количество фаз;

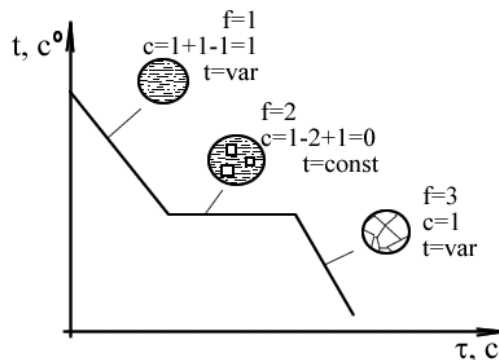
С помощью правила Гиббса можно узнать количество степеней свободы:  $c = 1$  (для данного процесса температура может меняться), или  $c = 0$  (температура остается неизменной).



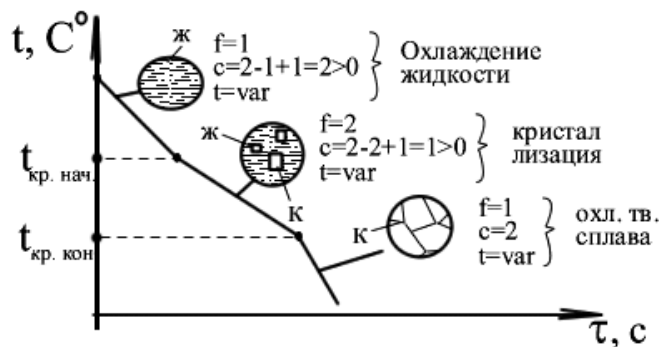
Так как в наших условиях  $k = 2$ , а число термодинамических параметров, которые могут изменяться  $= 1$ , то с помощью правила Гиббса для каждого процесса фазового перехода можно определить (в сплавах), происходит ли этот процесс при постоянной температуре, или при переменной.

#### Применение правила Гиббса.

1. Кристаллизация чистого вещества ( $k = 1$ ). Чистые вещества кристаллизуются при постоянной температуре.



2. Кристаллизация сплава двух компонентов, неограниченно растворимых друг в друге в твердом состоянии ( $k = 2$ ). Во время процесса изменяется число фаз.

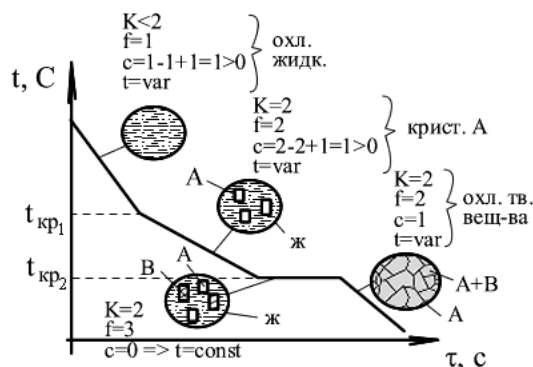


1) Охлаждение идет с довольно большой скоростью. 2) Начинается процесс

кристаллизации. Скорость охлаждения падает. Уменьшается температура (кристаллизация идет при падении температуры). 3) Скорость охлаждения снова увеличивается.

Сплавы компонентов, неограниченно растворимых друг в друге в твердом состоянии кристаллизуются при переменной температуре, то есть в диапазоне температур. В этом диапазоне при каждой фиксированной температуре весовое соотношение жидкости и твердого вещества строго определенное.

3. Кристаллизация сплава компонентов не растворимых друг в друге в твердом состоянии. Атомные параметры элементов не совместимы.



Кристаллизация идет в два этапа:

- кристаллизация чистых кристаллов одного из компонентов (А) происходит при переменной температуре. Химический состав оставшейся жидкости меняется (изменяется процентное содержание А в жидкости).
- Одновременная кристаллизация компонентов А+В происходит при постоянной температуре. Образование смеси А+В происходит при строго определенном соотношении между компонентами А и В в незакристаллировавшейся жидкости.

Эвтектическая смесь – легкоплавкая смесь. Температура, при которой происходит образование такой смеси называется температурой эвтектического превращения. Температура и химический состав эвтектики являются постоянными для каждой пары веществ.

### 1.3. Диаграммы состояния.

Рассматриваются только бинарные сплавы.

Диаграмма состояния – график, описывающий изменение структурного и фазового состава сплава при изменении температуры. Диаграммы состояния строятся в координатах температура – химический состав. Все диаграммы строятся экспериментально.

Существует несколько основных типов диаграмм состояния бинарных сплавов металлов:

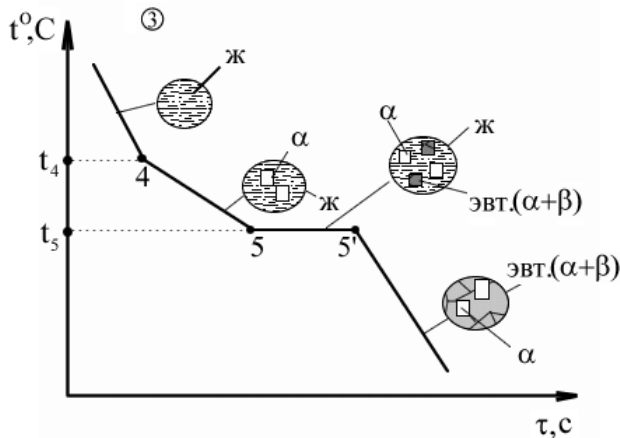
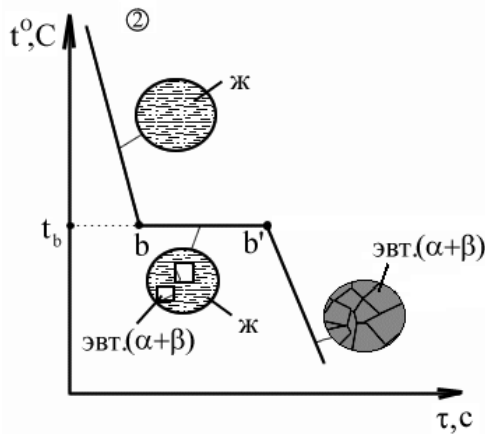
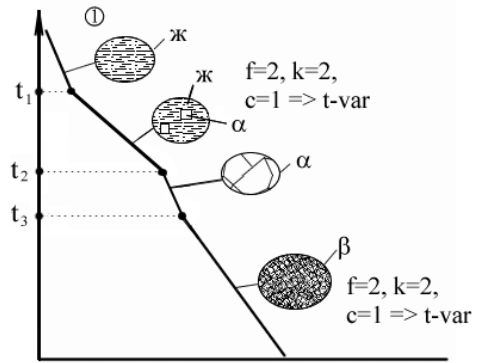
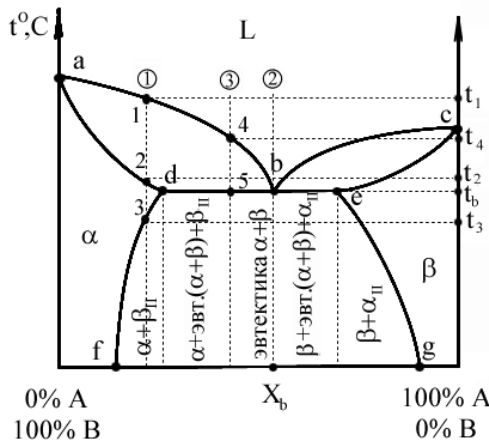
#### Диаграммы I рода.

Компоненты не растворимы друг в друге в твердом состоянии.



### Диаграммы III рода.

#### Компоненты ограниченно растворимы друг в друге.



abc – линия ликвидус;  $X_b$  – химический состав эвтектики.

adec – линия солидус.

df, eg – линии предельной растворимости в твердом состоянии.

$\alpha$  – ограниченный твердый раствор компонента А в компоненте В.

$\beta$  – ограниченный твердый раствор компонента В в компоненте А.

Сплав (1): Выше  $t_1$  – охлаждение с высокой скоростью, зависящее от внешних условий. 1-2 – первичная кристаллизация, образование  $\alpha$  твердого раствора. Вследствие низкого содержания компонента А в исходном сплаве при достижении  $t_2$  весь компонент А расходуется на образование  $\alpha$ -кристаллов, следовательно в точке 2 – однофазный твердый сплав. 2-3 – остывание сплава; превращений нет. Ниже температуры  $t_3$  – точка 3 соответствует достижению  $\alpha$ -кристаллического состояния насыщенности, дальнейшее понижение температуры приводит к выделению избыточного компонента А за счет диффузии в небольшие зоны на границе кристаллов. Эти зоны превращаются в мелкие

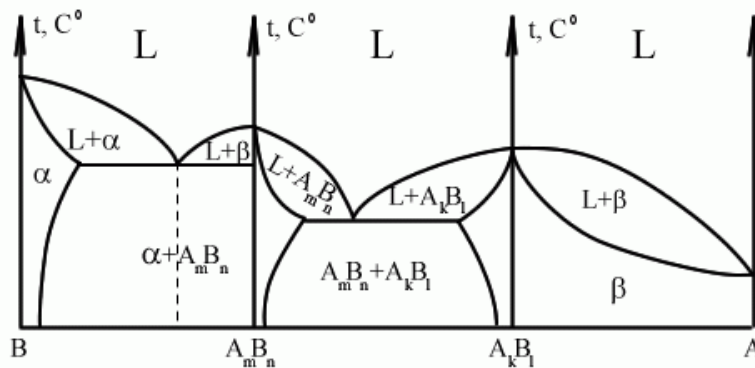
кристаллы  $\beta$ , то есть происходит вторичная кристаллизация внутри твердой фазы.

Сплав (2): Процесс аналогичен образованию эвтектики, только вместо чистых компонентов А и В –  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердые растворы.

Сплав (3): Выше температуры  $t_4$  – охлаждение сплава – превращений нет.  $t_4 - t_5$  – первичная кристаллизация  $\alpha$ -кристаллов, при этом содержание компонента А в жидкости уменьшается и состав жидкости постепенно приближается к эвтектическому (при  $t_5$ ). 5–5' – состав жидкости соответствует эвтектическому, идет образование эвтектики (температура постоянна). Температура ниже  $t_5$  – охлаждение сплава, вторичная кристаллизация с образованием  $\beta_{II}$ -вторичных кристаллов. Для заэвтектической области процессы и кривые охлаждения сплавов аналогичны, только  $\alpha$ - и  $\beta$ -кристаллы меняются местами.

#### Диаграммы IV рода.

Компоненты образуют в твердом состоянии химические соединения.



Диаграммы для компонентов, образующих химические соединения, определяются числом возможных химических соединений, и представляют собой совокупность диаграмм различного типа 1, 2 или 3. В каждой из этих диаграмм чистые компоненты и соответствующие химические соединения могут играть роль как чистых компонентов, так и основы для твердых растворов. Это определяется физическими свойствами компонентов и их соединений. Важно, что на графике диаграммы надо обеспечить стыковку на важнейших точках линии ликвидус и солидус (должна получиться одна общая линия).

#### Правило отрезков.

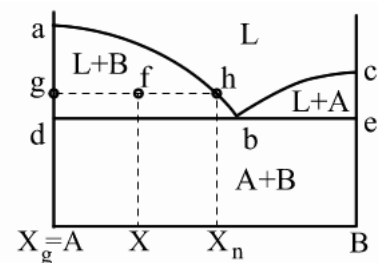
Правило отрезков применяется для двухфазных областей диаграммы. С помощью правила отрезков можно для сплавов постоянного химического состава определить при изменении температуры:

1. Весовое соотношение между фазами.
2. Изменение химического состава фаз.

#### Правило отрезков для диаграмм I рода.

Для линий  $abd$ ,  $bce$  и части диаграммы ниже линии  $de$  можно применить правило отрезков. Выберем сплав определенного химического состава  $x$  и рассмотрим применение правила отрезков для этого сплава при температуре  $t_1$ . Общее состояние сплава определяется точкой  $f$ .

Правило отрезков позволяет определить относительное количество фаз.



$$1) \text{ Фазы } L+B: L_f = \frac{gf}{gh} \cdot 100\%; B_f = \frac{hf}{gh} \cdot 100\%$$

$$2) \text{ Химический состав фаз: } x_L = x_h; x_B = x_g = 100\% B$$

Относительное количество фаз определяется отношением соответствующей части горизонтального отрезка, проведенного для заданной температуры  $t_1$  – до пересечения с границами области к общей длине этого отрезка.

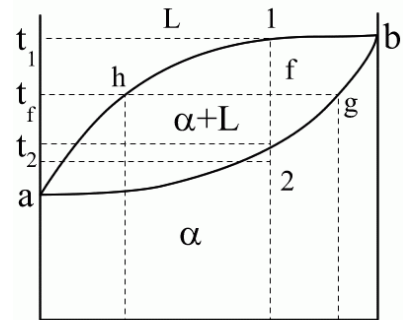
Химический состав фаз при заданной температуре определяется проекцией точек пересечения горизонтального отрезка с заданными границами областей на ось химического состава.

#### Правило отрезков для диаграмм II рода.

Для  $a1b2$  работает правило отрезков:

$$L_f = \frac{gf}{gh} \cdot 100\%; \alpha_f = \frac{hf}{gh} \cdot 100\%; x_L = x_h; x_\alpha = x_g$$

Химический состав фаз для рассматриваемой области определяется проекциями точек, попадающих на границу с областью, занимаемой соответствующей фазой, то есть в донном случае точка  $g$  на границе с областью  $\alpha$  – определяет химический состав  $\alpha$ -кристаллов, точка  $h$  на границе с областью  $L$  – определяет химический состав жидкости.



Применим правило отрезков для точек 1, f и 2 сплава  $x$ . При этом химический состав образующихся  $\alpha$ -кристаллов будет меняться от  $x$ , через  $x_g$  до исходного состава  $x$  в соответствии с правилом отрезков, то есть при кристаллизации  $\alpha$ -кристаллы, образующиеся на разных этапах кристаллизации имеют разный химический состав.

Это противоречие связано с тем, что рассматриваемая нами диаграмма состояния является равновесной, то есть:

- а) Процесс фазового превращения происходит бесконечно медленно;
- б) Происходит диффузионное выравнивание химических составов каждой фазы;

В действительности:

- а) Скорость кристаллизации конечна;
- б) Полного выравнивания химического состава твердой фазы не происходит, то есть в составе образовавшейся твердой структуры остаются  $\alpha$ -кристаллы с отличающимся от среднего химическим составом. Это явление носит название химической ликвации.

Ликвация – процесс, при котором часть структуры сплава отличается по своему химическому строению от основного состава. В реальных сплавах всегда происходит процесс ликвации.

#### Правило отрезков для диаграмм III рода.

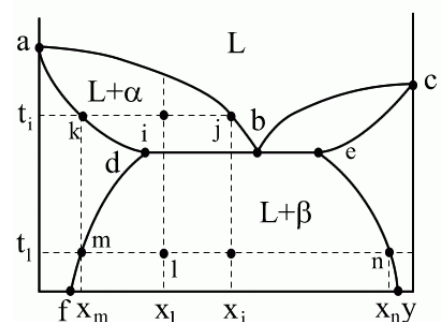
Применим правило отрезков для линий  $adf$ ,  $fdeg$  и  $seg$ . Для сплава состава  $x$  при температуре  $t_1$  (точка  $i$ ). Две фазы: жидкость и  $\alpha$ -кристаллы:

$$L_i = \frac{ki}{kj} \cdot 100\%; \alpha_i = \frac{ij}{kj} \cdot 100\%; x_L = x_j; x_\alpha = x_k$$

Для сплава  $x$  при температуре  $t_1$  (точка  $l$ ). Две фазы  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$L_\alpha = \frac{nl}{mn} \cdot 100\%; L_\beta = \frac{ml}{mn} \cdot 100\%;$$

$$x_\alpha = x_m; x_\beta = x_n$$



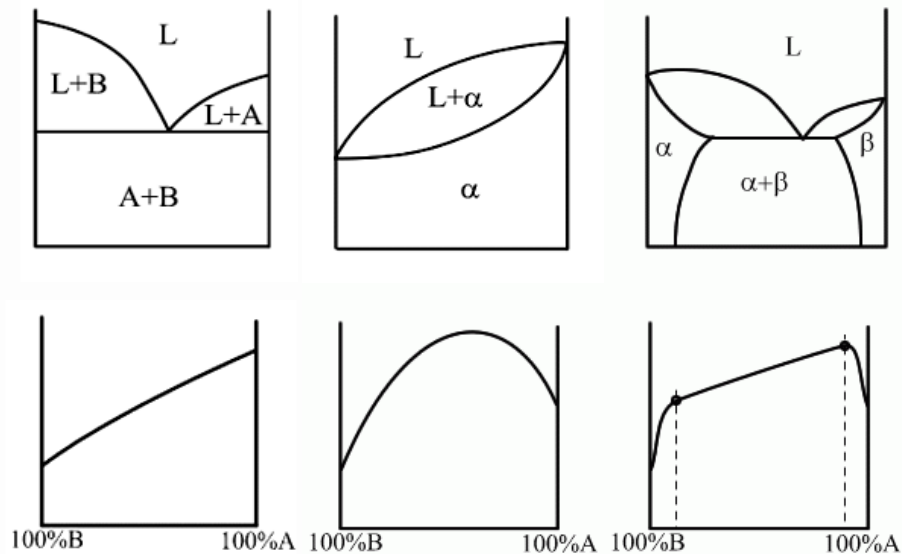
Для двухфазной области  $fdeg$  правило отрезков также работает. Изменение относительного количества и химического состава в этой области происходит за счет изменения растворимости компонентов друг в друге и соответствующих диффузионных процессов перераспределений внутри сплавов.

#### Диаграммы. Состав. Свойства. Диаграмма Курнакова.

Курнаков установил, что между типом диаграммы сплава и изменением его свойств при изменении состояния имеется соответствие. В его основе:

1) Изменение физических свойств твердых растворов существенно нелинейно зависит от их химического состава.

2) Изменение свойств механических смесей линейно связано с изменением относительного количества кристаллов в смеси.



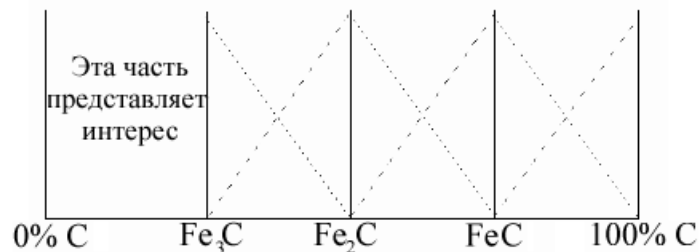
Эта связь позволяет:

- 1) При исследовании новых сплавов и определении их свойств существенно сократить объем исследований, так как характеристика соответствующего графика известна.
- 2) На основе характеристик изменения свойств сплава уточнить соответствующие структуры превращения в нем.

Сплавы железа и углерода.

Диаграмма железо-цементит.

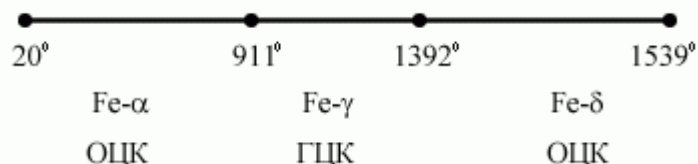
Диаграмма Fe-Fe<sub>3</sub>C является частью диаграммы железо-углерод.



Общие принципы построения диаграммы.

В основе всех превращений лежат следующие явления:

- 1) Наличие у железа нескольких вариантов кристаллической решетки (аллотропические модификации). Для чистого железа существуют диапазоны:



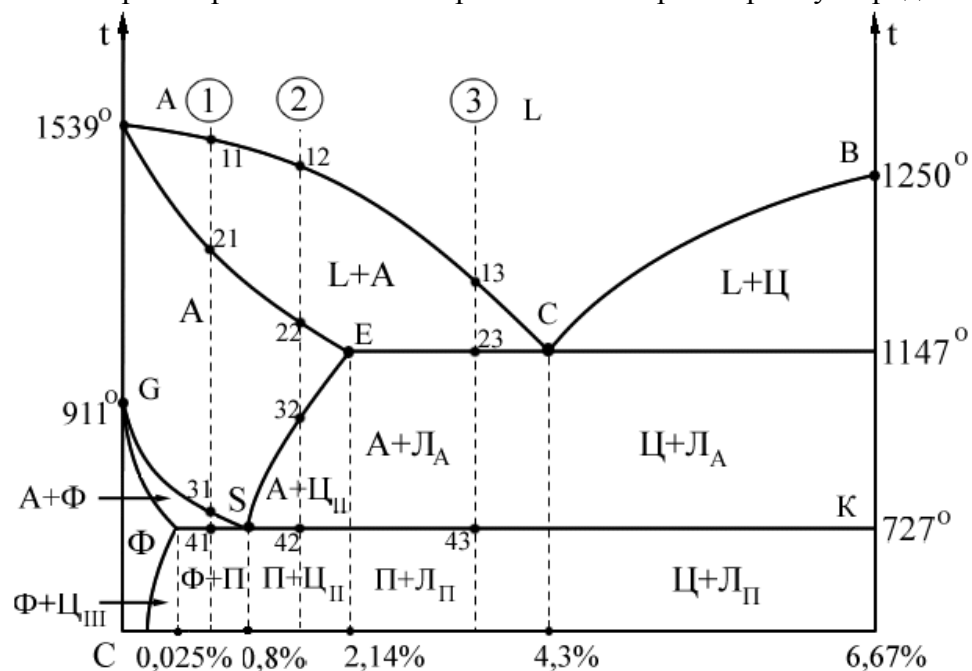
Изменение типа решетки приводит к существенному изменению физических свойств. В дальнейшем высокотемпературная область Fe<sub>δ</sub> рассматриваться не будет, так как не представляет интереса. Будем считать, что от 911° С до 1539° С – область Fe<sub>γ</sub>.

- 2) Различная растворимость углерода в кристаллической решетке железа в зависимости от типа решетки и температуры.

- 3) Образование химического соединения с собственной кристаллической решеткой.



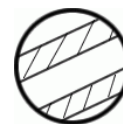
Это соединение нерастворимо в железе и практически не растворяет углерод.



Обозначения на диаграмме.

А – аустенит – ограниченный твердый раствор внедрения углерода в кристаллической решетке  $Fe_\gamma$ . Тип решетки – ГЦК. Максимальная растворимость углерода – 2,14% при температуре 1147° С (точка Е на диаграмме). Устойчива от температуры плавления сплавов до  $t_{min} = 727^\circ \text{C}$ . Особенность: с понижением температуры устойчивость А обеспечивается во все более сужающемся диапазоне растворимости углерода. При температуре  $t_{min} = 727^\circ \text{C}$  А устойчив только при определенном содержании углерода (0,8%) – точка S. При падении температуры ниже 727° С А распадается и переходит в П.

П – перлит – эвтектоидная механическая смесь феррита и цементита. Содержание углерода – 0,8%. Образуется в результате перераспределения углерода в А при  $t < 727^\circ \text{C}$ . Строение: слоистая структура из пластинок Ф и Ц.



Ф – феррит – ограниченный твердый раствор внедрения углерода в кристаллической решетке  $Fe_\alpha$ ; ОЦК-решетка; содержание углерода – меньше 0,006% при  $t=20^\circ \text{C}$ . Из-за малого содержания углерода по свойствам Ф аналогична чистому железу.

Ц – цементит – химическое соединение  $Fe_3C$  – карбид (сложная кристаллическая решетка).  $C = 6,67\%$ . Ц – самая высокоуглеродсодержащая фаза. Это самый твердый и прочный из всех сплавов.

$L_A$  – ледебурит аустенитный – эвтектическая смесь фаз А и Ц. Образуется при температуре 1147° С (линия ECD).

$L_P$  – ледебурит перлитный – эвтектическая смесь фаз П и Ц. Образуется из  $L_A$  при температуре  $< 727^\circ \text{C}$  в результате распада А.

Основные линии на диаграмме.

АСВ – линия ликвидус.

АECD – линия солидус.

ECD – линия эвтектического превращения; С – точка эвтектики (ледебурит).

SE – линия предельной растворимости С в А; ниже линии С выделяется в виде  $Ц_{II}$ .

GS – нижняя граница устойчивости А; ниже линии часть кристаллов А теряет С и превращается в Ф, остальные кристаллы получают С и остаются устойчивыми.

PSK – линия эвтектического превращения; ниже линии А переходит в П.

PM – линия предельной растворимости С в Ф; избыточный углерод – в виде  $Ц_{III}$

GP – верхняя граница ферритной области; для любой двухфазной области

диаграммы применимо правило отрезков.

Диаграмма делится на области по содержанию углерода: 0–2,14% – сталь (0–0,8% – доэвтектоидная сталь, 0,8–2,14% – заэвтектоидная сталь); 2,14–6,67% – чугун (2,14–4,3% – доэвтектический чугун, 4,3–6,67% – заэвтектический чугун).

### Превращения в сплавах Fe и C.

В технике применяется железо с содержанием углерода до 2,14%.

#### 1) Доэвтектоидная сталь:

Для 4–4':  $k = 2$ ;  $f = 3$  ( $\Phi + A + \text{Ц}$ );  $c = 2 - 3 + 1 = 0$  ( $t = \text{const}$ ).

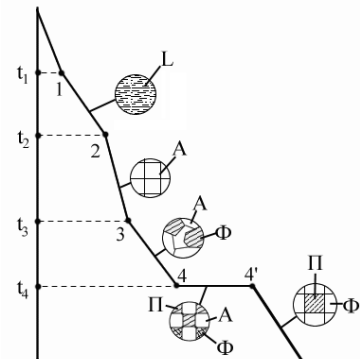
1–2 – первичная кристаллизация A из жидкости

2–3 – охлаждение A (превращений нет)

3–4 – диффузионное перераспределение углерода, образование  $\Phi$ , повышение содержания углерода в A.

4–4' – распад A, образование П.

Ниже 4' – охлаждение сплава, выделение избыточного углерода из  $\Phi$  ( $\text{Ц}_{\text{III}}$ ).



#### 1) Заэвтектоидная сталь:

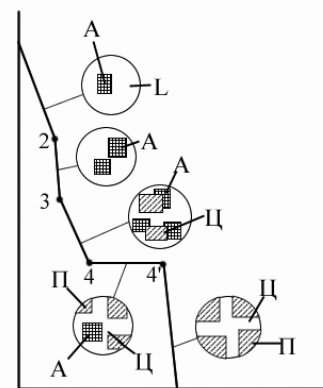
1–2 – первичная кристаллизация, образование аустенитной структуры

2–3 – охлаждение твердого сплава (превращений нет)

3–4 – вторичная кристаллизация; 3 – образование насыщенного твердого раствора углерода в  $\text{Fe}_\gamma$ . Понижение температуры приводит к диффузии избыточного углерода к граница зерен, в результате на границах образуются зоны с высоким содержанием углерода, которые превращаются в Ц.

4–4' – эвтектоидное превращение A в П; 4' – конец превращения;  $t = 727^\circ \text{C} = \text{const}$ .

Ниже 4' – остывание сплава, идет процесс третичной кристаллизации,  $\text{Ц}_{\text{III}}$  из феррита (теоретически).



#### 1) Доэвтектический чугун:

1–2 – кристаллизация аустенита.

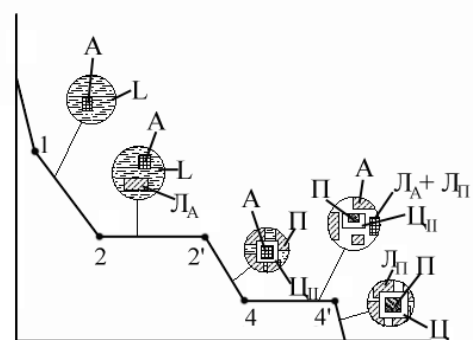
2–2' – кристаллизация эвтектики  $L_A$  ( $t = 1147^\circ \text{C}$ ); 2' – конец первичной кристаллизации, жидкости нет.

2'–4 – образование вторичного цементита.

4–4' – эвтектоидное превращение A в П.

Ниже 4' – остывание сплава.

Особенность белого чугуна: высокое содержание в белом чугуне цементита обеспечивает ему высокую твердость, прочность и хрупкость, поэтому в технике он практически не применяется. В технике применяются графитизированные чугуны; в их структуре углерод присутствует в свободном виде в виде графита.



## **Теория деформаций и напряжений**

### **Величины, характеризующие деформацию тела**

О величине деформации судят по изменению размеров деформируемого тела. Существует несколько вариантов характеристики деформации. Пусть размеры тела до деформации  $L_0$  – длина,  $b_0$  – ширина и  $h_0$  – толщина, после деформации соответственно  $L_1$ ,  $b_1$  и  $h_1$ .

#### **Абсолютные деформации:**

по толщине – обжатие  $\Delta h = h_1 - h_0$ ;

по длине – удлинение  $\Delta L = L_1 - L_0$ ;      измеряются в единицах длины

по ширине – уширение  $\Delta b = b_1 - b_0$ ;

Абсолютные показатели неполно характеризуют величину деформации, так как не учитывают размеры деформируемого тела, а учитывают только их изменение. Например, обжатие 5 мм будет большим при исходном размере 10 мм, и незначительным при 100 мм. Более удобны относительные показатели, называемые **степенью деформации**. Такие деформации могут быть трех видов.

**Относительные деформации 1-го рода** – отношение абсолютных деформаций к соответствующим исходным размерам.

по толщине – относительное обжатие  $\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0}$ ;

по длине – относительное удлинение  $\varepsilon_L = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$ ;

по ширине – относительное уширение  $\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0}$ .

**Относительные деформации 2-го рода** – отношение абсолютных деформаций к соответствующим конечным размерам.

по толщине – относительное обжатие  $\varepsilon_h^1 = \frac{h_1 - h_0}{h_1}$ ;

по длине – относительное удлинение  $\varepsilon_L^1 = \frac{L_1 - L_0}{L_1}$ ;

по ширине – относительное уширение  $\varepsilon_b^1 = \frac{b_1 - b_0}{b_1}$ .

Относительные деформации измеряются либо в долях единицы, либо в процентах.

При небольших степенях деформации разница между первыми и вторыми величинами невелика, при больших (>40%) – большая. Полную картину деформации дает логарифмическая деформация.

**Истинные (логарифмические) деформации.** Для их определения весь процесс деформации мысленно разбивают на ряд весьма малых этапов. На каждом этапе определяют абсолютную деформацию и относят ее к соответствующему размеру на данном этапе (относительная деформация за этап). Затем полученные относительные

деформации суммируются. Чем меньше величина деформации на каждом этапе, тем точнее будет результат.

Абсолютная деформация на некотором промежуточном этапе будет равна:  $Dh_x = h_{x0} - h_{x1}$

Относительная деформация:  $\varepsilon_x = \frac{\Delta h_x}{h_{x0}} \approx \frac{\Delta h_x}{h_{x1}} = \frac{\Delta h_x}{h_x}$ . Истинная деформация по высоте:  $\varepsilon_1 = \sum_{h_0}^{h_1} \frac{\Delta h_x}{h_x}$ .

Переходя к бесконечно малым величинам, получим:  $\delta_h = \lim_{\Delta h_x \rightarrow 0} \sum_{h_0}^{h_1} \frac{\Delta h_x}{h_x} = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h_1}{h_0}$

Аналогично получают истинные деформации по длине и ширине.

Таким образом, истинные деформации представляют собой натуральный логарифм отношений размеров после деформации и до нее:

по толщине -  $\delta_h = \ln \frac{h_1}{h_0}$ ; по ширине -  $\delta_b = \ln \frac{b_1}{b_0}$ ; по длине -  $\delta_l = \ln \frac{L_1}{L_0}$ .

При  $\frac{\Delta h}{h_0} < 0,15$   $\varepsilon_h$  и  $\delta_h$  расходятся незначительно.

**Коэффициенты деформации** – отношение размеров тела после деформации к соответствующим размерам до деформации.

Коэффициент деформации по толщине – коэффициент обжатия  $\eta = \frac{h_1}{h_0} \Rightarrow \delta_h = \ln \eta$ ;

Коэффициент деформации по длине – коэффициент удлинения  $\lambda = \frac{L_1}{L_0} \Rightarrow \delta_l = \ln \lambda$ ;

Коэффициент деформации по ширине – коэффициент уширения  $\beta = \frac{b_1}{b_0} \Rightarrow \delta_b = \ln \beta$ .

Между коэффициентами деформации и относительными деформациями имеется простая связь:

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{h_1}{h_0} - 1 = \eta - 1; \quad \varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} = \frac{b_1}{b_0} - 1 = \beta - 1;$$

$$\varepsilon_L = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{L_1}{L_0} - 1 = \lambda - 1;$$

## Термическая и химико-термическая обработка

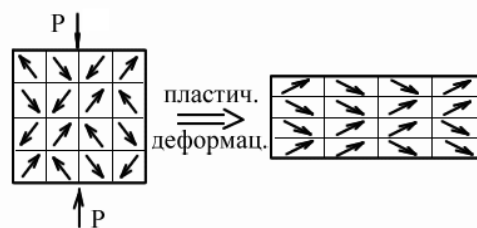
### Виды термической обработки.

1) Отжиг – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали выше критической температуры (структура аустенит), выдержки и медленном охлаждении. Задача отжига – получение более или менее равновесной структуры металла. Существует отжиг первого и второго рода.

Отжиг первого рода направлен на возвращение в равновесное состояние металла, подвергнутого предварительной пластической деформации.

Отжиг первого рода проходит в две стадии: 1) возврат 2) рекристаллизация. В результате пластической деформации в металле возникает особая структура, при которой большинство кристаллов оказывается деформированными в одном направлении.

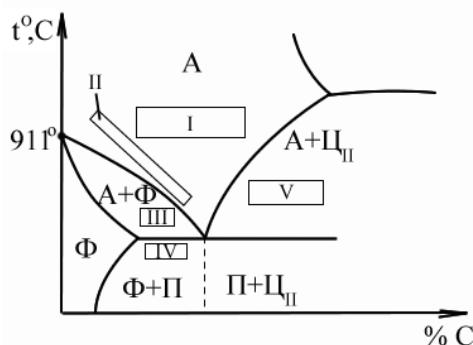
Металл, свойства которого были одинаковы во всех направлениях из-за произвольной хаотической ориентации кристаллов приобретает преимущественные направления распределения свойств. Устранить влияние пластической деформации на структуру металла можно двумя способами.



1) Возврат – нагрев металла до относительно низких температур. Результат – искаженная форма кристаллов сохраняется, снимаются внутренние напряжения в структуре. В результате твердость и прочность незначительно уменьшаются, уменьшается склонность к хрупкому разрушению.

2) Рекристаллизация – нагрев до высоких температур: чистые металлы – до  $t_p = 0,2-0,3t_{пл}$ ; чистые сплавы – до  $t_p = 0,5-0,6t_{пл}$ ; технические сплавы – до  $t_p = 0,8-0,9t_{пл}$ . Под действием высоких температур происходит полная перестройка кристаллической структуры металла. Вместо деформированных кристаллов в твердом состоянии происходит зарождение и рост новых равновесных кристаллов. Свойства металла возвращаются к исходным – бывшим до деформации.

Отжиг второго рода заключается в нагревании стали выше критической температуры аустенита, выдержки и охлаждении. Направлен на перевод стали, находящейся в неравновесном состоянии после предварительной термической обработки в равновесное состояние.



Левый нижний угол диаграммы железо-цементит.

I. Полный отжиг. Нагрев до температуры 900–1000° С. Как результат: происходит выравнивание химического состояния (исчезновение ликваций); образуется полностью равновесная структура. Следы предварительной термообработки полностью исчезают. Происходит рост зерна аустенита (гомогенизация).

II. Полный отжиг. Структура металла переходит в более равновесное состояние. Ликвации сохраняются, роста зерна не происходит.

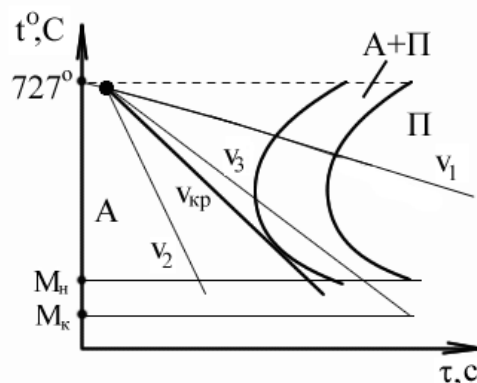
III, IV. Неполный отжиг. Происходит уменьшение степени неравновесности, частично сохраняются следы предварительной термообработки.

V. Сорероидизация, применяется для заэвтектоидных сталей ( $C > 0,8\%$ ). Цель – образование сферического цементита. Исчезает цементный скелет. Кристаллы цементита приобретают правильную сферическую форму. Результат – улучшение механических свойств металла, уменьшение хрупкости, увеличение вязкости.

2) Закалка – вид термической обработки, заключающийся в нагреве стали выше критической температуры (структура аустенит), выдержки при этой температуре и охлаждении со скоростью выше критической (структура мартенсит). Цель: повышение твердости и прочности стали.

Критическая скорость охлаждения – минимальная скорость охлаждения стали, при которой не происходит распада аустенита с образованием перлита ( $t = 727^\circ \text{C}$ ).

При охлаждении со скоростью  $v_{кр}$  кривая охлаждения касательна к линии начала распада А. При скорости  $v_1 < v_{кр}$  – низкая скорость охлаждения – идет процесс распада А, закалки не происходит. При  $v_2 > v_{кр}$  – происходит закалка с образованием мартенсита. При  $v_3 < v_{кр}$  происходит неполная закалка, часть кристаллов А распадается, часть – превращается в мартенсит.



#### Выбор температуры нагрева стали под закалку.

Условия выбора:

1) Образование аустенитной структуры должно пройти полностью за относительно непродолжительное время.

2) Не должно происходить увеличения размеров зерна аустенита вследствие нагрева.

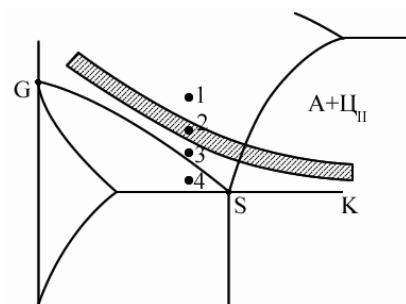
Результаты закалки при разных условиях:

1) Температура выше оптимальной: превращение происходит быстро, увеличиваются размеры кристаллов аустенита, следовательно возможно ухудшение свойств закаленной стали.

2) Температура оптимальная: превращение происходит быстро, результат качественный.

3) Температура ниже оптимальной: Закалка возможна, но недопустимо сильно увеличивается время выдержки.

4) Температура ниже критической: Аустенит образуется частично. Результат – неполная закалка.



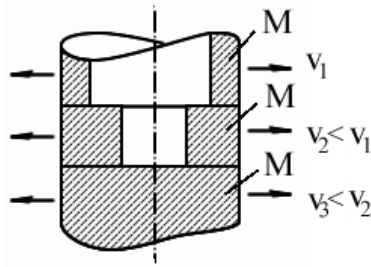
Интервал температур определен экспериментально. Для заэвтектоидных сталей температура нагрева на  $20\text{--}50^\circ \text{C}$  выше линии SK. Причина: углерод как легирующий элемент способствует повышению устойчивости аустенита.

Для заэвтектоидных сталей закалка с температурой выше линии SK приводит к высокому содержанию углерода в аустените. После закалки при низких температурах в структуре находится много остаточного аустенита, как следствие уменьшается твердость. После закалки при температуре на  $20\text{--}50^\circ \text{C}$  выше линии SK, избыточный углерод остается в виде цементита, содержание углерода в аустените пониженное, аустенит практически полностью превращается в мартенсит. Влияние остаточного аустенита компенсируется высокой прочностью и твердостью вторичного цементита.

#### Способность стали к закалке.

1) Закаливаемость – способность стали существенно изменять свои свойства после закалки. Зависит от содержания углерода в стали ( $C > 0,25\%$ ).

2) Прокаливаемость – способность стали образовывать мартенсит при низких критических скоростях охлаждения. Чем ниже скорость, тем выше прокаливаемость, тем толще поверхностный слой закаленного металла.



Виды закалки:

1) Простая закалка:

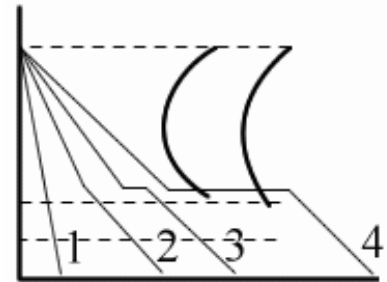
Преимущества: Производится в одной охлажденной среде, простота, низкая стоимость.

Недостатки: Вероятность высоких внутренних напряжений, возможность возникновения трещин.

2) Закалка в двух закалочных средах:

Преимущества: Снижение внутренних напряжений.

Недостатки: Усложнение технологии закалки, высокая стоимость.



3) Закалка в двух закалочных средах с выдержкой:

Преимущества: Низкие внутренние напряжения, не возникают трещин.

Недостатки: Усложнение технологии закалки, высокая стоимость, высокая вероятность брака.

4) Закалка на бейнит:

Бейнит – структура, образованная из аустенита при температуре немного большей начала мартенситного превращения, и представляющая собой промежуточное состояние между аустенитом и мартенситом (ближе к мартенситу).

Преимущества: Оптимальное сочетание механических свойств: прочность, твердость, вязкость.

Недостатки: Сложная технологии закалки, высокая вероятность брака.

3) Отпуск – термическая обработка стали, заключающаяся в нагреве закаленной на мартенсит стали до температуры ниже критической, выдержки при этой температуре и охлаждении на воздухе.

Цель отпуска: Улучшение механических свойств закаленной стали, снижение хрупкости, повышение пластичности, некоторое снижение твердости и прочности.

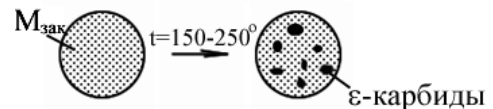
Закалка + Отпуск = Улучшение свойств стали.

Исходная структура – мартенсит закалки: высокое содержание углерода, сильно искаженная кристаллическая решетка, значительное напряжение в структуре, высокая степень неравновесности.

Виды отпуска:

1) Низкотемпературный отпуск (низкий отпуск):

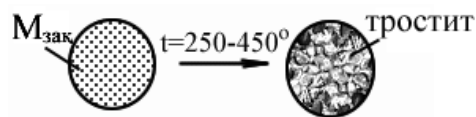
Исходная структура – мартенсит закалки, температура отпуска  $t_{отп} = 150-250^\circ \text{C}$ . В результате отпуска – мартенсит отпуска и  $\epsilon$ -карбиды.



При повышении температуры активизируется диффузия. Часть атомов углерода покидает кристаллы мартенсита, концентрируется в локальных областях, где образуется карбид железа ( $\epsilon$ -карбид). Размеры этих карбидов очень небольшие. Результат низкого отпуска: уменьшение степени пересыщенности мартенсита и, как следствие, снижение внутреннего напряжения, немного снижается твердость и прочность. Мартенситная структура в целом сохраняется, снижается склонность стали к хрупкому разрушению.

2) Среднетемпературный отпуск (средний отпуск):

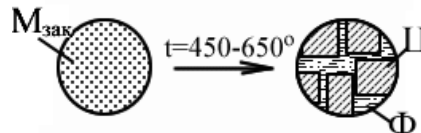
Исходная структура – мартенсит закалки, температура отпуска  $t_{\text{отп}} = 250\text{--}450^\circ \text{C}$ . В результате отпуска – тростит отпуска.



При повышении температуры активизируется диффузия. Диффузия углерода при такой температуре достаточна для превращения мартенсита в перлитную структуру, но не достаточна для перемещения углерода на большие расстояния. В итоге образуется смесь феррита и цементита. Особенности среднего отпуска: маленький размер кристаллов, кристаллы равноосные, мелкодисперсные. Такая структура называется тростит отпуска. Такая структура обладает высокой прочностью и твердостью и достаточным запасом пластичности. Используется для ответственных, сильно нагреваемых деталей (пружины, рессоры).

3) Высокотемпературный отпуск (высокий отпуск):

Исходная структура – мартенсит закалки, температура отпуска  $t_{\text{отп}} = 450\text{--}650^\circ \text{C}$ . В результате отпуска – сорбит отпуска.



Процессы аналогичны среднему отпуску, но увеличивается расстояние, на которое смещаются атомы углерода. Диффузия происходит интенсивнее, чем в случае среднетемпературного отпуска, увеличиваются размеры кристаллов феррита и цементита. Такая структура называется сорбит отпуска. В результате высокого отпуска повышается пластичность, снижается хрупкость, одновременно уменьшается твердость и прочность. Используется для ответственных, сильно нагреваемых деталей под ударными нагрузками.

### **Химико-термическая обработка**

Химико-термическая обработка (ХТО) – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали.

Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев.

В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура,

Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки.

В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы диссоциации, адсорбции, диффузии.

Диссоциация – получение насыщающего элемента в активированном атомарном состоянии в результате химических реакций, а также испарения.

Например,

Адсорбция – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента.

Адсорбция – всегда экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.



Диффузия – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия.

Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения деталей.

Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);

азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом);

нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);

диффузионная металлизация (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

Назначение и технология видов химико-термической обработки: цементации, азотирования нитроцементации и диффузионной металлизации

## **Цементация**

Цементация – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры 900...950 оС.

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до 0,25 %).

Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод. Подобрать режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины.

Глубина цементации ( $h$ ) – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ( $h = 1...2$  мм).

Степень цементации – среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более 1,2 %).

Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного, сообщающего слою повышенную хрупкость.

На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

Цементация в твердом карбюризаторе.

Почти готовые изделия, с припуском под шлифование, укладывают в металлические ящики и пересыпают твердым карбюризатором. Используется древесный уголь с добавками углекислых солей  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в количестве 10...40 %. Закрытые ящики укладывают в печь и выдерживают при температуре 930...950 °C.

За счет кислорода воздуха происходит неполное сгорание угля с образованием окиси углерода (CO), которая разлагается с образованием атомарного углерода по реакции:

Образующиеся атомы углерода адсорбируются поверхностью изделий и диффундируют вглубь металла.

Недостатками данного способа являются:

значительные затраты времени (для цементации на глубину 0,1 мм затрачивается 1 час);

низкая производительность процесса;

громоздкое оборудование;

сложность автоматизации процесса.

Способ применяется в мелкосерийном производстве.

Газовая цементация.

Процесс осуществляется в печах с герметической камерой, наполненной газовым карбюризатором.

Атмосфера углеродосодержащих газов включает азот, водород, водяные пары, которые образуют газ-носитель, а также окись углерода, метан и другие углеводороды, которые являются активными газами.

Глубина цементации определяется температурой нагрева и временем выдержки.

Преимущества способа:

возможность получения заданной концентрации углерода в слое (можно регулировать содержание углерода, изменяя соотношение составляющих атмосферу газов);

сокращение длительности процесса за счет упрощения последующей термической обработки;

возможность полной механизации и автоматизации процесса.

Способ применяется в серийном и массовом производстве.

### Структура цементованного слоя

На поверхности изделия образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита. По мере удаления от поверхности, содержание углерода снижается и следующая зона состоит только из перлита. Затем появляются зерна феррита, их количество, по мере удаления от поверхности увеличивается. И, наконец, структура становится отвечающей исходному составу.

### Термическая обработка после цементации

В результате цементации достигается только выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая термообработка. Все изделия подвергают закалке с низким отпуском. После закалки цементованное изделие приобретает высокую твердость и износостойкость, повышается предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе, при сохранении вязкой сердцевины.

Комплекс термической обработки зависит от материала и назначения изделия.

Если сталь наследственно мелкозернистая или изделия неответственного назначения, то проводят однократную закалку с температуры 820...850оС (рис. 15.2 б). При этом обеспечивается получение высокоуглеродистого мартенсита в цементованном слое, а также частичная перекристаллизация и измельчение зерна сердцевины.

При газовой цементации изделия по окончании процесса подстуживают до этих температур, а затем проводят закалку (не требуется повторный нагрев под закалку) (рис. 15.2 а).

Для удовлетворения особо высоких требований, предъявляемых к механическим свойствам цементованных деталей, применяют двойную закалку (рис. 15.2 в).

Первая закалка (или нормализация) проводится с температуры 880...900оС для исправления структуры сердцевины.

Вторая закалка проводится с температуры 760...780оС для получения мелкоигльчатого мартенсита в поверхностном слое.

Завершающей операцией термической обработки всегда является низкий отпуск, проводимый при температуре 150...180оС. В результате отпуска в поверхностном слое получают структуру мартенсита отпуска, частично снимаются напряжения.

Цементации подвергают зубчатые колеса, поршневые кольца, червяки, оси, ролики.

## **Азотирование**

Азотирование – химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои насыщаются азотом.

Впервые азотирование осуществил Чижевский И.П., промышленное применение – в двадцатые годы.

При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак  $\text{NH}_3$  с определенной скоростью. При нагреве аммиак диссоциирует по реакции:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ . Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.

Фазы, получающиеся в азотированном слое углеродистых сталей, не обеспечивают высокой твердость, и образующийся слой хрупкий.

Для азотирования используют стали, содержащие алюминий, молибден, хром, титан. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

Типовые азотируемые стали: 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ.

Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от ряда факторов, из которых основные: температура азотирования, продолжительность азотирования и состав азотируемой стали.

В зависимости от условий работы деталей различают азотирование:

для повышения поверхностной твердости и износостойкости;

для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

В первом случае процесс проводят при температуре 500...560оС в течение 24...90 часов, так как скорость азотирования составляет 0,01 мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет 10...12 %, толщина слоя (h) – 0,3...0,6 мм. На поверхности получают твердость около 1000 НV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом (контейнерной установкой) возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотосодержащего газа, и ионы бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения. Катодное распыление осуществляется в течение 5...60 мин при напряжении 1100...1400 В и давлении 0,1...0,2 мм рт. ст., рабочее напряжение 400...1100 В, продолжительность процесса до 24 часов.

Антикоррозионное азотирование проводят и для легированных, и для углеродистых сталей. Температура проведения азотирования – 650...700°C, продолжительность процесса – 10 часов. На поверхности образуется слой — фазы толщиной 0,01...0,03 мм, который обладает высокой стойкостью против коррозии. (–фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe<sub>3</sub>N, имеющий гексагональную решетку).

Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпуском).

После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.

### **Цианирование и нитроцементация**

Цианирование – химико-термическая обработка, при которой поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом.

Осуществляется в ваннах с расплавленными цианистыми солями, например NaCN с добавками солей NaCl, BaCl и др. При окислении цианистого натрия образуется атомарный азот и окись углерода:

Глубина слоя и концентрация в нем углерода и азота зависят от температуры процесса и его продолжительности.

Цианированный слой обладает высокой твердостью 58...62 HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость.

Продолжительности процесса 0,5...2 часа.

Высокотемпературное цианирование – проводится при температуре 800...950°C, сопровождается преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6...1,2 %, (жидкостная цементация). Содержание азота в цианированном слое 0,2...0,6 %, толщина слоя 0,15...2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску. Окончательная структура цианированного слоя состоит из тонкого слоя карбонитридов Fe<sub>2</sub>(C, N), а затем азотистый мартенсит.

По сравнению с цементацией высокотемпературное цианирование происходит с большей скоростью, приводит к меньшей деформации деталей, обеспечивает большую твердость и сопротивление износу.

Низкотемпературное цианирование – проводится при температуре 540...600оС, сопровождается преимущественным насыщением стали азотом

Проводится для инструментов из быстрорежущих, высокохромистых сталей, Является окончательной обработкой.

Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей.

Нитроцементация – газовое цианирование, осуществляется в газовых смесях из цементующего газа и диссоциированного аммиака.

Состав газа температура процесса определяют соотношение углерода и азота в цианированном слое. Глубина слоя зависит от температуры и продолжительности выдержки.

Высокотемпературная нитроцементация проводится при температуре 830...950оС, для машиностроительных деталей из углеродистых и малолегированных сталей при повышенном содержании аммиака. Завершающей термической обработкой является закалка с низким отпуском. Твердость достигает 56...62 HRC.

На ВАЗе 95 % деталей подвергаются нитроцементации.

Низкотемпературной нитроцементации подвергают инструмент из быстрорежущей стали после термической обработки (закалки и отпуска). Процесс проводят при температуре 530...570оС, в течение 1,5...3 часов. Образуется поверхностный слой толщиной 0,02...0,004 мм с твердостью 900...1200 HV.

Нитроцементация характеризуется безопасностью в работе, низкой стоимостью.

### Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – химико-термическая обработка, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др.

При насыщении хромом процесс называют хромированием, алюминием – алитированием, кремнием – силицированием, бором – борированием.

Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

При твердой диффузионной металлизации металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония (NH<sub>4</sub>Cl). В результате реакции металлизатора с HCl

или  $Cl_2$  образуется соединение хлора с металлом ( $AlCl_3$ ,  $CrCl_2$ ,  $SiCl_4$ ), которые при контакте с поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

Жидкая диффузионная металлизация проводится погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

Газовая диффузионная металлизация проводится в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

Диффузия металлов протекает очень медленно, так как образуются растворы замещения, поэтому при одинаковых температурах диффузионные слои в десятки и сотни раз тоньше, чем при цементации.

Диффузионная металлизация – процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах (1000...1200°C) в течение длительного времени.

Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих температур 1000...1200°C изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием или силицированием.

Исключительно высокой твердостью (2000 HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа ( $FeB$ ,  $FeB_2$ ) характеризуются борированные слои, но эти слои очень хрупкие.

## 2. Материалы, применяемые в машино- и приборостроении

### 2.1. Конструкционные материалы

Состав и маркировка сталей.

#### Состав сталей.

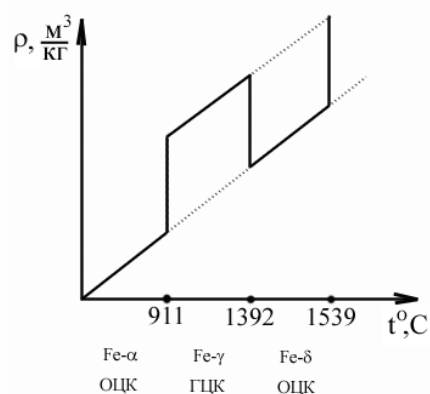
Стали содержат примеси: случайные или специально введенные, среди них можно найти почти все элементы периодической таблицы Менделеева. Кроме железа и углерода в составе стали содержатся примеси: случайные (руда, металлолом) и технологические (специально введенные).

#### Примеси:

1) Растворенные газы ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ...), чаще в атомном виде ( $O$ ,  $H$ ,  $N$ ...) – вредные примеси. Влияние газовых примесей: кислород – образование окислов внутри структуры; водород и азот – образование соответствующих химических соединений – гидридов и нитридов; образование газовых пузырьков в структуре.

Растворимость газов в кристаллической решетке зависит от температуры и от типа кристаллической решетки. Так растворимость в  $Fe_\gamma$  (ГЦК) при переходе  $Fe_\gamma$  в  $Fe_\alpha$  резко уменьшается и в твердой структуре образуются газовые пузырьки. При давлении больше 1000 атмосфер пузырьки способны вызывать разрушение металла, образовывать трещинки, поэтому удаление газов из сталей – одна из главных задач.

2) Сера и фосфор (S,P) – вредные примеси. Сера вызывает понижение прочности при высоких температурах (явление красноломкости). Причина: образование легкоплавко



эвтектики на границах зерен. Сера вызывает понижение прочности при низких температурах (явление синеломкости).

3) Технологические добавки – алюминий и марганец (Al, Mn) – применяются для удаления из стали вредных примесей (в первую очередь S и O<sub>2</sub>). В качестве раскислителя применяются для низкоуглеродистых сталей.

4) Случайные примеси – никель, хром, медь (Ni, Cr, Cu) – примеси, попадающие в сталь с металлоломом; их содержание невелико, поэтому существенного влияния на свойства стали они не оказывают.

#### Маркировка углеродистых сталей.

1) Стали общего назначения:  $\underbrace{\text{БСт}}_{\text{а)}} - \underbrace{3}_{\text{б)}} \underbrace{\text{ПС}}_{\text{в)}} \text{C}$

а) Способ контроля:

«А» – по механическим свойствам (механическая обработка);

«Б» – по химическому составу (сварка);

«В» – по механическим свойствам и химическому составу (комплексная обработка);

б) Порядковый номер соответствует содержанию в стали углерода, чем выше номер, тем больше содержание углерода.

в) Способ раскисления:

«КП» – кипящая сталь (удален кислород), добавка – марганец (Mn);

«ПС» – полуспокойная сталь (Mn и Al);

«СП» – спокойная сталь (Al и Si);

2) Качественные углеродистые стали:

Марка стали = %C \* 100.

Марка	5 КП	10 КП	15 КП	20	25	...	60	70	80
%C	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	...	0,6	0,7	0,8
	Низкоуглеродистые стали, раскисленные марганцем								

Процентное содержание углерода в стали округляется до ближайшего числа кратного 5. У сталей с высоким содержанием углерода КП не ставят – их не раскисляют марганцем.

3) Стали инструментальные углеродистые (изготовление инструмента):  $\underbrace{\text{У13А}}_{\text{а)}} \underbrace{3}_{\text{б)}} \underbrace{\text{ПС}}_{\text{в)}} \text{C}$

а) «У» – инструментальная сталь;

б) %C \* 10;

в) «А» – высококачественная сталь, то есть у данной стали пониженное содержание вредных веществ (S, P < 0,025%). Без «А» – сталь качественная (S, P < 0,045%).

#### Легированные стали.

Легированной называется сталь, содержащая в своем составе один или несколько специально введенных легирующих элементов в количестве, заметно изменяющем свойства стали.

Принципы маркировки стали:

Марка легированной стали – буквенно-цифровой код ее химического состава.

Каждый элемент обозначается заглавной буквой русского алфавита:

а) по первой букве русского названия Н – Ni; В – W; Т – Ti; Х – Cr; М – Mo; Г – Mn; Д – Cu; Ю – Al; А – N; Б – Nb;

б) по первой букве латинского названия С – Si;

в) просто условное обозначение Ф – V;



Марка легированной стали:  $\underbrace{37}_{C=0,37\%}$   $\underbrace{X13}_{Cr=1,3\%}$   $\underbrace{\Gamma 8}_{Mn=8\%}$   $\underbrace{H8}_{Ni=8\%}$   $\underbrace{МФБ}_{Mo<1,5\%; V<1,5\%; Nb<1,5\%}$

Если число соответствующее содержанию углерода двухзначное, то это содержание углерода в сотых долях процента, если в единицах, то это содержание углерода в десятых долях процента.

### Классификация сталей.

а) По назначению:

- конструкционные (строительные и машиностроительные);
- инструментальные (штамповые);
- стали с особыми свойствами (нержавеющие, жаропрочные, немагнитные);

б) По степени легированности:

- низколегированные  $0\% \leq \sum \text{л.э.} \leq 2,5\%$
- среднелегированные  $2,5\% \leq \sum \text{л.э.} \leq 10\%$
- высоколегированные  $10\% \leq \sum \text{л.э.} \leq 55\%$

в) По числу компонентов:

- трехкомпонентная сталь (40X13 – Fe + C + Cr);
- четырехкомпонентная сталь (15XM);
- пятикомпонентная сталь (25X1M1Ф);
- многокомпонентная сталь (37X13Г8H8МБФ);

г) По микроструктуре после нормализации выделяют пять основных классов стали:

- перлитный
- мартенситный
- аустенитный
- карбидный
- ферритный

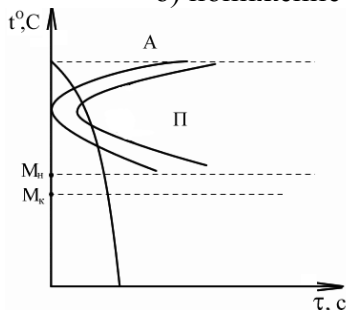
Нормализация – термообработка, состоящая из: нагрева выше критической температуры и охлаждения на воздухе при нормальных условиях (20° С). Особая среди температур охлаждения, при которой решающее влияние на структуру стали оказывает химический состав.

Все легирующие элементы, кроме алюминия и кобальта, повышают устойчивость аустенита при температуре ниже критической.

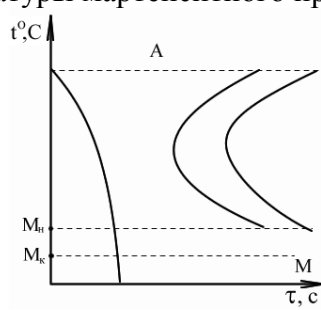
Проявление устойчивости при  $t < 727^\circ \text{C}$ :

а) увеличивается продолжительность инкубационного периода до распада аустенита (кривые сдвигаются вправо);

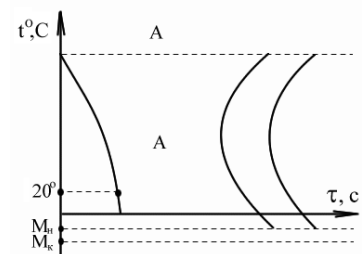
б) понижение температуры мартенситного превращения.



Перлитный класс  
(низколегированные  
стали)



Мартенситный класс  
(среднелегированные  
стали)



Аустенитный класс  
(высоколегированные  
стали)

### Влияние некоторых основных легирующих элементов на свойства сталей.

1. Никель. Никель образует твердые растворы внутри легированных сталей, повышается прочность стали, ее устойчивость к высоким температурам (никель –

сильный аустенизатор).

2. Хром. Если содержание в стали хрома больше 12%, то сталь – нержавеющая (при условии растворения хрома в кристаллической решетке железа). Хром – сильно карбидообразующий элемент. Из-за образования карбидов коррозионная стойкость стали может уменьшаться. В стали 12Х18Н10Т предотвращено образование карбидов хрома на зернах.

3. Вольфрам. Вольфрам повышает твердость и прочность стали. Сильно карбидообразующий элемент. Карбиды вольфрама устойчивы и действуют при температуре выше температуры применения. Вольфрам используют для изготовления инструментальных сталей.

4. Ванадий. Ванадий повышает устойчивость к циклическим нагрузкам и высоким температурам.

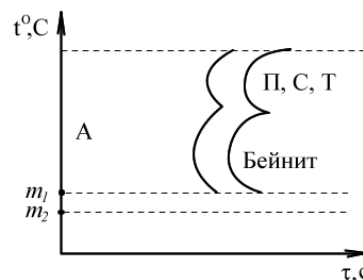
5. Марганец. Марганец способствует повышению твердости и прочности, обеспечивает высокую вязкость сталей.

6. Кремний. Кремний – ферритизатор – повышает устойчивость феррита при высоких температурах, то есть такая сталь обладает хорошими электро-магнитными свойствами (феррит – сильный ферромагнетик). Стали с высоким содержанием кремния используются для изготовления сердечников для электроприборов.

#### Карбидообразующие элементы и их влияние на свойства стали.

Карбидообразующие элементы: хром, вольфрам, титан. При использовании карбидообразующих элементов увеличивается устойчивость аустенита, особенно в диапазоне около 500° С. Выделяют стали карбидного типа.

Карбидообразующие элементы изменяют тип диаграммы железоцементит. В результате стали с повышенным содержанием углерода приобретают структуру, аналогичную белому чугуну: в структуре появляется ледебуритная эвтектика с карбидами легирующих элементов и железа.



## 2.2. Материалы с особыми технологическими свойствами

### Классификация чугунов

Чугун отличается от стали: по составу – более высокое содержание углерода и примесей; по технологическим свойствам – более высокие литейные свойства, малая способность к пластической деформации, почти не используется в сварных конструкциях.

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают:

белый чугун – углерод в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск;

серый чугун – весь углерод или большая часть находится в свободном состоянии в виде графита, а в связанном состоянии находится не более 0,8 % углерода. Из-за большого количества графита его излом имеет серый цвет;

половинчатый – часть углерода находится в свободном состоянии в форме графита, но не менее 2 % углерода находится в форме цементита. Мало используется в технике.. В результате превращения углерод может не только химически взаимодействовать с железом, но и выделяться в элементарном состоянии в форме графита. Жидкая фаза, аустенит и феррит могут находиться в равновесии и с графитом.

Диаграмма состояния железо – графит показана штриховыми линиями на рис. 11.1. Линии диаграммы находятся выше линий диаграммы железо – цементит. Температуры эвтектического и эвтектоидного превращений, соответственно, 1153оС и 738оС. Точки С, Е, S – сдвинуты влево, и находятся при концентрации углерода 4,24, 2,11 и 0,7 %, соответственно.

При высоких температурах цементит разлагается с выделением графита, поэтому диаграмма состояния железо – цементит является метастабильной, а диаграмма железо – графит – стабильной. Процесс образования графита в сплавах железа с углеродом называется графитизацией.

Процесс графитизации.

Графит – это полиморфная модификация углерода. Так как графит содержит 100% углерода, а цементит – 6,67 %, то жидкая фаза и аустенит по составу более близки к цементиту, чем к графиту. Следовательно, образование цементита из жидкой фазы и аустенита должно протекать легче, чем графита.

С другой стороны, при нагреве цементит разлагается на железо и углерод. Следовательно, графит является более стабильной фазой, чем цементит.

Возможны два пути образования графита в чугуне.

При благоприятных условиях (наличие в жидкой фазе готовых центров кристаллизации графита и очень медленное охлаждение) происходит непосредственное образование графита из жидкой фазы.

При разложении ранее образовавшегося цементита. При температурах выше 738оС цементит разлагается на смесь аустенита и графита по схеме

При малых скоростях охлаждения степень разложения цементита больше.

Графитизацию из жидкой фазы, а также от распада цементита первичного и цементита, входящего в состав эвтектики, называют первичной стадией графитизации.

Выделение вторичного графита из аустенита называют промежуточной стадией графитизации.

Образование эвтектоидного графита, а также графита, образовавшегося в результате цементита, входящего в состав перлита, называют вторичной стадией графитизации.

Структура чугунов зависит от степени графитизации, т.е. от того, сколько углерода находится в связанном состоянии.

Выдержка при температуре больше 738оС приводит к графитизации избыточного нерастворившегося цементита. Если процесс завершить полностью, то при высокой температуре структура будет состоять из аустенита и графита, а после охлаждения – из перлита и графита.

При незавершенности процесса первичной графитизации, выше температуры 738оС структура состоит из аустенита, графита и цементита, а ниже этой температуры – из перлита, графита и цементита.

При переходе через критическую точку превращения аустенита в перлит, и выдержке при температуре ниже критической приведет к распаду цементита, входящего в состав перлита (вторичная графитизация). Если процесс завершен полностью то структура состоит из феррита и графита, при незавершенности процесса – из перлита, феррита и графита.

### **Строение, свойства, классификация и маркировка серых чугунов**

Из рассмотрения структур чугунов можно заключить, что их металлическая основа похожа на структуру эвтектоидной или доэвтектоидной стали или технического железа. Отличаются от стали только наличием графитовых включений, определяющих специальные свойства чугунов.

В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый – с пластинчатым графитом; высокопрочный – с шаровидным графитом; ковкий – с хлопьевидным графитом.

Наиболее широкое распространение получили чугуны с содержанием углерода 2,4...3,8%. Чем выше содержание углерода, тем больше образуется графита и тем ниже его механические свойства, следовательно, количество углерода не должно превышать 3,8 %. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) углерода должно быть не менее 2,4 %.

Влияние состава чугуна на процесс графитизации.

Углерод и кремний способствуют графитизации, марганец затрудняет графитизацию и способствует отбеливанию чугуна. Сера способствует отбеливанию чугуна и ухудшает литейные свойства, ее содержание ограничено – 0,08...0,12 %. Фосфор на процесс графитизации не влияет, но улучшает жидкотекучесть, Фосфор является в чугунах полезной примесью, его содержание – 0,3...0,8 %.

## Влияние графита на механические свойства отливок.

Графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты в структуре чугуна. Около таких дефектов при нагружении концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект. Отсюда следует, что графитовые включения пластинчатой формы в максимальной мере разупрочняют металл. Более благоприятна хлопьевидная форма, а оптимальной является шаровидная форма графита. Пластичность зависит от формы таким же образом. Относительное удлинение ( $\epsilon$ ) для серых чугунов составляет 0,5 %, для ковких – до 10 %, для высокопрочных – до 15%.

Наличие графита наиболее резко снижает сопротивление при жестких способах нагружения: удар; разрыв. Сопротивление сжатию снижается мало.

### Положительные стороны наличия графита.

графит улучшает обрабатываемость резанием, так как образуется ломкая стружка;

чугун имеет лучшие антифрикционные свойства, по сравнению со сталью, так как наличие графита обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения;

из-за микропустот, заполненных графитом, чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость;

детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточки, отверстия, переходы в сечениях);

чугун значительно дешевле стали;

производство изделий из чугуна литьем дешевле изготовления изделий из стальных заготовок обработкой резанием, а также литьем и обработкой давлением с последующей механической обработкой.

Структура не оказывает влияние на пластичность, она остается чрезвычайно низкой. Но оказывает влияние на твердость. Механическая прочность в основном определяется количеством, формой и размерами включений графита. Мелкие, завихренной формы чешуйки графита меньше снижают прочность. Такая форма достигается путем модифицирования. В качестве модификаторов применяют алюминий, силикокальций, ферросилиций.

Серый чугун широко применяется в машиностроении, так как легко обрабатывается и обладает хорошими свойствами.

В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 10 марок (ГОСТ 1412).

Серые чугуны при малом сопротивлении растяжению имеют достаточно высокое сопротивление сжатию.

Серые чугуны содержат углерода – 3,2...3,5 %; кремния – 1,9...2,5 %; марганца – 0,5...0,8 %; фосфора – 0,1...0,3 %; серы – < 0,12 %.

Структура металлической основы зависит от количества углерода и кремния. С увеличением содержания углерода и кремния увеличивается степень графитизации и склонность к образованию ферритной структуры металлической основы. Это ведет к разупрочнению чугуна без повышения пластичности. Лучшими прочностными свойствами и износостойкостью обладают перлитные серые чугуны.

Учитывая малое сопротивление отливок из серого чугуна растягивающим и ударным нагрузкам, следует использовать этот материал для деталей, которые подвергаются сжимающим или изгибающим нагрузкам. В станкостроении это – базовые, корпусные детали, кронштейны, зубчатые колеса, направляющие; в автостроении – блоки цилиндров, поршневые кольца, распределительные валы, диски сцепления. Отливки из серого чугуна также используются в электромашиностроении, для изготовления товаров народного потребления.

Обозначаются индексом СЧ (серый чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на СЧ 15.

### **Высокопрочный чугун с шаровидным графитом.**

Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293) могут иметь ферритную (ВЧ 35), феррито-перлитную (ВЧ45) и перлитную (ВЧ 80) металлическую основу. Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03...0,07% от массы отливки). По сравнению с серыми чугунами, механические свойства повышаются, это вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита.

Чугуны с перлитной металлической основой имеют высокие показатели прочности при меньшем значении пластичности. Соотношение пластичности и прочности ферритных чугунов – обратное.

Высокопрочные чугуны обладают высоким пределом текучести, что выше предела текучести стальных отливок. Также характерна достаточно высокая ударная вязкость и усталостная прочность, при перлитной основе.

Высокопрочные чугуны содержат: углерода – 3,2...3,8 %, кремния – 1,9...2,6 %, марганца – 0,6...0,8 %, фосфора – до 0,12 %, серы – до 0,3 %.

Эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка – около 1%. Литейные напряжения в отливках несколько выше, чем для серого чугуна. Из-за высокого модуля упругости достаточно высокая обрабатываемость резанием. Обладают удовлетворительной свариваемостью.

Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные отливки (поршневые кольца), шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

Отливки коленчатых валов массой до 2..3 т, взамен кованных валов из стали, обладают более высокой циклической вязкостью, малочувствительны к внешним концентраторам напряжения, обладают лучшими антифрикционными свойствами и значительно дешевле.

Обозначаются индексом ВЧ (высокопрочный чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на ВЧ 100.

### **Ковкий чугун**

Получают отжигом белого доэвтектического чугуна.

Хорошие свойства у отливок обеспечиваются, если в процессе кристаллизации и охлаждения отливок в форме не происходит процесс графитизации. Чтобы предотвратить графитизацию, чугуны должны иметь пониженное содержание углерода и кремния.

Ковкие чугуны содержат: углерода – 2,4...3,0 %, кремния – 0,8...1,4 %, марганца – 0,3...1,0 %, фосфора – до 0,2 %, серы – до 0,1 %.

Отливки выдерживаются в печи при температуре 950...1000С в течении 15...20 часов. Происходит разложение цементита: .

Структура после выдержки состоит из аустенита и графита (углерод отжига). При медленном охлаждении в интервале 760...720оС, происходит разложение цементита, входящего в состав перлита, и структура после отжига состоит из феррита и углерода отжига (получается ферритный ковкий чугун).

При относительно быстром охлаждении (режим б, рис. 11.3) вторая стадия полностью устраняется, и получается перлитный ковкий чугун.

Структура чугуна, отожженного по режиму в, состоит из перлита, феррита и графита отжига (получается феррито-перлитный ковкий чугун)

Отжиг является длительной 70...80 часов и дорогостоящей операцией. В последнее время, в результате усовершенствований, длительность сократилась до 40 часов.

Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ 30 – 6) и четыре с перлитной (КЧ 65 – 3) основой (ГОСТ 1215).

По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Недостатком ковкого чугуна по сравнению с высокопрочным является ограничение толщины стенок для отливки и необходимость отжига.

Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Из ферритных чугунов изготавливают картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы, хомутики, муфты, фланцы.

Из перлитных чугунов, характеризующихся высокой прочностью, достаточной пластичностью, изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, тормозные колодки.

Обозначаются индексом КЧ (ковкий чугун) и двумя числами, первое из которых показывает значение предела прочности, умноженное на 100, а второе – относительное удлинение - КЧ 30 - 6.

### **Отбеленные и другие чугуны**

Отбеленные – отливки, поверхность которых состоит из белого чугуна, а внутри серый или высокопрочный чугун.

В составе чугуна 2,8...3,6 % углерода, и пониженное содержание кремния – 0,5...0,8 %.

Имеют высокую поверхностную твердость (950...1000 НВ) и очень высокую износостойкость. Используются для изготовления прокатных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, шаров для шаровых мельниц.

Для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа, используются белые чугуны, легированные хромом, хромом и марганцем, хромом и никелем. Отливки из такого чугуна отличаются высокой твердостью и износостойкостью.

Для деталей, работающих в условиях износа при высоких температурах, используют высокохромистые и хромоникелевые чугуны. Жаростойкость достигается легированием чугунов кремнием (5...6 %) и алюминием (1...2 %). Коррозионная стойкость увеличивается легированием хромом, никелем, кремнием.

Для чугунов можно применять термическую обработку.

### **Медь и сплавы на ее основе.**

Медь и ее особенности:

- высокая пластичность;
- высокая тепло- и электропроводность;
- низкая прочность ( $\sigma_b = 200$  МПа);
- очень высокая стоимость;

Медь используется в основном для изготовления ведущих частей в электротехнических приборах.

Маркировка:



Маркировка	M00	M0	M1	...
Примесей, %	< 0,01	< 0,05	< 0,1	

Основные цели легирования меди: повышение прочности, снижение стоимости за счет использования более дешевых легирующих элементов.

#### Латунь.

Латунь – сплав меди и цинка (до 45% цинка). Существует однофазная (содержит  $\alpha$ -твердый раствор цинка в алюминии,  $Zn < 39\%$ ) и двухфазная (содержит  $\alpha$ -твердый раствор и  $\beta$ -твердый раствор цинка в алюминии,  $39\% < Zn < 45\%$ ) латунь.

Назначение сплава: обработка давлением, литье. Цинк способствует повышению прочности и твердости меди; при содержании цинка до 39% – обеспечивается высокая пластичность меди.

Маркировка: Л61: 61% Cu + 39% Zn; ЛАЖ60-1-1: 60% Cu + 1% Al + 1% Fe + 38% Zn.

Особенности маркировки меди: обозначения легирующих элементов меди не совпадают с обозначением легирующих элементов в сталях.

Большинство дополнительных элементов влияет на механические свойства латуни аналогично цинку.

#### Бронзы.

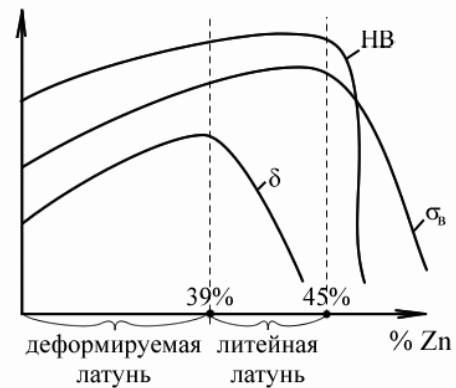
Бронза – сплав меди с любым легирующим элементом кроме цинка.

Основные легирующие элементы: олово, свинец, алюминий (соответственно получается оловянная бронза, свинцовая и алюминиевая).

Классификация: БрОФ10-1: 10% Sn + 1% P + 89% Cu; БрС30: 30% Pb + 70% Cu; БрАЖН10-4-1: 10% Al + 4% Fe + 1% Ni + 85% Cu.

Бронза обладает твердостью, прочностью, хорошими литейными характеристиками.

Химико-термическая обработка стали



### **Автоматные стали**

Автоматные стали предназначены для изготовления изделий массового производства, обрабатываемых на станках-автоматах, автоматических линиях (гайки, болты, оси, шпильки, валики и др.). Эти стали хорошо обрабатываются режущими инструментами благодаря повышенному содержанию в них S, P, Pв. Дисперсные сернистые включения (сульфиды) по существу нарушают сплошность металла и этим обеспечивает хорошее отделение стружки при резании (стружка скола осыпается, а не навивается на деталь, инструмент).

Содержание S в автоматных сталях не должно превышать 0,2%, Pв–0,1% из-за существенного снижения свойств, повышения порога хладноломкости. Поэтому автоматные стали применяют для деталей, не испытывающих повышенных нагрузок в эксплуатации.

ГОСТ 1414-75 регламентирует химический состав автоматных сталей: А12, А20, А30, А40Г (А – автоматная сталь, а цифра – сотые доли %С).

Термическая обработка с целью упрочнения этих сталей, как правило, не применяется. Легированные автоматные стали (АС12ХН, АС35Г2, АС30ХМ, АС40ХГНМ) упрочняются термической обработкой (закалка от 830..9000С в масле и отпуск на требуемую твердость).

Показатели прочности этих сталей соответствуют аналогичным конструкционным, но пластичность их из-за повышенных S, P в 1,5..2 раза ниже. Тем не менее из легированных автоматных сталей изготавливают венцы зубчатых синхронизаторов автомобилей, червяки, фланцы, рычаги переключения передач, шестерни коленвала, втулки, валы и др.

### **2.3. Износостойкие материалы**

Стали для подшипников качения.

От этих сталей требуется высокая твердость (62-65 HRC) и износоустойчивость, что достигается высоким содержанием углерода ( ~ 1%) и термообработкой. Достаточная глубина прокаливаемости обеспечивается легированием хрома.

Поэтому из стали ШХ6 и ШХ9 делают мелкие шарики и ролики диаметром до 13 мм, из стали ШХ15 до 22 мм, из стали ШХ15СГ до 30 мм. Стали ШХ15 и ШХ15СГ используются также для изготовления колец.

Термообработка деталей подшипников состоит из закалки от 840-8600С в масле с низким отпуском (150-1600С). Для наиболее ответственных деталей иногда после закалки проводят обработку холодом.

Для подшипников, работающих в агрессивных средах, применяют сталь с высоким содержанием хрома марки 95Х18, которая после закалки от 1000-10500С в масле и отпуска при 2000С обеспечивает твердость 58-62 HRC и высокую коррозионную стойкость в ряде органических сред и слабых кислот.

### **АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ**

**Требования к сплавам.** Антифрикционные сплавы предназначены для повышения долговечности трущихся поверхностей машин и механизмов. Трение происходит в подшипниках скольжения между валом и вкладышем подшипника. Поэтому для вкладыша подшипника подбирают такой материал, который предохраняет вал от износа, сам минимально изнашивается, создает условия для оптимальной смазки и уменьшает трение. Исходя из этих требований и, антифрикционный материал представляет собой сочетания достаточно прочной и пластичной основы, в которой имеются опорные (твердые) включения. При трении пластичная основа частично изнашивается, а вал опирается на твердые включения. В этом случае трение происходит не по всей поверхности подшипника, а смазка удерживается в изнашивающихся местах пластичной основы,

Антифрикционными сплавами служат сплавы на основе олова, свинца, меди или алюминия, обладающие специальными антифрикционными свойствами. Антифрикционные свойства сплавов проявляются при трении в подшипниках

скольжения. Это, в первую очередь, низкий коэффициент трения, хорошая прирабатываемость к сопрягаемой детали, высокая теплопроводность, способность удерживать смазку и др. Из антифрикционных сплавов наиболее широко применяют баббит, бронзу, алюминиевые сплавы, чугун и металлокерамические материалы.

Антифрикционные сплавы хорошо прирабатываются в парах трения благодаря мягкой основе— олову, с винцу или алюминию. Более твердые металлы (цинк, медь, сурьма), вкрапленные в мягкую основу, способны выдерживать большие нагрузки. После приработки и частичной деформации мягкой основы в ней образуются углубления, способные удерживать смазку, необходимую для нормальной работы пары.

**Сплавы. Баббиты**— антифрикционные материалы на основе олова или свинца. Их применяют для заливки вкладышей подшипников скольжения, работающих при больших окружных скоростях и при переменных и ударных нагрузках. По химическому составу баббиты классифицируют на три группы: оловянные (Б83, Б88), оловянно-свинцовые (БС6, Б16) и свинцовые (БК.2, БКА). Последние не имеют в своем составе олова.

Лучшими антифрикционными свойствами обладают оловянные баббиты.

Баббиты на основе свинца имеют несколько худшие антифрикционные свойства, чем оловянные, но они дешевле и менее дефицитны. Свинцовые баббиты применяют в подшипниках, работающих в легких условиях. В марках баббитов цифра показывает содержание олова. Например, баббит БС6 содержит по 6% олова и сурьмы, остальное - свинец.

*Для оловянных и оловянно-фосфористых бронз* характерны высокие антифрикционные свойства: низкий коэффициент трения, небольшой износ, высокая теплопроводность, что позволяет подшипникам, изготовленным из этих материалов, работать при высоких окружных скоростях и нагрузках.

*Алюминиевые бронзы*, используемые в качестве подшипниковых сплавов, отличаются большой износостойкостью, но могут вызвать повышенный износ вала. Их применяют вместо оловянных и свинцовых баббитов и свинцовых бронз.

*Свинцовые бронзы* в качестве подшипниковых сплавов могут работать в условиях ударной нагрузки.

*Латуни* по антифрикционным свойствам уступают бронзам. Их используют для подшипников, работающих при малых скоростях и умеренных нагрузках.

Из-за дефицитности олова и свинца применяют сплавы на менее дефицитной основе, например *алюминиевые сплавы*. Алюминиевые сплавы обладают хорошими антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью в масляных средах и достаточно хорошими механическими и технологическими свойствами. Их применяют в виде тонкого слоя, нанесенного на стальное основание, т.е. в виде биметаллического материала..

*Металлокерамические сплавы* получают прессованием и спеканием порошков бронзы или железа с графитом (1-4%). Пористость сплава 15-30%. После спекания сплавы пропитывают минеральными маслами, смазками или маслографитовой эмульсией. Сплавы хорошо прирабатываются к валу, а наличие смазки в порах способствует снижению износа подшипника.

## 2.4. Материалы с высокими упругими свойствами

Пружинно-рессорные стали.

Эти стали подразделяются на 2 группы: стали общего и специального назначения.

К ним предъявляется достаточно широкий спектр требований, главные из которых - повышенный предел упругости и высокая усталостная прочность. Для сталей специального назначения предъявляются требования по коррозионным свойствам, теплостойкости, немагнитности, повышенным демпфирующим свойствам и др.

Пружинно-рессорные стали общего назначения - это стали углеродистые с содержанием углерода 0,5..0,85% (сталь 65, 70, 75, 85), малолегированные (сталь 60Г, 65Г, 70Г, 50С2А, 60С2А, 50ХФА, 65С2ВА и др.). Химический состав этих сталей регламентирован ГОСТ 14959-79.

Пружины изготавливают витыми из проволоки, ленточными, тарельчатыми, а рессоры – из полосы соответствующего профиля.

Используются пружины и рессоры весьма широко: в автомобиле, например, их не менее 100, в самолете – тысячи.

Цилиндрические пружины из проволоки навивают на автоматах из патентованной проволоки. Патентирование – это изотермическая закалка в потоке, далее возможна холодная пластическая деформация волочением с отжигом 20 - 30% и отпуск 350..4500С на твердость 400 - 450 НВ. Схема такого процесса представлена на рис.24.

Такой процесс обработки осуществляется на специальных поточных линиях.

Массивные пружины (например, подвеска автомобиля) упрочняют закалкой с последующим средним отпуском.

Особенности обработки рессор для обеспечения необходимой кривизны заключаются в том, что их закалку осуществляют в специальных закалочных прессах, что исключает деформации, поводки.

Режим термической обработки рессоры автомобиля ГАЗ-24 из стали 65Г представлен ниже.

1. Закалка от 8300С, (выдержка 15') в масле, в прессе.
2. Отпуск при 4500С, 2 ч.

При этом в целях предотвращения деформаций закалку проводят в специальных прессах.

Пружинно-рессорные стали специального назначения подразделяют на следующие группы:

нержавеющие: 40Х13, 40Х14Ф, 65Х13 (ГОСТ 5632-72) – упрочняемые закалкой от

10000С в масле с последующим средним отпуском (400..5000С). Высокая температура нагрева под закалку необходима для растворения карбидов хрома Cr<sub>4</sub>C и получения перед охлаждением при закалке однородного аустенита;

- жаростойкие и теплостойкие стали: 40X9C2, 40X10C2M, из которых изготавливают клапаны, клапанные пружины двигателей автомобилей, тракторов, танков, колосники, упрочняются закалкой от 10000С (масло) и отпуску при 450-5500С;

- высокопрочные мартенситно-старяющие стали: 07X16H4Б, 09X17H7Ю, 03X10H11M2Т. После закалки от 10000С эти стали имеют мартенситную структуру, но этот мартенсит мягок, так как углерода в нем мало (<0,10%). В этом состоянии изготавливают пружину навивкой или точением, далее пружину подвергают отпуску (старению) при 4800С, 2 ч и вследствие выделения дисперсных интерметаллидов, например Ni<sub>3</sub>Ti, NiAl, пружина упрочняется до HRC = 40..50 ед.

Следует отметить, что стали данной группы применяются не только для изготовления специальных пружин, но и в качестве конструкционных сталей в самых разных областях техники.

На работоспособность пружин и рессор существенное влияние оказывает состояние поверхности (уменьшение шероховатости и поверхностный наклеп повышают сопротивление усталости, обезуглероживание – снижает).

## 2.5. Материалы с малой плотностью

### Алюминий и сплавы на его основе.

Содержание алюминия в земной коре – около 7%.

#### Положительные свойства алюминия:

- дешевизна;
- хорошо отработанные технологии получения;
- низкий удельный вес (2,7 г/см<sup>3</sup>);
- высокая пластичность;
- высокая тепло- и электропроводность;
- коррозионная стойкость (наличие оксидного слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);

#### Отрицательные свойства алюминия:

- низкая прочность ( $\sigma_b = 100$  МПа);
- плохие литейные качества;
- требует специальных методов пайки и сварки;

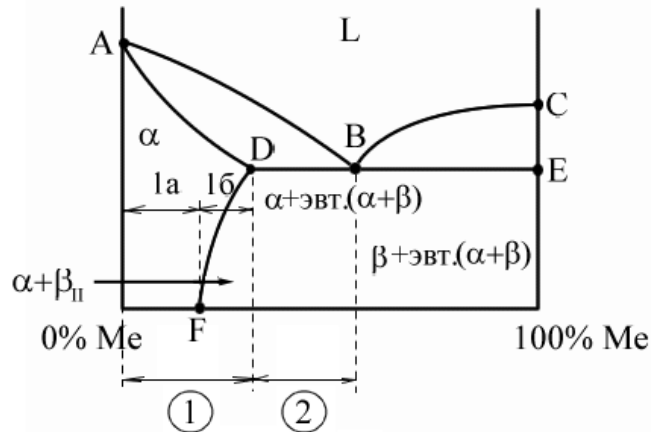
Алюминий применяется как конструкционный материал. Из него изготавливают слабонагруженные детали в химических аппаратах.

#### Маркировка алюминия:

Марка	A999	A95	A7	A0	A
Примеси, %	0,001	0,05	0,3	1,0	2,0
Al, %	99,999	99,95	99,7	99,0	98,0

Основные цели легирования алюминия: повышение прочности, улучшение литейных качеств. Основные легирующие металлы: медь, магний, марганец.

Обобщенная диаграмма состояния сплавов алюминия с легирующими элементами.



(1) – Деформируемые сплавы: (1a) – деформируемые неупрочняемые сплавы; (1б) – деформируемые упрочняемые сплавы; (2) – Литейные сплавы.

Деформируемые неупрочняемые сплавы: (Al + Mg, Mg < 6%; Al + Mn, Mn < 1,5%).

Особенность: Однородная структура, α твердый раствор легирующих элементов в алюминии. Цель легирования: повышение прочности ( $\sigma_B = 200$  МПа). Детали из таких сплавов сохраняют пластичность алюминия, используются для слабонагреваемых деталей, получаемых методом пластичного деформирования.

Маркировка: АМг6 (6% Mg); АМц (1% Mn).

Деформируемые упрочняемые сплавы: (Al + Cu + Mg – дюралюминий).

Особенность: Если в литом состоянии алюминий легирован медью и магнием, то сплав похож на предыдущий (при литье  $\sigma_B = 200$  МПа). Такой сплав подвергается термическому упрочнению. Процесс упрочнения состоит в следующем: закалка и старение. DF – линия предельной растворимости.

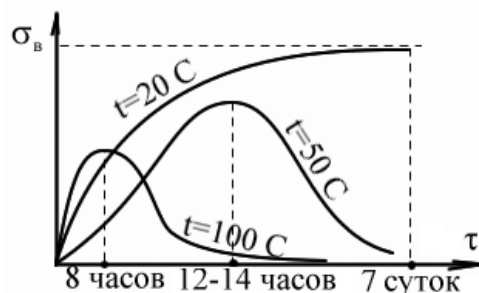
Закалка – нагрев выше температуры DF и охлаждение со скоростью выше критической; результат – образование пересыщенного твердого раствора меди в алюминии (после закалки  $\sigma_B = 250$  МПа).

Старение – выдержка при нормальной или повышенной температуре.

За счет диффузии атомы легирующего элемента перемещаются и образуют внутри кристаллические зоны с повышенной концентрацией, в результате эти зоны играют роль барьеров при деформации кристаллов ( $\sigma_B = 500\text{--}550$  МПа).

Старение при нормальной температуре – естественное старение.

Старение при повышенной температуре – искусственное старение.

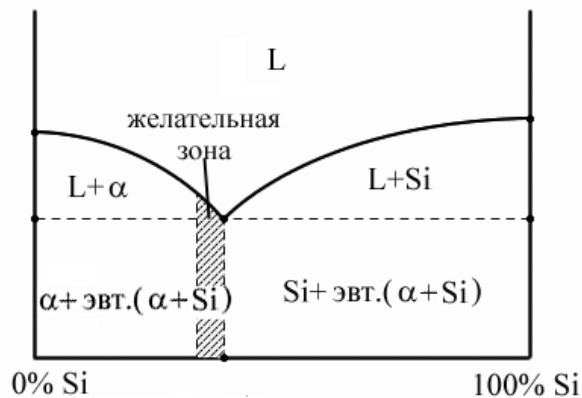


При искусственном старении увеличение времени выдержки может привести к образованию вторичных β- кристаллов и падению предела прочности до  $\sigma_B = 200$  МПа.

Маркировка: Д2; Д16 (2 и 16 в данном случае номера сплавов).

Литейные сплавы: (Al + Si, Si < 13% – силумин).

- Узкий температурный диапазон кристаллизации;
- Жидкотекучесть;
- Малая усадка;



Желательно брать сплав до линии эвтектики, но не желательно переходить вправо через нее.

В этой области:

- Крупные кристаллы эвтектики;
- Наличие в эвтектике хрупких и непрочных кристаллов кремния;

Поэтому у силумина: практически отсутствует пластичность,  $\sigma_b = 150-170$  Мпа. За счет модифицирования свойства сплава могут быть улучшены. Модификаторы (0,5% Na или Li) способствуют появлению мелкой эвтектики.

Маркировка: АЛ2 (алюминий литейный, 2 – номер сплава).

### Магний и его сплавы

Среди промышленных металлов магний обладает наименьшей плотностью ( $1700 \text{ кг/м}^3$ ). Магний и его сплавы неустойчивы против коррозии, при повышении температуры магний интенсивно окисляется и даже самовоспламеняется. Он обладает малой прочностью и пластичностью, поэтому как конструкционный материал чистый магний не используется. Для повышения химико-механических свойств в магниевые сплавы вводят алюминий, цинк, марганец и другие легирующие добавки.

Магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (ГОСТ 14957-76) и литейные (ГОСТ 2856-79). Первые маркируются буквами "МА", вторые - "МЛ". После букв указывается порядковый номер сплава в соответствующем ГОСТе. Например:

*МА1* - деформируемый магниевый сплав № 1;

*МЛ19* - литейный магниевый сплав № 19.

Магний - самый легкий из технических цветных металлов, его плотность  $1740 \text{ кг/м}^3$ , температура плавления  $650^\circ\text{C}$ . Технически чистый магний - непрочный металл с низкой тепло- и электропроводностью. Для улучшения прочностных свойств в магний добавляют алюминий, кремний, марганец, титан и, церий, цинк, цирконий и подвергают термообработке.

Для производства магния используют преимущественно карналлит

( $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), магнезит ( $\text{MgCO}_3$ ), доломит ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) и отходы ряда производств, например титанового. Карналлит подвергают обогащению, в процессе которого отделяют  $\text{KCl}$  и нерастворимые примеси путем перевода в водный  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{KCl}$ . После получения в вакуумкристаллизаторах искусственного карналлита его обезвоживают и электролитическим путем получают из него магний, который затем подвергают рафинированию. Технически чистый магний (первичный) содержит 99,8-99,9% магния. Маркировка и химический состав магниевых сплавов для фасонного литья и, слитков, предназначенных для обработки давлением, регламентируются стандартами.

**Свойства и применение магния.** В зависимости от способа получения изделий магниевые сплавы делят на литейные и деформируемые.

*Литейные магниевые сплавы* применяют для изготовления деталей литьем. Их маркируют буквами МЛ и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава, например МЛ5. Отливки из магниевых сплавов иногда подвергают закалке с последующим старением. Некоторые сплавы МЛ применяют для изготовления высоконагруженных деталей в авиационной промышленности: картеры, корпуса приборов, фермы шасси и т.п.

*Деформируемые магниевые сплавы* предназначены для изготовления полуфабрикатов (листов, прутков, профилей) обработкой давлением. Их маркируют буквами МА и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава, например МА5. Сплавы МА применяют для изготовления различных деталей в авиационной промышленности. Ввиду низкой коррозионной стойкости магниевых сплавов изделия и детали из них подвергают оксидированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

## **Материалы с высокой удельной прочностью**

### **Титан и его сплавы**

Титан - тугоплавкий металл с невысокой плотностью. Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструкционных сталей, поэтому при замене сталей титановыми сплавами можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40 %. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него можно изготовить сложные отливки, но обработка резанием затруднительна. Для получения сплавов с улучшенными свойствами его легируют алюминием, хромом, молибденом. Титан и его сплавы маркируют буквами "ВТ" и порядковым номером:

*ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ4, ВТ8, ВТ14.*

Пять титановых сплавов обозначены иначе:

*ОТ4, ОТ4-0, ОТ4-1, ПТ-7М, ПТ-3В.*

## **2.7. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды**

### **Коррозия электрохимическая и химическая.**

Разрушение металла под воздействием окружающей среды называют коррозией.

Коррозия помимо уничтожения металла отрицательно влияет на эксплуатационные характеристики деталей, содействуя всем видам разрушения.

Коррозия в зависимости от характера окружающей среды может быть химической и электрохимической.

Электрохимическая коррозия имеет место в водных растворах, а так же в обыкновенной атмосфере, где имеется влага.

Сущность этой коррозии в том, что ионы металла на поверхности детали, имея малую связь с глубинными ионами, легко отрываются от металла молекулами воды.



Металл, потеряв часть положительно заряженных частиц, ионов, заряжается отрицательно за счет избыточного количества оставшихся электронов. Одновременно слой воды, прилегающий к металлу, за счет ионов металла приобретает положительный заряд. Разность зарядов на границе металл – вода обуславливает скачок потенциала, который в процессе коррозии изменяется, увеличиваясь от растворения металла, и уменьшаясь от осаждения ионов из раствора на металле.

Если количество ионов переходящих в раствор и осаждающихся на металле одинаково, то скорости растворения и осаждения металла равны и процесс коррозии (разрушения металла) не происходит. Этому соответствует равновесный потенциал .

За нулевой потенциал принимают равновесный потенциал водородного иона в водном растворе при концентрации положительных ионов водорода, равной 1 моль ионов + на 1 литр.

Стандартные потенциалы других элементов измерены по отношению к водородному потенциалу.

Металлы, стандартный потенциал которых отрицательный – корродируют в воде, в которой растворен кислород тем активнее, чем отрицательней значение электрохимического потенциала.

Уходящие ионы металла, взаимодействуя с ионами , образуют гидроксиды, нерастворимые в воде, которые называют ржавчиной, а процесс их образования – ржавлением.

Гидроксид железа в присутствии кислорода, растворенного в воде, превращается в . Так как это нерастворимое соединение, то равновесный потенциал не может быть достигнут и коррозия будет продолжаться до полного разрушения.

В зависимости от структуры коррозия имеет разное проявление: при однородном металле – коррозия происходит равномерно по всей поверхности. При неоднородном металле – коррозия избирательная и называется точечной. Это явление наиболее опасно, так как приводит к быстрой порче всего изделия. Избирательная коррозия создает очаги концентрации напряжений, что содействует разрушению.

Химическая коррозия может происходить за счет взаимодействия металла с газовой средой при отсутствии влаги. Продуктом коррозии являются оксиды металла. Образуется пленка на поверхности металла толщиной в 1...2 периода кристаллической решетки. Этот слой изолирует металл от кислорода и препятствует дальнейшему окислению, защищает от электрохимической коррозии в воде. При создании коррозионно-стойких сплавов – сплав должен иметь повышенное значение электрохимического потенциала и быть по возможности однофазным.

Классификация коррозионно-стойких сталей и сплавов

Коррозионная стойкость может быть повышена, если содержание углерода свести до минимума, если ввести легирующий элемент, образующий с железом твердые растворы в таком количестве, при котором скачкообразно повысится электродный потенциал сплава.

Важнейшими коррозионно-стойкими техническими сплавами являются нержавеющие стали с повышенным содержанием хрома: хромистые и хромоникелевые

Хромистые стали.

Содержание хрома должно быть не менее 13% (13...18%).

Коррозионная стойкость объясняется образованием на поверхности защитной пленки оксида .

Углерод в нержавеющих сталях является нежелательным, так как он обедняет раствор хромом, связывая его в карбиды, и способствует получению двухфазного состояния. Чем ниже содержание углерода, тем выше коррозионная стойкость нержавеющих сталей.

Различают стали ферритного класса 08X13, 12X17, 08X25Т, 15X28. Стали с повышенным содержанием хрома не имеют фазовых превращений в твердом состоянии и поэтому не могут быть подвергнуты закалке. Значительным недостатком ферритных хромистых сталей является повышенная хрупкость из-за крупнокристаллической структуры. Эти стали склонны к межкристаллитной коррозии (по границам зерен) из-за обеднения хромом границ зерен. Для избежания этого вводят небольшое количество титана. Межкристаллитная коррозия обусловлена тем, что часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом и образует карбиды. Концентрация хрома в твердом растворе у границ становится меньше 13% и сталь приобретает отрицательный потенциал.

Из-за склонности к росту зерна ферритные стали требуют строгих режимов сварки и интенсивного охлаждения зоны сварного шва. Недостатком является и склонность к охрупчиванию при нагреве в интервале температур 450...500оС

Из ферритных сталей изготавливают оборудование азотно-кислотных заводов (емкости, трубы).

Для повышения механических свойств ферритных хромистых сталей в них добавляют 2...3 % никеля. Стали 10X13НЗ, 12X17Н2 используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах.

После закалки от температуры 1000оС и отпуска при 700...750оС предел текучести сталей составляет 1000 МПа.

Термическую обработку для ферритных сталей проводят для получения структуры более однородного твердого раствора, что увеличивает коррозионную стойкость.

Стали мартенситного класса 20X13, 30X13, 40X13. После закалки и отпуска при 180...250оС стали 30X13, 40X13 имеют твердость 50...60 HRC и используются для

изготовления режущего инструмента (хирургического), пружин для работы при температуре 400...450о, предметов домашнего обихода.

Стали аустенитного класса – высоколегированные хромоникелевые стали.

Никель – аустенитообразующий элемент, сильно понижающий критические точки превращения. После охлаждения на воздухе до комнатной температуры имеет структуру аустенита.

Нержавеющие стали аустенитного класса 04X18H10, 12X18H9T имеют более высокую коррозионную стойкость, лучшие технологические свойства по сравнению с хромистыми нержавеющими сталями, лучше свариваются. Они сохраняют прочность до более высоких температур, менее склонны к росту зерна при нагреве и не теряют пластичности при низких температурах.

Хромоникелевые стали коррозионностойки в окислительных средах. Основным элементом является хром, никель только повышает коррозионную стойкость.

Для большей гомогенности хромоникелевые стали подвергают закалке с температуры 1050...1100оС в воде. При нагреве происходит растворение карбидов хрома в аустените. Выделение их из аустенита при закалке исключено, так как скорость охлаждения велика. Получают предел прочности = 500...600 МПа, и высокие характеристики пластичности, относительное удлинение = 35...45%.

Упрочняют аустенитные стали холодной пластической деформацией, что вызывает эффект наклепа. Предел текучести при этом может достигнуть значений 1000...1200 МПа, а предел прочности – 1200...1400 МПа.

Для уменьшения дефицитного никеля часть его заменяют марганцем (сталь 40X14Г14Н3Т) или азотом (сталь 10X20Н4АГ11).

Аустенитно-ферритные стали 12Х21Н5Т, 08Х22Н6Т являются заменителями хромоникелевых сталей с целью экономии никеля.

Свойства сталей зависят от соотношения ферритной и аустенитной фаз (оптимальные свойства получают при соотношении – Ф:А=1:1 ). Термическая обработка сталей включает закалку от температуры 1100...1150оС и отпуск-старение при температуре 500...750оС.

Аустенитно-ферритные стали не подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением: трещины могут возникать только на аустенитных участках, но ферритные участки задерживают их развитие. При комнатных температурах аустенитно-ферритные стали имеют твердость и прочность выше, а пластичность и ударную вязкость ниже, чем стали аустенитного класса.

Кроме нержавеющей сталей в промышленности применяют коррозионно-стойкие сплавы – это сплавы на никелевой основе. Сплавы типа хастеллой содержат до 80 % никеля, другим элементом является молибден в количестве до 15...30 %. Сплавы являются коррозионно-стойкими в особо агрессивных средах (кипящая фосфорная или соляная кислота), обладают высокими механическими свойствами. После термической обработки – закалки и старения при температуре 800оС – сплавы имеют предел прочности МПа, и

твердость . Недостатком является склонность к межкристаллической коррозии, поэтому содержание углерода в этих сплавах должно быть минимальным.

Жаростойкость, жаростойкие стали и сплавы.

Жаростойкость (окалиностойкость) – это способность металлов и сплавов сопротивляться газовой коррозии при высоких температурах в течение длительного времени.

Если изделие работает в окислительной газовой среде при температуре 500..550оС без больших нагрузок, то достаточно, чтобы они были только жаростойкими (например, детали нагревательных печей).

Сплавы на основе железа при температурах выше 570оС интенсивно окисляются, так как образующаяся в этих условиях на поверхности металла оксид железа (вюстит) с простой решеткой, имеющей дефицит атомов кислорода (твердый раствор вычитания), не препятствует диффузии кислорода и металла. Происходит интенсивное образование хрупкой окалины.

Для повышения жаростойкости в состав стали вводят элементы, которые образуют с кислородом оксиды с плотным строением кристаллической решетки (хром, кремний, алюминий).

Степень легированности стали, для предотвращения окисления, зависит от температуры. Влияние хрома на жаростойкость хромистой стали показано на рис.20.2.

Чем выше содержание хрома, тем более окалиностойки стали (например, сталь 15Х25Т является окалиностойкой до температуры 1100...1150оС).

Высокой жаростойкостью обладают сильхромы, сплавы на основе никеля – нихромы, стали 08Х17Т, 36Х18Н25С2, 15Х6СЮ.

Жаропрочность, жаропрочные стали и сплавы

Жаропрочность – это способность металла сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах.

Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести.

Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочности, ползучесть.

Кратковременная прочность определяется с помощью испытаний на растяжение разрывных образцов. Образцы помещают в печь и испытывают при заданной температуре. Обозначают кратковременную прочность  $\sigma$ , например  $300^{\circ}\text{C} = 300\text{МПа}$ .

Прочность зависит от продолжительности испытаний.

Пределом длительной прочности называется максимальное напряжение, которое вызывает разрушение образца при заданной температуре за определенное время.

Например  $\sigma = 200\text{МПа}$ , верхний индекс означает температуру испытаний, а нижний – заданную продолжительность испытания в часах. Для котельных установок требуется невысокое значение прочности, но в течение нескольких лет.

Ползучесть – свойство металла медленно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при постоянной температуре.

При испытаниях образцы помещают в печь с заданной температурой и прикладывают постоянную нагрузку. Измеряют деформацию индикаторами.

При обычной температуре и напряжениях выше предела упругости ползучесть не наблюдается, а при температуре выше  $0,6T_{\text{пл}}$ , когда протекают процессы разупрочнения, и при напряжениях выше предела упругости наблюдается ползучесть.

Для углеродистых сталей ползучесть наблюдается при нагреве выше  $400^{\circ}\text{C}$ .

Предел ползучести – напряжение, которое за определенное время при заданной температуре вызывает заданное суммарное удлинение или заданную скорость деформации.

Например  $\sigma_{\text{МПа}}$ , где верхний индекс – температура испытания  $^{\circ}\text{C}$ , первый нижний индекс – заданное суммарное удлинение в процентах, второй – заданная продолжительность испытания в часах.

## Классификация жаропрочных сталей и сплавов

В качестве современных жаропрочных материалов можно отметить перлитные, мартенситные и аустенитные жаропрочные стали, никелевые и кобальтоавые жаропрочные сплавы, тугоплавкие металлы.

При температурах до  $300^{\circ}\text{C}$  обычные конструкционные стали имеют высокую прочность, нет необходимости использовать высоколегированные стали.

Для работы в интервале температур  $350 \dots 500^{\circ}\text{C}$  применяют легированные стали перлитного, ферритного и мартенситного классов.

Перлитные жаропрочные стали. К этой группе относятся котельные стали и силхромы. Эти стали применяются для изготовления деталей котельных агрегатов, паровых турбин,

двигателей внутреннего сгорания. Стали содержат относительно мало углерода. Легирование сталей хромом, молибденом и ванадием производится для повышения температуры рекристаллизации (марки 12Х1МФ, 20Х3МФ). Используются в закаленном и высокоотпущенном состоянии. Иногда закалку заменяют нормализацией. В результате этого образуются пластинчатые продукты превращения аустенита, которые обеспечивают более высокую жаропрочность. Предел ползучести этих сталей должен обеспечить остаточную деформацию в пределах 1 % за время 10000...100000 ч работы.

Перлитные стали обладают удовлетворительной свариваемостью, поэтому используются для сварных конструкций (например, трубы пароперегревателей).

Для деталей газовых турбин применяют сложнолегированные стали мартенситного класса 12Х2МФСР, 12Х2МФБ, 15Х12ВНМФ. Увеличение содержания хрома повышает жаростойкость сталей. Хром, вольфрам, молибден и ванадий повышают температуру рекристаллизации, образуются карбиды, повышающие прочность после термической обработки. Термическая обработка состоит из закалки от температур выше 1000оС в масле или на воздухе и высокого отпуска при температурах выше температуры эксплуатации.

Для изготовления жаропрочных деталей, не требующих сварки (клапаны двигателей внутреннего сгорания), применяются хромокремнистые стали – сильхромы: 40Х10С2М, 40Х9С2, Х6С.

Жаропрочные свойства растут с увеличением степени легированности. Сильхромы подвергаются закалке от температуры около 1000оС и отпуску при температуре 720...780оС.

При рабочих температурах 500...700оС применяются стали аустенитного класса. Из этих сталей изготавливают клапаны двигателей, лопатки газовых турбин, сопловые аппараты реактивных двигателей и т.д.

Основными жаропрочными аустенитными сталями являются хромоникелевые стали, дополнительно легированные вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Стали содержат 15...20 % хрома и 10...20 % никеля. Обладают жаропрочностью и жаростойкостью, пластичны, хорошо свариваются, но затруднена обработка резанием и давлением, охрупчиваются в интервале температур около 600оС, из-за выделения по границам различных фаз.

По структуре стали подразделяются на две группы:

1. Аустенитные стали с гомогенной структурой 17Х18Н9, 09Х14Н19В2БР1, 12Х18Н12Т. Содержание углерода в этих сталях минимальное. Для создания большей однородности аустенита стали подвергаются закалке с 1050...1100оС в воде, затем для стабилизации структуры – отпуску при 750оС.

2. Аустенитные стали с гетерогенной структурой 37Х12Н8Г8МФБ, 10Х11Н20ТЗР.

Термическая обработка сталей включает закалку с 1050...1100оС. После закалки старение при температуре выше эксплуатационной (600...750оС). В процессе выдержки при этих температурах в дисперсном виде выделяются карбиды, карбонитриды, вследствие чего прочность стали повышается.

Детали, работающие при температурах 700...900оС, изготавливают из сплавов на основе никеля и кобальта (например, турбины реактивных двигателей).

Никелевые сплавы преимущественно применяют в деформированном виде. Они содержат более 55 % никеля и минимальное количество углерода (0,06...0,12 %). По жаропрочным свойствам превосходят лучшие жаропрочные стали.

По структуре никелевые сплавы разделяют на гомогенные (нихромы) и гетерогенные (нимоники).

Нихромы. Основой этих сплавов является никель, а основным легирующим элементом – хром (ХН60Ю, ХН78Т).

Нихромы не обладают высокой жаропрочностью, но они очень жаростойки. Их применяют для малонагруженных деталей, работающих в окислительных средах, в том числе и для нагревательных элементов.

Нимоники являются четвертными сплавами никель – хром (около 20 %) – титан (около 2%) – алюминий (около 1 %) (ХН77ТЮ, ХН70МВТЮБ, ХН55ВМТФКЮ). Используются только в термически обработанном состоянии. Термическая обработка состоит из закалки с 1050...1150оС на воздухе и отпуска – старения при 600...800оС.

Увеличение жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов достигается упрочнением твердого раствора введением кобальта, молибдена, вольфрама.

Основными материалами, которые могут работать при температурах выше 900оС (до 2500оС), являются сплавы на основе тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена, ниобия и других.

Температуры плавления основных тугоплавких металлов: вольфрам – 3400оС, тантал – 3000оС, молибден – 2640оС, ниобий – 2415оС, хром – 1900оС.

Высокая жаропрочность таких металлов обусловлена большими силами межатомных связей в кристаллической решетке и высокими температурами рекристаллизации.

Наиболее часто применяют сплавы на основе молибдена. В качестве легирующих добавок в сплавы вводят титан, цирконий, ниобий. С целью защиты от окисления проводят силицирование, на поверхности сплавов образуется слой MoSi<sub>2</sub> толщиной 0,03...0,04 мм. При температуре 1700оС силицированные детали могут работать 30 часов.

Вольфрам – наиболее тугоплавкий металл. Его используют в качестве легирующего элемента в сталях и сплавах различного назначения, в электротехнике и электронике (нити накала, нагреватели в вакуумных приборах).

В качестве легирующих элементов к вольфраму добавляют молибден, рений, тантал. Сплавы вольфрама с рением сохраняют пластичность до –196оС и имеют предел прочности 150 МПа при температуре 1800оС.

Для сплавов на основе вольфрама характерна низкая жаростойкость, пленки образующихся оксидов превышают объем металла более, чем в три раза, поэтому они растрескиваются и отслаиваются. Изготавливают изделия, работающие в вакууме).

## 2.8. Неметаллические материалы

### Полимеры.

Типы межатомных связей. Структура термопластичных и термореактивных полимеров. Реакции образования полимеров. Полимеры – это сложные высокомолекулярные соединения. У полимеров нет определённой температуры плавления. Отличие в степени насыщения. Предела насыщения не существует. Полимеры обладают очень высокой вязкостью, высокой молекулярной массой. Полимеры – это макромолекулы, которые состоят из большого числа небольших молекул, которые называются мономерами. Бутадиен – мономер. Бутадиен + ... + бутадиен (4000 раз) > полибутадиен (искусственный каучук)  $[-CH_2-CH=CH-(n)CH_2-]$ , n – степень полимеризации. Полимеры получают либо полимеризацией, либо поликонденсацией. Процесс, при котором полимер получается вследствие соединения мономеров друг с другом, наз. полимеризацией. Поликонденсация – это процесс образования полимера в результате хим. реакции исходных веществ с получением нового в-ва, структура которого отличается от исходной. Термопласты, при повышении температуры размягчаются, им придаётся опред. форма, которую они сохраняют при охлаждении, получают полимеризацией. Реактопласты, при повышении температуры претерпевают хим. изменения и превращение в неплавкую массу, получают полимеризацией и поликонденсацией. Полимеры по структуре макромолекул:  $[pic][pic]$ .

### Механические свойства полимеров.

Состояние аморфной фазы и её влияние на свойства. Ориентационное упрочнение. Свойства полимеров определяются: природой мономера, молекулярной массой полимера, структурой полимера (кристаллический полимер или аморфный полимер), температурой нагрева. Есть пластическое и хрупкое разрушение. Фазовые переходы аморфных полимеров: стеклообразное состояние > ( $t$  стеклования) высокоэластическое состояние (каучук) > ( $t$  текучести) расплав полимера. В стеклообразном состоянии полимеры не обладают ни сегментальной, ни молекулярной подвижностью. Это состояние хар-ся только колебательным движением атомов. Стеклообразное состояние – это твёрдое и хрупкое состояние. В высокоэластическом состоянии полимер обладает сегментальной подвижностью, при этом сегменты цепи обладают значительной свободой в движении, но в то же время перемещение макромолекул запрещено. В высокоэластическом состоянии полимеры похожи на жидкости с включёнными в них твёрдоподобными областями. Это состояние хар-ся высокой вязкостью и претерпевает вязко-упругую деформацию.  $t$  перехода из стеклообр. сост. в высокоэласт. наз.  $t$  стеклования. При дальнейшем нагревании полимер начинает течь,  $t$ , при которой происходит переход из высокоэласт. сост. в вязко-текучее, наз.  $t$  текучести. Из-за отсутствия в полимерах истинной кристал. решётки процесса плавления как такового в аморфных полимерах не существует. Ориентационное упрочнение справедливо как для аморфных, так и для кристаллических полимеров. Оно состоит в том, что все макромолекулы ориентированы в одном направлении и имеют в этом направлении большую прочность и больший модуль упругости (E, МПа, хар-ет жёсткость системы). Оно достигается вытяжкой либо в одном направлении, либо в двух направлениях.

### Старение полимеров.



Старение полимеров – это самопроизвольное, необратимое изменение св-в полимера вследствие разрушения межмолекулярных связей в цепочках макромолекул. При старении происходят реакции, вызывающие: деструкцию (разложение) полимера, структурные изменения (увелич. хрупкость, уменьшение прочности, понижение эластичности). При ионизирующем излучении или под действием света процессы деструкции ускоряются. Для замедления старения вводят стабилизаторы.

### **Пластмассы. Классификация и состав пластических масс.**

Пластмассы – это органические вещества, связующими которых являются полимеры. Они состоят из: 1) связующее (матрица) - полимеры; 2) наполнители (низкомолекулярные в-ва), их вводят для придания специальных св-в: понижения усадки, повышения мех. св-в (твёрдость НВ,  $\rho$ ,  $\gamma$ ). Наполнители: порошковые (сажа, графит, древесная мука), волокниты (волокна, стекловолкна, асбоволкна), слоистые (геминакс, текстолит), стеклоткань (стеклотекстолиты), газовые (газонаполненные: поропласты, пенопласты, сотопласты); 3) пластификаторы – жидкие вещества, для повышения эластичности материала; 4) отвердители; 5) краски (оксиды металлов), их вводят для изменения цвета пластмасс. Пластмассы: термопластичные, термореактивные и газонаполненные.

Термопластичные пластмассы. Свойства, область применения (на примере полиэтилена и фторопласта).

1. Полиэтилен (ПЭ). Состав мономера:  $[-CH_2-CH_2-]_n$ . Этилен  $[-CH_2-CH_2-]$  при комнатной  $t$  находится в газовом состоянии,  $t$  кипения составляет  $-140^\circ C$ . ПЭ бывает двух видов: 1) Низкой плотности высокого давления ПЭНП (ПЭВД), разветвлённая структура, плотность  $\rho = 0,91-0,92$  г/см<sup>3</sup>,  $t_{\text{экспл}} = -70(120-140^\circ C)$ ,  $t_{\text{плавл}} = 110-125^\circ C$ ; 2) ПЭВП (ПЭНД), линейная структура,  $\rho = 0,96$  г/см<sup>3</sup>,  $t_{\text{экспл}} = -70(140-150^\circ C)$ ,  $t_{\text{плавл}} = 150^\circ C$ . Недостаток – старение ПЭ.

При воздействии ионизованного излучения увеличивается прочность материала и теплостойкость. Применение: упаковочная плёнка, литьё бутылок, трубы, электроизоляционный кабель.

2. Фторопласт (ФП). Состав мономера:  $[-CF_2-CF_2-]_n$ . ФП обладает аморфной кристаллической структурой. Плотность  $\rho = 0,25$ ,  $t_{\text{экспл.}} = -269$  (  $+250^\circ C$ ). Химически стоек к действию растворителей. ФП обладает очень низким коэффициентом трения  $\mu = 0,04$ . Недостаток ФП: трудность его переработки. Применение: насосы, винтили, антифрикционные покрытия.

Термореактивные пластмассы. Свойства, область применения (на примере текстолитов).

Текстолит относят к слоистым пластикам. Связующее в этом полимере – это термореактивные смолы. Наполнители: хлопчатобумажные ткани. Среди всех слоистых пластиков этот материал обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки. Кроме этого хорошо сопротивляется раскалыванию. Применяют для зубчатых колёс и как вкладыши для подшипников. Температура эксплуатации:  $-60$  (  $60-80^\circ C$ ).

Газонаполненные пластмассы. Строение. Область применения.

Это гетерогенные (сост. из нескольких фаз) химически сложные системы,

состоящие из твёрдой и газообразной фаз. В качестве связывающего используются термопласты (или реактопласты), которые образуют стенки ячеек или пор. В качестве наполнителей используют газообразные в-ва. В зависимости от физической структуры газонаполненные пластмассы делят на пенопласты, поропласты и сотопласты. Пенопласт – система, в которой присутствуют замкнутая ячеистая структура, а газовый наполнитель изолирован от окр. среды тонкими слоями полимерного связующего. Замкнутая ячеистая структура обеспечивает высокие теплоизоляционные св-ва и хорошую плавучесть. Прочность таких материалов низкая и зависит от плотности материала.  $\rho = 20-300 \text{ кг/м}^3$ . Применяется для изоляции кабин, холодильников, рефрижераторов, труб (поропласт), в авиа-, кораблестроении, на ж/д транспорте. Поропласт – материал с открыто-пористой структурой. Применяется для впитывания жидкости.  $\rho = 130-500 \text{ кг/м}^3$ . Сотопласты – тонкие листовые материалы, выполненные в форме гофра, которые затем сшиваются в виде пчелиных сот. Материалом для гофров служат ткани, которые пропитываются различными связующими. Применение: тепло- и звукоизоляционные материалы (авиация), обладают радиопрозрачностью, используются для заполнения многослойных панелей в авиа- и судостроении.

### **Эластомеры и резины. Процесс вулканизации.**

Эластомеры – это материалы, которые при приложении нагрузки удлиняются, а при снятии нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму. Цепные макромолекулы под действием нагрузки распрямляются, а при снятии нагрузки сворачиваются. Для данного состояния характерна сегментальная подвижность, кроме этого, данные полимеры должны обладать определённым межцепным свободным пространством для осуществления движения сегментов. Наиболее распространённым эластомером явл. каучук С5Н8. На основе каучука получают резины. Молекулы чистого каучука слабо связаны друг с другом, поэтому легко отделяются одна от другой. В результате этого каучук прилипает к предметам, с которыми он взаимодействует. Для устранения этого дефекта применяют вулканизацию. Вулканизация – нагрев каучука вместе с серой. При нагреве сера разрывает двойные связи в молекуле каучука и образуются мостики между линейными цепочками каучука. Свойства каучука зависят от содержания серы, до 30% S – твёрдый каучук (шайбы).

Пластмассы как конструкционный материал.

Полиэтилен, фторопласт, текстолит. Малая плотность материала  $\rho = 1-2 \text{ т/м}^3$ . Низкие значения модуля упругости и других мех. св-в. Низкая теплопроводность. Хорошие изоляционные свойства (электро, звуко, тепло). Для них характерно старение материалов и ползучесть.

### **Стекло. Строение. Классификация по составу. Влияние состава на свойства. Область применения.**

Неорганическое стекло – химически сложные аморфные изотропные материалы, которые обладают свойствами хрупкого твёрдого тела. Стёкла состоят: 1. Стеклообразователи – основа: а)  $\text{SiO}_2$  – силикатное стекло, если  $\text{SiO}_2 > 99\%$ , то это кварцевое стекло; б)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  – алюмосиликатное стекло; в)  $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  – боросиликатное стекло; г)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  – алюмоборосиликатное стекло; 2. Модификаторы, вводятся для придания стеклу определённых св-в. Ввод оксидов щелочноземельных металлов (I, II группа: Na, K) уменьшает температуру размягчения. Оксиды хрома, железа, ванадия

придают стеклу определённые цвета. Оксиды свинца увеличивают коэффициент преломления. По количеству модификаторов стекла бывают трёх типов: щёлочные – стекла, в которых содержится модификаторов до 20-30%, бесщёлочные – до 5% модификаторов, кварцевое стекло – модификаторов нет; 3. Компенсаторы, подавляют негативное воздействие модификаторов. Стёкла в автомобилях, в стеклопластиках, оптика, теплопроводимость низкая, не растворимы в кислотах (кроме плавиковой HF) и щёлочах.

Механические свойства стекла. Методы повышения прочности.

Свойства стёкол: Стёкла отличаются высокой твёрдостью и пределом прочности. Теоретически предел прочности достигает 10-12 ГПа. Модуль упругости  $E = 70$  ГПа. Твёрдость по Виккерсу  $HV \sim 750$  кгс/мм<sup>2</sup>. Практически предел прочности составляет 50-100 МПа. Низкий  $\alpha$  объясняется след. факторами: высокий коэффициент линейного расширения. Поэтому, когда стекло остывает, на его поверхности образуются растягивающие напряжения. Это приводит к появлению трещин на поверхности. Кроме этого, стекло является хорошим теплоизолятором, что также приводит к образованию трещин. Стекло не сопротивляется динамическим нагрузкам.

Способы упрочнения стёкол: 1) травление с целью удаления дефектного поверхностного слоя. Предел прочности увеличивается до 3000 МПа. Но этот способ малоэффективен, т.к. в дальнейшем стекло взаимодействует с абразивными частицами или др. твёрдыми материалами; 2) создание на поверхности сжимающих напряжений. Это достигается путём закалки. Идёт нагрев до определённой температуры, а затем производят охлаждение в заданном режиме (температура нагревания, охлаждение и время выдержки). Предел прочности в этом случае увеличивается до 1000-1500 МПа; 3) нанесение на поверхность стёкол полимерных материалов. Полимерное связующее склеивает микротрещины на поверхности стекла.

### **Ситаллы.**

Ситаллы – частично закристаллизовавшиеся стёкла. По структуре от обычных стёкол отличаются тем, что в них водят затравки (это соли серебра, золота, меди, свинца и т.д.). Эти стёкла непрозрачны. По способу получения ситаллы различаются на фотоситаллы и термоситаллы.

## **Материалы с особыми физическими свойствами Материалы с особыми магнитными свойствами**

По характеру взаимодействия с магнитным полем все материалы принято делить на слабо взаимодействующие и сильно взаимодействующие материалы. Мерой взаимодействия материалов с магнитным полем является магнитная индукция (**B**), то есть средняя напряженность магнитного поля внутри материала при нахождении во внешнем магнитном поле напряженностью **H**. Магнитная индукция является суперпозицией напряженности внешнего магнитного поля и намагниченности:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} \quad (3.1)$$

где **M** - намагниченность материала, то есть отношение векторной суммы элементарных магнитных моментов к объему материала.

У веществ слабо взаимодействующих с полем намагниченность невелика  $\mathbf{B} \approx \mathbf{H}$ . К таким веществам относятся диамагнетики и парамагнетики. В диамагнетиках индукция

ниже напряженности внешнего поля, а в парамагнетиках индукция выше напряженности внешнего поля. У веществ сильно взаимодействующих с полем намагничённость велика. К таким веществам относятся ферромагнетики, антиферромагнетики (ферриты), суперпарамагнетики, спиновые стекла. Для краткости изложения рассмотрим наиболее промышленно важные материалы - ферромагнетики и ферриты.

### Природа ферромагнетизма.

Согласно гипотезе Ампера внутри атомов и молекул текут молекулярные токи, а следовательно, имеются магнитные диполи. По сути дела гипотеза Ампера блестяще подтвердилась, когда была понята электронная структура атома. Движение электронов вокруг ядер атомов является элементарными токами, создающими магнитные моменты. Более строгое рассмотрение элементарных магнитных моментов свидетельствует о том, что у атома имеются магнитные моменты ядер, орбитальные магнитные моменты электронов и спиновые магнитные моменты электронов. Магнитные моменты ядер атомов ничтожно малы по сравнению с магнитными моментами электронов, поэтому их влиянием на магнитные свойства материалов можно пренебречь. Орбитальные магнитные моменты электронов также заметно меньше спиновых магнитных моментов. Поэтому магнитные свойства материалов в основном определяются спиновыми магнитными моментами электронов.

Согласно правилу Хунда заполнение электронных орбиталей производится таким образом, чтобы магнитный и механический моменты электронов были максимальны. У переходных металлов внутренние электронные орбитали (3d или 5f) заполнены не полностью. Поэтому у атомов таких элементов имеется значительный магнитный момент.

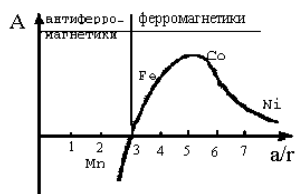
В том случае, когда внутренние орбитали атомов заполнены, не полностью происходит обмен электронами незаполненных орбиталей соседних атомов. При этом энергия атомов понижается на величину обменной энергии ( $U_{обм}$ ). Величина обменной энергии зависит от квантовомеханической функции - обменного интеграла (A) и взаимной ориентации суммарных спиновых моментов соседних атомов:

$$U_{обм} = -A (s_1 s_2) \quad (3.2)$$

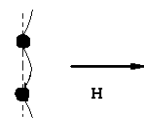
Обменное взаимодействие может привести к взаимной ориентации магнитных моментов соседних атомов. В зависимости от ориентации магнитных моментов соседних атомов все вещества делят на ферромагнетики, антиферромагнетики и парамагнетики. Рассмотрим влияние обменного взаимодействия на ориентацию магнитных моментов соседних атомов подробнее.

Обменный интеграл зависит от расстояния между соседними атомами (a) и от радиуса незаполненных орбиталей (r) или в обобщенном виде от отношения (a/r).

Зависимость обменного интеграла от отношения a/r показана на рисунке 46.



При отношении расстояния между атомами к радиусу незаполненных оболочек большем 3 обменный интеграл положителен и для того чтобы обменная энергия вычиталась из общей энергии системы необходимо параллельная ориентация спиновых магнитных моментов соседних атомов. Такие вещества являются ферромагнетиками. При отношении a/r меньшем 3 обменный интеграл отрицателен и для того чтобы энергия системы была минимальной скалярное произведение магнитных моментов соседних атомов должно быть отрицательным. В этом случае магнитные моменты соседних атомов антипараллельны и такие вещества принято называть антиферромагнетиками. При равенстве отношения a/r 3 обменная энергия нулевая и взаимная ориентация магнитных моментов произвольна. Такие вещества являются парамагнетиками.

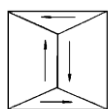


Таким образом, для того чтобы вещество было ферромагнитным необходимо выполнение двух условий:

- 1). В состав материала должны входить атомы переходных металлов, обладающих большими магнитными моментами;
- 2). Отношение расстояния между атомами к радиусу незаполненных электронных оболочек должно превышать 3.

### Доменная структура ферромагнетиков.

Магнитные моменты соседних атомов ферромагнетиков ориентированы параллельно, однако в кристалле достаточно большой величины все магнитные моменты не могут быть ориентированы параллельно. В противном случае вокруг кристалла появится магнитное поле и энергия системы возрастет. Для снижения энергии системы кристалл разбивается на домены - области спонтанной намагниченности, причем разбиение производится таким образом, чтобы внешнее магнитное поле отсутствовало (рис. 47).



Важно отметить, что на границе доменов магнитные моменты атомов не могут быть антипараллельными. В противном случае энергия атомов повысится на величину обменной энергии. Таким образом, на границе доменов происходит постепенный поворот магнитных моментов атомов из одного положения в другое. Тем не менее, энергия атомов на границах доменов оказывается повышенной. Докажем это.

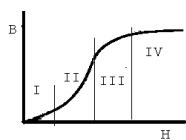
Как отмечалось выше, обменное взаимодействие соседних атомов ферромагнитных материалов приводит к снижению энергии системы на величину:  $U_{обм} = -A (\mathbf{s}_1\mathbf{s}_2)$ , где  $A$  - обменный интеграл зависящий от отношения  $a/r$ . Поскольку расстояние между атомами по различным кристаллографическим направлениям различно, то и значения обменной энергии по различным направлениям различно. Таким образом, в ферромагнетиках появляется **магнитная анизотропия**. Очевидно, что внутри доменов магнитные моменты атомов ориентированы вдоль наиболее энергетически выгодных направлений. Такие направления принято называть направлениями легкого намагничивания. На границах доменов магнитные моменты ориентированы в менее выгодных магнитотвердых направлениях.

Итак, мы доказали что на границах доменов энергия атомов повышена. Следовательно, для того чтобы энергия материала была минимальной необходимо, чтобы протяженность границ доменов была минимальной, или размер доменов был как можно большим.

В то же время, росту доменов препятствует **магнитострикция** - деформация кристаллической решетки под воздействием магнитного поля. Обменное взаимодействие между атомами приводит к появлению дополнительных сил взаимодействия и кристаллическая решетка деформируется. Рост домена ведет к увеличению напряженности локального поля внутри домена и возрастанию деформации решетки. При этом энергия системы увеличивается. Таким образом, противоборство магнитной анизотропии и магнитострикции приводит к установлению оптимального размера магнитных доменов.

### Кривая намагничивания

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле векторы намагниченности каких-либо доменов окажутся совпавшими или близкими к совпадению с вектором напряжённости внешнего магнитного поля. Энергия таких доменов будет минимальной, тогда как энергия всех остальных доменов повысится. Для того чтобы понизить энергию системы благоприятно ориентированные домены растут. При этом увеличивается намагниченность ( $M$ ) и, следовательно, возрастает индукция ( $B$ ).



Зависимость индукции от напряженности внешнего магнитного поля принято называть кривой намагничивания (рис. 48).

На начальном участке кривой намагничивания увеличение напряженности внешнего поля ведет к незначительному росту индукции, причем при отключении внешнего поля индукция снижается до нуля. Этот участок принято называть участком обратимого намагничивания или областью Релея (I).

На втором участке незначительное изменение напряженности внешнего поля ведет к заметным изменениям индукции. Этот участок принято называть участком резкого роста индукции или областью скачков Баркгаузена (II).

На третьем участке кривой намагничивания зависимость индукции от напряженности внешнего поля вновь ослабевает. Этот участок называют участком замедленного намагничивания или областью намагничивания за счет процессов вращения (III).

На четвертом участке индукция растет пропорционально напряженности магнитного поля. Этот участок называют участком насыщения или областью парапроцесса (IV).

Для понимания природы изменения индукции при увеличении напряженности внешнего поля необходимо, прежде всего, разобраться в том, как границы доменов взаимодействуют со структурными особенностями материала.

В любом материале присутствуют дислокации, в области прилегающей к дислокации кристаллическая решетка материала искажена. В том случае, если дислокация находится внутри домена, магнитные моменты атомов вблизи дислокации оказываются направленными в направлении трудного намагничивания. Если дислокация находится на границе доменов, где происходит постепенный поворот магнитных моментов от одного направления легкого намагничивания к другому, искажение кристаллической решетки приводит к тому, что часть магнитных моментов атомов оказываются направленными в направлении легкого намагничивания. Следовательно, дислокациям энергетически выгодно находится на границах доменов.

При наличии в материале частиц чужеродных не ферромагнитных фаз границам доменов энергетически выгодно проходить через частицы этих фаз. Это связано с тем, что чужеродные частицы «вырезают» часть границы домена следовательно, протяженность и энергия границы домена снижается.

Таким образом, границы доменов притягиваются к структурным неоднородностям материала - дислокациям и частицам чужеродных фаз.

При попадании ферромагнетика во внешнее магнитное поле начинается рост благоприятно ориентированных доменов, то есть их границы смещаются. Однако структурные неоднородности материала препятствуют смещению границ доменов (то есть являются точками закрепления границ доменов) и границы изгибаются под действием внешнего поля.

Изгиб границ энергетически не выгоден, поскольку приводит к увеличению их поверхности, поэтому при отключении внешнего поля границы вновь выпрямляются и намагниченность исчезает. Таким образом, при малых значениях напряженности внешнего поля реализуется участок обратимого намагничивания или область Релея.

При дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля изгиб границ становится настолько большим, что энергия изогнутых границ совпадает с энергией границ оторвавшихся от точек закрепления. Дальнейший изгиб границ становится энергетически невыгодным, границы отрываются от точек закрепления и скачками перемещаются до следующего ряда точек закрепления. При этом наблюдается участок резкого роста индукции или область скачков Баркгаузена.

После того как смещение границ доменов приведет к тому, что благоприятно ориентированные домены заполнят весь объем кристалла, и начинается рост

намагниченности за счет поворота магнитных моментов атомов из направления легкого намагничивания в направления трудного намагничивания. Поскольку поворот магнитных моментов энергетически не выгоден, то для его осуществления требуется высокая напряженность внешнего поля. Таким образом, реализуется участок замедленного намагничивания или область намагничивания за счет процессов вращения.

Наконец, после того как все магнитные моменты атомов будут направлены по внешнему полю, прироста намагниченности происходить не может, а рост индукции происходит за счет роста напряженности магнитного поля как в парамагнетиках. Наблюдается участок насыщения или область парапроцесса.

Если после намагничивания ферромагнетика до насыщения отключить внешнее магнитное поле намагниченность ферромагнетика полностью не снимается и сохраняется остаточная индукция ( $B_r$ ). Это вызвано тем, что дефекты структуры, препятствующие перемещению границ доменов при намагничивании, препятствуют обратному смещению границ доменов при размагничивании. Для того чтобы снять остаточную индукцию необходимо приложить поле обратной полярности. При некотором значении напряженности поля, называемом *коэрцитивной силой* ( $H_c$ ), индукция исчезнет. Дальнейшее увеличение напряженности поля в обратном направлении приведет к намагничиванию ферромагнетика. Естественно, что знак вектора магнитной индукции при этом поменяется. Отключение внешнего магнитного поля вновь приведет к появлению остаточной индукции, для снятия которой необходимо приложить коэрцитивную силу. Таким образом, при нахождении ферромагнетика в переменном магнитном поле появляется петля гистерезиса. Чем больше в материале дефектов структуры, затрудняющих смещение границ зерен, тем выше значение коэрцитивной силы и шире петля гистерезиса.

Площадь петли гистерезиса характеризует затраты энергии на перемагничивание материала за один цикл:

$$P = \oint H dB \quad (3.3)$$

Важно отметить, что при нахождении магнитных материалов в переменном магнитном поле в них возникают вихревые токи. Это связано с тем, что переменное магнитное поле вызывает появление переменного электрического поля. Вихревые токи вызывают нагрев материала и обуславливают появление магнитного поля, ослабляющего внешнее поле. В связи с этим появляются потери энергии внешнего магнитного поля на вихревые токи. Очевидно, что повышение электрического сопротивления материала ведет к снижению потерь на вихревые токи.

### **Основные классы магнитных материалов.**

Все магнитные материалы принято условно разделять на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкими называют материалы легко перемагничивающиеся под действием внешнего магнитного поля. Для таких материалов характерны низкие значения коэрцитивной силы и высокие значения магнитной проницаемости. Их используют для концентрации магнитного поля. В большинстве случаев магнитомягкие материалы работают в переменных магнитных полях, поэтому для них важно высокое удельное электрическое сопротивление. Исторически первым магнитомягким материалом было малоуглеродистое железо, обладающее низкой механической твердостью. Поэтому такие материалы получили название магнитомягких.

Магнитотвердыми называют материалы с высокой коэрцитивной силой и большой остаточной индукцией. Их применяют для изготовления постоянных магнитов - источников постоянного магнитного поля. Исторически первыми магнитотвердыми материалами были механически твердые, закаленные углеродистые стали. Поэтому, такие материала получили название магнитотвердых.

## Промышленные магнитомягкие материалы

### Материалы для работы в постоянных и низкочастотных полях

#### Железо

Для работы в качестве магнитопроводов в постоянных и низкочастотных полях наиболее подходящими являются железо и его сплавы с кремнием. Поскольку у железа для заполнения 3d орбитали не хватает 4 электронов, атомы железа обладают большим магнитным моментом. В связи с этим, у железа высокая индукция насыщения (2,2 Тл). Следует отметить, что наиболее часто встречающиеся примеси - углерод, кислород, сера и фосфор - плохо растворяются в железе при невысоких температурах и выделяются в виде карбидов, оксидов, сульфидов и фосфидов. Эти включения затрудняют перемещение границ доменов и, тем самым снижают магнитную проницаемость и увеличивают коэрцитивную силу.

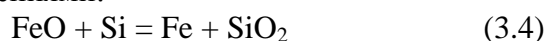
Наиболее дешевым материалом является технически чистое железо с суммарным содержанием примесей до 0,1%. Благодаря сравнительно низкому удельному электрическому сопротивлению ( $\approx 0,1$  мкОм м) технически чистое железо используется в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока. Существенным недостатком технически чистого железа является его старение, то есть повышение коэрцитивной силы со временем за счет выделения тонко дисперсных частиц карбидов и нитридов. Для уменьшения вредного влияния старения химические соединения выделяют заранее в виде сравнительно крупных частиц. Для этого материал подвергают отжигу при 910 – 950 °С и медленному охлаждению.

Очистка железа от примесей приводит к росту магнитной проницаемости и снижению коэрцитивной силы. Эти преимущества особенно ярко проявляются в слабых полях, то есть в полях используемых в радиоэлектронике и измерительных устройствах. Очистка железа производится электролизом, восстановлением в водороде химически чистых окислов железа и термическим разложением пентакарбонила железа ( $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ). Соответственно различают электролитическое, восстановленное и карбонильное железо. Поскольку очистка существенно увеличивает стоимость материала, его применение крайне ограничено. Наибольшее применение получило карбонильное железо. Это связано с тем, что при разложении пентакарбонила железа получается металлический порошок. Смешав этот порошок с каким-либо лаком можно получить материал, сочетающий высокое удельное электрическое сопротивление с высокой магнитной проницаемостью.

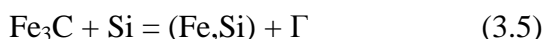
#### Электротехническая сталь

Низкое электрическое сопротивление железа приводит к тому, что в переменных полях в железе возникают большие потери на вихревые токи и снижается магнитная проницаемость. При легировании железа кремнием удельное электрическое сопротивление существенно возрастает. Так у сплава, содержащего 5% кремния, удельное электрическое сопротивление достигает 0,7 мкОм м, то есть увеличивается более чем в 7 раз по сравнению с чистым железом.

Кроме того, присутствие кремния в железе снижает магнитную анизотропию и магнитострикцию. При увеличении отношения а/г снижается разница в значениях обменного интеграла по различным направлениям, а следовательно, уменьшается магнитная анизотропия. У сплава содержащего 6,8% Si магнитная анизотропия в 3 раза меньше чем у чистого железа, а магнитострикция практически равна нулю. Наконец при добавке к железу кремния нейтрализуется вредное влияние примесей кислорода и углерода. Последнее обстоятельство связано с тем, что кремний раскисляет сталь и способствует переходу углерода из карбида железа (цементита) в графит в соответствии с уравнениями:







Важно отметить, что взаимодействие кремния с дислокациями приводит к снижению подвижности последних, поэтому снижается пластичность сплавов. В связи с этим промышленные сплавы железа с кремнием - *электротехнические стали* содержат не более 5% Si.

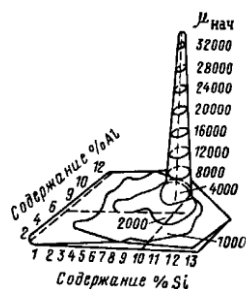
Поскольку у электротехнических сталей сохраняется магнитная анизотропия, то для улучшения магнитных свойств применяют текстурованную сталь, то есть сталь, у которой некоторые кристаллографические направления в соседних зернах совпадают. Для получения стали с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями необходимо совпадение направлений типа [111]. Для того чтобы получить магнитную текстуру применяют холодную прокатку с большими обжатиями и последующий отжиг при температуре 900-1000°C. В ходе холодной деформации происходит ориентация зерен, а при отжиге идет рекристаллизация, приводящая к снижению плотности дислокаций и росту зерен. Текстурованную сталь называют также холоднокатаной. Холоднокатаная сталь в 1,5 раза дороже горячекатаной, но потери в ней вдвое ниже. Важно иметь в виду, что для эффективного использования текстурованной электротехнической стали магнитный поток должен проходить вдоль направления легкого намагничивания.

### Магнитомягкие материалы для работы в слабых полях

Для материалов, работающих в слабых полях, чрезвычайно важное значение имеет высокое значение начальной магнитной проницаемости. Иначе говоря, для таких материалов важна большая подвижность границ доменов в условиях малой напряженности внешнего магнитного поля. Следовательно, такие материалы должны быть однофазными и иметь малую магнитную анизотропию и магнитострикцию.

Как отмечалось ранее, увеличение межатомных расстояний между атомами переходных металлов вследствие легирования, приводит к снижению магнитной анизотропии. Поэтому для достижения максимальной магнитной проницаемости используют сильно легированные сплавы. Примером могут служить альсифер и пермаллои.

**Альсифер** - сплав системы Fe-Si-Al, содержащий около 9,5% кремния и 5,5% алюминия. При этом составе магнитная анизотропия минимальна и сплав имеет очень высокую магнитную проницаемость. Отклонение от оптимального состава приводит к снижению магнитной проницаемости (рис.50). (Объясните почему?)



Сплав отличается достаточно высоким удельным электрическим сопротивлением ( $\rho=0,81 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ), что снижает потери на вихревые токи. Вместе с тем, сплав непластичен и тверд. Детали из него изготавливают методом порошковой металлургии, а окончательная обработка деталей возможна только анодно-механическим и электроискровым способами, а также шлифовкой. Трудность обработки повышает стоимость изделий, однако, поскольку сплав не содержит дорогостоящих компонентов его широко применяют для изготовления магнитных экранов и магнитопроводов.

**Пермаллои.** Пермаллоями называют сплав железа и никеля. При этом различают низконикелевые пермаллои и высоконикелевые пермаллои. Низконикелевые пермаллои содержат 45-65% Ni, высоконикелевые пермаллои - 76-80% Ni. Для низконикелевых пермаллоев характерны более высокое удельное электросопротивление и повышенная индукция насыщения, однако, магнитная проницаемость низконикелевых пермаллоев ниже магнитной проницаемости высоконикелевых пермаллоев. Важно отметить, что индукция насыщения высоконикелевых пермаллоев ниже индукции насыщения низконикелевых пермаллоев. Это обстоятельство связано с тем, что магнитный момент иона никеля ниже магнитного момента иона железа.

## **Магнитомягкие материалы, предназначенные для работы в высокочастотных полях.**

В высокочастотных полях резко возрастают потери на вихревые токи. Поэтому в высокочастотных полях используют материалы с высоким удельным электрическим сопротивлением – магнитодиэлектрики, ферромагнетики с аморфной структурой и ферриты.

**Магнитодиэлектрики** получают, смешивая порошкообразные ферромагнетики и органическую или неорганическую связку. В качестве ферромагнетика используют карбонильное железо, альсифер или молибденовый пермаллой, дополнительно легированный серой. Серу в пермаллой вводят для придания хрупкости. В качестве связки используют фенолформальдегидные смолы, полистирол, стекла. Связка должна образовывать тонкую сплошную пленку между частицами ферромагнетика. Частицы ферромагнетика должны быть достаточно малыми, для снижения вихревых токов. Однако у малых частиц не происходит разбиения на домены, поэтому снижается магнитная проницаемость магнитодиэлектриков.

**Ферромагнетики с аморфной структурой** получают сверхбыстрым охлаждением расплава, при этом скорости охлаждения достигают  $10^6 - 10^8$  градуса за секунду. При столь быстром охлаждении кристаллическая решетка не успевает формироваться, и материал представляет собой переохлажденную жидкость. Отсутствие кристаллической решетки приводит к полной изотропии магнитных свойств, а при отсутствии магнитной анизотропии подвижность границ доменов становится высокой. Таким образом, материалы с аморфной структурой являются магнитомягкими. Кроме того, отсутствие кристаллической решетки приводит к росту удельного электрического сопротивления, поэтому потери на вихревые токи в материалах с аморфной структурой очень малы.

**Ферритами** называют ионные соединения типа  $MeOFe_2O_3$ , которые по химической природе являются солями железноватистой кислоты  $MeFe_2O_4$ , где  $Me$  - катион любого двухвалентного металла, либо два катиона одновалентного металла. Большинство ферритов имеют симметричную кубическую кристаллическую решетку типа шпинели или граната. Однако некоторые ферриты (феррит бария) имеет несимметричную гексагональную решетку. Иногда, для того чтобы подчеркнуть тип решетки ферриты называют *феррокубамии* или *гексаферритами*.

Впервые объяснение магнитных свойств ферритов было дано Л. Неелем. В соответствии с предложенной им теорией ферримагнетизма в оксидных ферромагнетиках происходит косвенное обменное взаимодействие ионов металлов при участии ионов кислорода. Рассмотрим принципы косвенного обменного взаимодействия на примере никелевого феррита. Внешняя электронная оболочка иона кислорода  $O^{2-}$  полностью заполнена электронами, причем спиновые моменты попарно скомпенсированы. Электронные оболочки никеля и железа имеют соответственно два и пять нескомпенсированных электронных спинов. Диамагнитный ион кислорода может возбуждаться и передавать один из валентных электронов катиону никеля. Отдавая электрон, ион кислорода приобретает спиновый магнитный момент и взаимодействует с ионом железа. Благодаря сильному перекрытию электронных оболочек ( $a/r < 3$ ) это взаимодействие имеет антиферромагнитный характер. Конечным результатом такого сложного обменного взаимодействия является то, что магнитные моменты ионов никеля и железа будут антипараллельными. Важным моментом является то, что магнитные моменты ионов железа и никеля различны, поэтому магнетизм ферритов или ферримагнетизм можно рассматривать как нескомпенсированный антиферромагнетизм.

В качестве магнитомягких материалов наиболее широко применяют никель-цинковые литий-цинковые и марганец-цинковые ферриты.

По электрическим свойствам ферриты относятся к полупроводникам или к диэлектрикам, поэтому потери на вихревые токи в ферритах ничтожно малы. Кроме того, они обладают высокой диэлектрической проницаемостью, что приводит к снижению

скорости распространения электромагнитных волн в ферритах. Это обстоятельство позволяет изготавливать на базе ферритов линии задержки, фазовращатели, магнитные вентили и др. Монокристаллы магнитомягких ферритов применяются для изготовления магнитных головок записи и воспроизведения сигналов звукового и видеодиапазона в магнитофонах. Поскольку кристаллическая решетка ферритов упакована неплотно, то такие головки обладают повышенной износостойкостью.

## Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материала идут на изготовление постоянных магнитов, запасенная магнитная энергия которых оценивается как произведение остаточной индукции на величину коэрцитивной силы

$$E_{\text{маг}} = H_c B_r \quad (3.6)$$

Для того чтобы увеличить коэрцитивную силу нужно затруднить смещение границ доменов. Для этого необходимо чтобы магнитная анизотропия была максимальной, размер зерен был минимальным и материал должен содержать частицы, препятствующие движению границ доменов. Иначе говоря, требования к структуре магнитотвердых материалов прямо противоположны требованиям к требованиям магнитомягких материалов.

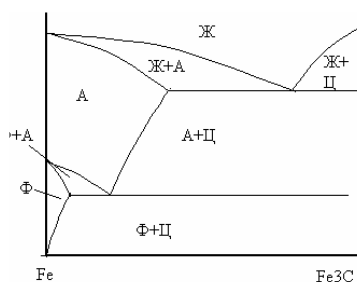
## Промышленные магнитотвердые материалы.

Самыми «старыми» магнитотвердыми материалами являются углеродистые стали, закаливаемые на мартенсит. Для понимания природы повышения коэрцитивной силы при закалке сталей следует рассмотреть диаграмму состояния сплавов системы «железо - цементит» (см. рисунок 51).

До температуры 911°C железо имеет ОЦК решетку, выше этой температуры термодинамически более выгодной становится ГЦК решетка. Углерод может образовывать с железом химическое соединение **цементит** -  $\text{Fe}_3\text{C}$ , а также растворяться в железе. Раствор углерода в железе с ОЦК решеткой принято называть **феррит**, а раствор углерода в железе с ГЦК решеткой принято называть **аустенит**. Области существования феррита, аустенита и цементита на диаграмме состояния отмечены как Ф, А, и Ц. Области существования двух фаз помечены как Ф+А, А+Ц, Ф+Ц.

Важно отметить, что растворимость углерода в аустените существенно выше растворимости углерода в феррите. Это связано с тем, что на одну элементарную ячейку ГЦК решетки аустенита приходится всего одна межатомная пора, и размер ее много больше размера межатомной поры в решетке феррита.

При охлаждении чистого железа при температуре 911°C происходит перестройка ГЦК решетки в ОЦК, или превращение аустенита в феррит (рис.51). При наличии в сплаве углерода температура превращения аустенита в феррит снижается, за счет того, что раствор углерода в аустените имеет большую энтропию, чем раствор углерода в феррите и, следовательно, меньшую свободную энергию.



При медленном охлаждении сплавов системы Fe-C (сталей) из температурной области аустенита углерод диффузионным путем выделяется в виде цементита, а решетка аустенита перестраивается в решетку феррита. При резком охлаждении сталей углерод не успевает выделиться из аустенита и при перестройке кристаллической решетки решетка феррита оказывается искаженной застрявшими атомами углерода. В результате вместо ОЦК решетки

получается тетрагональная объемно-центрированная решетка или решетка мартенсита. Поскольку решетка мартенсита упакована неплотно, то при мартенситном превращении в стали возникают напряжения. Рост напряжений приводит к росту энергии системы, поэтому полного превращения аустенита в мартенсит не происходит и в стали формируется структура, состоящая из дисперсной смеси аустенита и мартенсита. Поскольку решетка аустенита плотноупакована, то аустенит не ферромагнитен. В то же время у ферромагнитного мартенсита неплотноупакованная тетрагональная решетка, что обуславливает его ферромагнетизм. Кроме того, тетрагональность мартенсита приводит к большой анизотропии его магнитных свойств. Таким образом, получается идеальная с точки зрения магнитотвердых материалов структура - дисперсная смесь ферромагнитной и неферромагнитной фаз, причем у ферромагнитной фазы большая магнитная анизотропия. Однако свойства сталей, закаленных на мартенсит далеки от идеала, причина состоит в том, что у закаленных сталей большой объем занят неферромагнитной фазой - аустенитом, поэтому их намагниченность, а следовательно, и остаточная индукция, невелики. Другим недостатком сталей мартенситного класса является их низкая прокаливаемость - способность воспринимать закалку на значительную глубину, что препятствует мартенситному превращению в глубинных слоях материала. Для повышения прокаливаемости стали дополнительно легируют хромом вольфрамом молибденом и кобальтом. Поскольку атомы легирующих элементов взаимодействуют с вакансиями, то скорость диффузии снижается и превращение аустенита в ферритно-цементитную смесь затрудняется. Таким образом, прокаливаемость сталей возрастает. Особенно эффективно легирование сталей кобальтом, поскольку у атомов кобальта имеется магнитный момент и при наличии кобальта остаточная индукция возрастает.

### **Дисперсионно твердеющие сплавы**

К таким сплавам относятся сплавы системы Fe-Ni-Al. При высоких температурах алюминий и никель растворяются в аустените, но при резком охлаждении образуется пересыщенный раствор легирующих элементов в железе. При последующем отпуске происходит выделение дисперсных частиц интерметаллида  $Fe_2NiAl$ . В результате формируется структура, состоящая из ферромагнитной матрицы и дисперсных частиц, препятствующих движению границ доменов. Наибольшей магнитной энергией обладают сплавы, содержащие примерно 28% Ni и 14% Al, однако достаточно большая диффузионная активность никеля и алюминия препятствуют использованию этого сплава для изготовления магнитов массой более 5 грамм. Дело в том, что у массивных магнитов даже в ходе закалки глубинные слои охлаждаются медленно и происходит распад твердого раствора с образованием крупных выделений интерметаллидов. Для затруднения распада сплавы дополнительно легируют медью и кобальтом. Ионы легирующих элементов искажают кристаллическую решетку и, притягивая к себе вакансии, затрудняют их перемещение. В результате затрудняется диффузия и при закалке пересыщенный твердый раствор не успевает распасться. Особенно эффективно легирование кобальтом, поскольку ионы кобальта обладают магнитным моментом, и добавка кобальта не только замедляет диффузию, но и повышает остаточную индукцию сплава.

Сплавы системы Fe-Ni-Al-Cu-Co получили название *альнико*. Для повышения магнитных свойств закаленный сплав подвергают термомагнитной обработке, то есть производят нагрев для старения в сильном магнитном поле. При этом дисперсные частицы интерметаллидов выделяются по границам доменов и закрепляют уже сориентированные домены. Сплавы, прошедшие термомагнитную обработку получили название *магнико*.

Изделия из сплавов системы Fe-Ni-Al-Cu-Co можно получать либо методом литья, либо методами порошковой металлургии. При литье трудно получать изделия со строго выдержанными размерами. Кроме того, после литья необходим длительный

гомогенизационный отжиг для выравнивания неоднородности химического состава. У изделий полученных методами порошковой металлургии коэрцитивная сила практически такая же что и у литых, но остаточная индукция на 35-50% ниже.

### **Деформируемые магнитотвердые материалы.**

Как правило, магнитотвердые материалы непластичны, поскольку дисперсные частицы выделений, препятствующие смещению границ доменов, затрудняют движение дислокаций. Однако в ряде случаев необходимо иметь магнитотвердый материал в виде лент, листов, проволоки для изготовления штамповкой элементов измерительных систем, стрелок компасов и буссолей, лент магнитной записи и так далее. Такие материалы должны обладать заметной пластичностью.

К деформируемым магнитотвердым материалам относятся сплавы систем Cu-20%Ni-20%Fe - **кунифе**, Cu -20%Ni 20%Co - **кунико**, и Fe-52%Co -(4-14)%V - **викалло**.

У сплавов на медной основе большая коэрцитивная сила возникает после значительного обжата (на 90-95%) и последующего отпуска при 600° С. Высокие магнитные свойства этих материалов обусловлены выделением однодоменных частиц ферромагнитной фазы в процессе отпуска пересыщенного твердого раствора. Важно отметить, что в ходе предварительной деформации в материале возникает острая текстура, поэтому, выделяющиеся частицы, являются ориентированными.

Особенностью сплава кунико является возможность получения изотропных магнитов с высокой коэрцитивной силой без большого обжата. Поэтому из этого сплава изготавливают магниты сложной формы с большим размагничивающим фактором, например многополюсные звездочки.

Сплавы системы Co-V-Fe характеризуются высокой индукцией (до 1,8 Тл). Их используют для изготовления небольших магнитов, стрелок компасов и буссолей, магнитной проволоки.

### **Магнитотвердые ферриты**

Из магнитотвердых ферритов наиболее известен бариевый феррит  $BaO \times 6Fe_2O_3$  (ФБ, ферроксдюр). В отличие от магнитомягких ферритов он имеет не кубическую, а гексагональную решетку с одноосной анизотропией. Высокая коэрцитивная сила обусловлена малым размером зерен и сильной кристаллографической анизотропией. Помимо бариевого феррита используются хромбариевый феррит (ХБ) и кобальтовый феррит

Технология получения магнитотвердых ферритов в общих чертах похожа на технологию получения магнитомягких ферритов. Однако для получения мелкокристаллической структуры, осуществляют очень тонкий помол (как правило, в водной среде), а спекание проводят при относительно невысоких температурах для избежания роста зерен.

Для придания анизотропии магнитных свойств материал текстурируют. Для создания текстуры сметанообразную массу помещают в сильное магнитное поле, которое отключают только после формирования изделия и его полного высыхания. Бариевые анизотропные ферриты маркируются БА, хромбариевые - ХБА, кобальтовые КА. Изотропные, нетекстурированные магниты маркируются БИ, ХБИ и КИ соответственно.

Ферритные материалы значительно дешевле металлических. Вместе с тем у них существенно ниже удельный вес. Высокая коэрцитивная сила позволяет изготавливать магниты с малым отношением длины к поперечному сечению.

К недостаткам магнитотвердых ферритов следует отнести низкую механическую прочность, хрупкость, высокую чувствительность к изменению температуры. Кроме того при охлаждении до - 60°С и повторном нагреве они теряют ферромагнитные свойства.

### **Высококоэрцитивные магниты.**

К этой группе материалов относят сплавы редкоземельных элементов с кобальтом типа  $RCo_5$  или  $RCo_{17}$ , а также сплавы железа или кобальта с платиной. Эти материалы обладают рекордной запасенной магнитной энергией, однако, их широкому применению мешает высокая стоимость.

### **3.2. Материалы с особыми тепловыми свойствами**

#### **Сплавы с заданным коэффициентом теплового расширения.**

Они содержат большое количество никеля. Сплав 36Н, называемый инваром ( $<0,05\% \text{ Si}$   $35\text{—}37\% \text{ Ni}$ ), почти не расширяется при температурах от  $-60$  до  $+100^\circ\text{C}$ . Его применяют для изготовления деталей приборов, требующих постоянных размеров в интервале климатических изменений температур (детали геодезических приборов и др.).

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

### **3.3. Материалы с особыми электрическими свойствами**

#### **ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

Диэлектрическими принято называть материалы, имеющие низкую плотность подвижных носителей заряда (ионов и электронов), поэтому удельное электрическое сопротивление таких материалов в  $10^{12}$  -  $10^{25}$  раз выше, чем у проводниковых материалов. Очевидно, что диэлектрическими являются материалы с ковалентной, поляризационной или ионной связью между атомами, причем последние только в твердом состоянии. Кроме того, энергия возбуждения электронов на уровни проводимости превосходит 5 электрон-вольт.

По агрегатному состоянию диэлектрики бывают твердыми, жидкими и газообразными. По происхождению диэлектрики могут быть естественными и искусственными, органическими и неорганическими.

По электрической структуре все диэлектрики можно разделить на неполярные и полярные. У неполярных диэлектриков в отсутствие внешнего поля собственный дипольный момент структурных единиц (атомов, молекул, элементарных кристаллических ячеек) равен нулю. У полярных диэлектриков собственный дипольный момент структурных единиц отличен от нуля и в отсутствие внешнего поля. В свою очередь, полярные диэлектрики могут быть параэлектрическими и сегнетоэлектрическими. У параэлектриков дипольные моменты структурных единиц распределены по разным направлениям хаотически, и суммарный дипольный момент даже не-большого объема равен нулю. У сегнетоэлектриков дипольные моменты ориентированы параллельно, и суммарный дипольный момент малых объемов не равен нулю.

При помещении диэлектрика в электрическое поле в нем развиваются два основных процесса: поляризация и сквозная электропроводность. Развитие основных процессов может, в свою очередь, привести к ряду дополнительных процессов к потере энергии электрического поля в диэлектрике и пробое диэлектрика.

Рассмотрим влияние внешних условий на развитие основных процессов в диэлектриках.

#### **ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

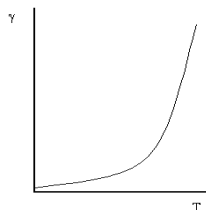
Электропроводность диэлектриков определяется в основном перемещением ионов. На концентрацию ионов оказывают влияние: состав материала, температура, облучение

материала частицами высоких энергий. Концентрация подвижных носителей заряда в полярных материалах, как правило, выше, чем в неполярных. Это связано с тем, что ионы примесей электрически взаимодействуют с дипольными моментами полярных молекул, поэтому очистка полярных материалов от примесей затруднена.

### **Влияние температуры на электропроводность диэлектриков**

При повышении температуры энергия системы повышается на величину  $kT$  и вероятность выхода иона из потенциальной ямы возрастает (см. рис.2 в конспекте 1).

Поэтому электропроводность диэлектриков при повышении температуры растет в соответствии с выражением:



$$\gamma = \gamma_0 \exp(E_a/kT) \quad (2.1) \text{ где: } \gamma - \text{удельная}$$

электропроводность диэлектрика,  $\gamma_0$  - константа,  $E_a$  - энергия активации выхода иона из потенциальной ямы,  $kT$  - тепловая энергия системы. Зависимость электропроводности от температуры показана на рис. 25.

### **Влияние напряженности поля на электропроводность диэлектриков**

При сравнительно небольших значениях напряженности поля электропроводность диэлектриков следует закону Ома. Однако при повышении напряженности поля электропроводность перестает следовать закону Ома. При дальнейшем повышении напряженности поля возможны два случая: в первом электропроводность быстро нарастает с ростом напряженности поля (рис. 26 а), а во втором - вначале наступает насыщение электропроводности, и лишь затем в сильных полях наблюдается ее резкий рост (рис. 26 б).

Первый случай наблюдается в загрязненных диэлектриках и чистых диэлектриках с ионной связью, в которых при увеличении напряженности поля происходит размножение заряженных частиц. Второй случай типичен для неионных диэлектриков высокой чистоты, в которых число заряженных частиц ограничено, что и вызывает насыщение электропроводности. В очень сильных полях происходит размножение ионов в результате перехода к пробое диэлектриков.

