

Цели и задачи курса.

Основная цель: изучить внутренние строения конструкционных материалов и определить связи строения с механическими, физическими 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.

Механические свойства металлов.

К механическим свойствам металлов относят: прочность, упругость, пластичность, твердость, ударную вязкость.

Диаграмма деформирования металлов:

Прочность, упругость и пластичность изучаются при испытаниях на растяжение.

Прочность – способность материалов выдерживать нагрузки без разрушения.

Упругость – способность материалов изменять форму под действием нагрузки, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.

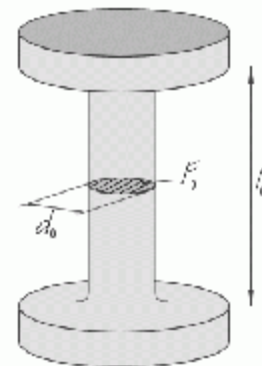
Пластичность – способность материала приобретать необратимые изменения формы под действием нагрузки.

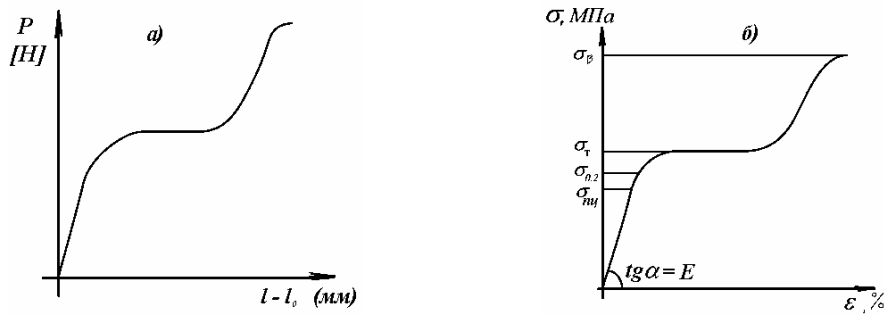
Для того чтобы исключить влияние размеров и форм испытываемых деталей на результат испытания: 1) испытания проводят на стандартных образцах; 2) результат испытаний пересчитывают на относительные величины: усилие в напряжение $\sigma = \frac{P}{F_0}$; деформацию в

относительную деформацию $\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\%$; l_0 – начальная длина рабочей части; l – длина рабочей части под действием усилия.

Относительные величины применяют, чтобы охарактеризовать материал, а не образец.

В результате испытаний на растяжение строят диаграммы растяжения.





а) характеризует процесс деформирования образца; б) характеризует деформирование материала образца

$\sigma_{ПЦ}$ – предел пропорциональности – максимальное напряжение, до которого материал деформируется строго упруго, то есть соблюдается закон Гука $s = Ee$, где E – модуль упругости.

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести – напряжение, при котором доля необратимой пластической деформации составляет $0,2\% = e_{ПЦ}$.

σ_T – физический предел текучести – напряжение, при котором происходит значительное увеличение пластической деформации, при этом напряжение остается постоянным (присутствует не у всех металлов).

σ_B – предел прочности – предел временного сопротивления, выше которого происходит разрушение материала – основная характеристика механической прочности.

Измерение твердости.

Твердость – способность материалов сопротивляться проникновению в него инородного тела при статическом вдавливании.

Общая идея: в плоскую поверхность образца из исследуемого материала с заданным усилием специальный наконечник – индентор. О твердости судят либо по площади полученного отпечатка, либо по глубине вдавливания индентора.

Измерение твердости методом Бринеля.

Индентор – шарик диаметра 2,5; 5 или 10 мм.

$$\text{Твердость по шкале Бринеля: } HB = \frac{P}{\frac{pD}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

P – усилие вдавливания, D – диаметр шарика, d – диаметр полученного отпечатка, измеряемый после удаления индентора.

Достоинства метода: высокая универсальность, то есть способность к измерению материалов с разной структурой.

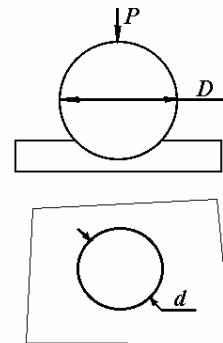
Недостатки метода: необходимость дополнительных измерений; необходимость дополнительных расчетов для получения HB приводит к тому, что метод не оперативный.

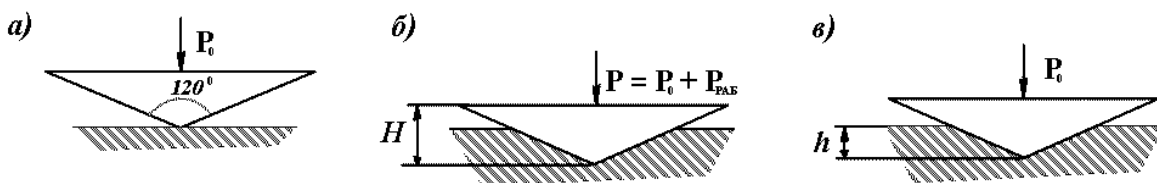
Испытания проводят на специальных прессах – твердомерах, развивающих строго определенное усилие вдавливания, являющееся стандартным. За счет изменения диаметра индентора, можно измерять твердость материалов в широком диапазоне.

Измерение твердости методом Роквелла.

В методе Роквелла твердость определяется глубиной вдавливания индентора. Индентор – конус с углом при вершине 120° .

Нагружение в три этапа: а) предварительное малое усилие P_0 для обеспечения контакта с образцом; б) основное нагружение усилием $P = P_0 + P_{раб}$; в) снятие рабочего усилия $P_{раб}$. Остается P_0 для обеспечения контакта с образцом.





О твердости материала судят по глубине вдавливания h , измеряемого на 3-м этапе нагружения. Для метода Роквелла характерна высокая оперативность.

Для повышения универсальности существуют три шкалы:

шкала	обозначение
A	HRA
B	HRB
C	HRC

Разным шкалам соответствуют разные рабочие усилия, что позволяет измерять материалы с разными характеристиками твердости.

Измерение твердости методом Викерса.

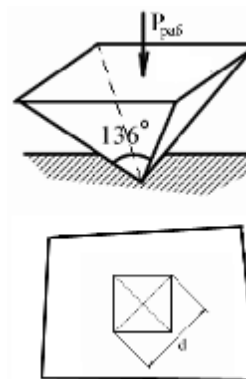
Методы Бринеля и Роквелла малоприменимы для измерения твердости тонких образцов из-за высоких усилий $9,8 \text{ Н} < P_{раб} < 1200 \text{ Н}$.

Индентор – четырехгранная пирамида; угол при вершине 136° .

$HV = k \frac{P_{раб}}{D^2}$, где D – диагональ отпечатка, k – размерный коэффициент.

Недостатки метода: дополнительные измерения и расчеты.

Достоинства метода: возможность измерять тонкие образцы.



Измерение ударной вязкости.

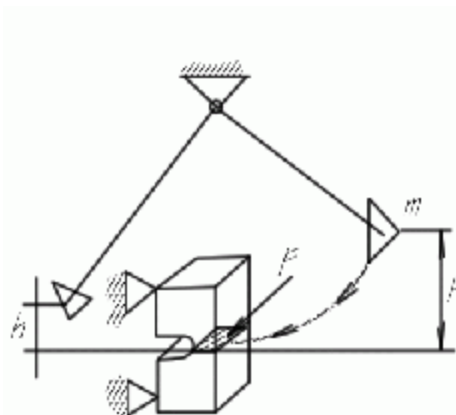
Вязкость – способность материалов поглощать энергию развиваемых в нем трещин.

Ударная вязкость измеряется в результате разрушения образцов при испытании на ударный изгиб.

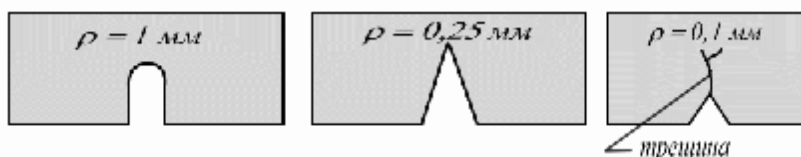
$KC = \frac{E_{разр}}{F_{излома}}$, где $E_{разр} = mg(H - h)$ – энергия,

поглощенная образцом при разрушении; $F_{излома}$ – площадь поверхности излома.

Испытания проводят на образцах разного типа с разными надрезами.

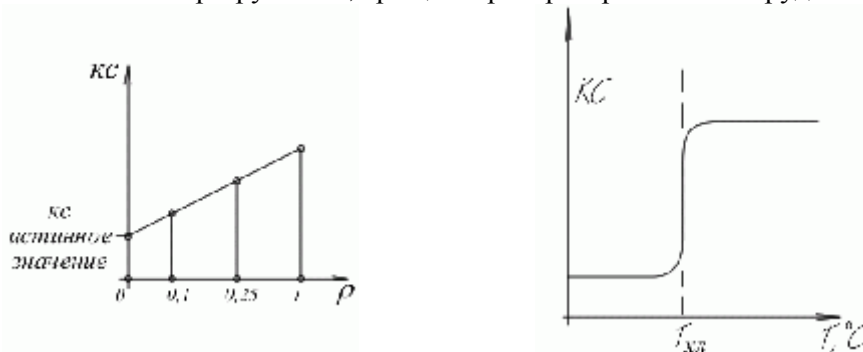


Значение KC при испытаниях на разных образцах различно. Это необходимо для определения значения KC материала. Используются три вида образца, чтобы зафиксировать место разрушения.



Значение KC сильно зависит от температуры. Для большинства конструкционных

материалов существует пороговое значение температуры, при которой характер разрушения скачкообразно меняется: ниже – хрупкое разрушение, малая энергия поглощения, с трещинами; выше – вязкое разрушение, трещины распространяются с трудом.



$T_{хл}$ – порог хладноломкости. Рабочие температуры выбирают выше значения $T_{хл}$.

Кристаллическое строение металлов.

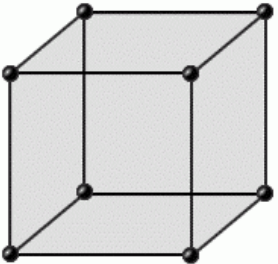
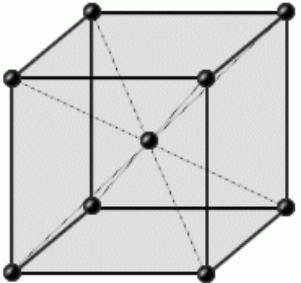
Почти все металлы – поликристаллические вещества, состоящие из отдельных мелких кристаллов.

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.

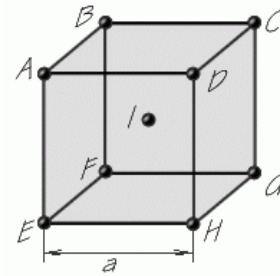
Плотность упаковки атомов в решетке определяется полным числом атомов, находящихся внутри объемного тела, образованного плоскостями, проходящими через центры внешних атомов ячейки

Основные типы решеток.

схема	название	количество атомов
	кубическая	1
	Объемно-центрированная кубическая (ОЦК)	2

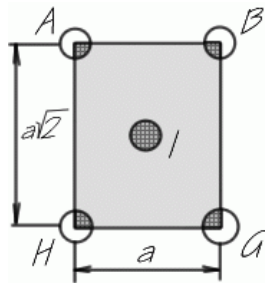
	Гранецентрированная кубическая (ГЦК)	3
---	---	---

Интересна связь строения кристаллической решетки с механическими и физическими свойствами материала. От прочности связи зависит степень сопротивления деформации. От строения зависит способность к пластической деформации. Деформирование происходит за счет сдвига атомных плоскостей. Сдвиг происходит наиболее легко вдоль атомных плоскостей с наиболее плотной упаковкой атомов. Рассмотрим объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК):

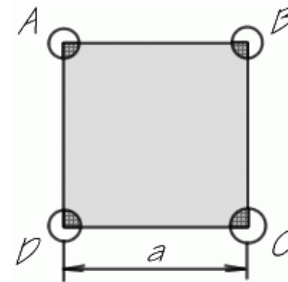


1) Плоскость ABCD. Количество атомов в плоскости ABCD – 1; площадь ABCD = a^2 ; площадь, приходящаяся на 1 атом –

удельная площадь: $S = \frac{a^2}{1} = a^2$ – мера плотности упаковки.



2) Плоскость ABGH. Количество атомов в плоскости ABGH – 2; площадь ABGH = $a^2 \sqrt{2}$; $S = a^2 \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,7a^2 < a^2$.



В плоскости ABGH плотность упаковки больше чем в ABCD. Наиболее вероятен сдвиг вдоль диагональных плоскостей.

Реальное строение кристаллов.

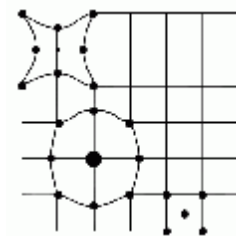
Неоднородный химический состав и внешние условия вызывают дефекты кристаллической решетки. Выделяют дефекты трех типов:

- 1) точечные (вакансии, внедренные атомы);
- 2) линейные (краевые и винтовые дислокации);
- 3) объемные (микропоры, трещины, газовые пузырьки).

Точечные дефекты:

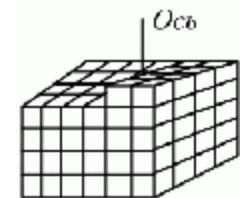
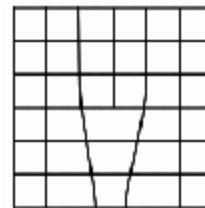
Вакансия – отсутствие атома в узле кристаллической решетки.

Внедренные атомы: а) чужеродный атом в узле кристаллической решетки; б) атом вне узла, в межузельном пространстве.



Линейные дефекты:

Дислокации: краевые – оборванный край атомной плоскости внутри кристаллической решетки; винтовые – условная ось внутри кристалл, относительно которой закручиваются атомные плоскости в процессе кристаллизации.

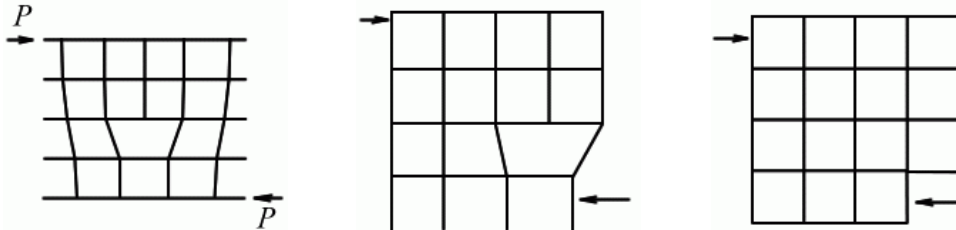
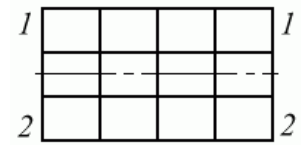


Объемные дефекты:

Возникают из-за влияния внешних условий кристаллизации или под действием внешних нагрузок. В результате несколько вакансий дают пору; несколько линейных дислокаций – трещину.

Влияние дислокаций на процесс деформирования кристалла.

Наличие дислокаций значительно облегчают движение атомных плоскостей друг относительно друга и способствует уменьшению предела прочности. В результате деформирования дислокации могут выходить за грани кристалла. Под действием значительных усилий в кристалле могут возникать новые дислокации, облегчающие деформирование кристалла (площадка текучести). Дислокации переплетаются.



Если дислокаций нет, то требуется значительное усилие, чтобы деформировать материал. Чем больше дислокаций, тем меньше усилие необходимое для деформации образца. Начиная с некоторой концентрации дислокаций деформация затрудняется, дислокации мешают движению друг друга. Возникает эффект упрочнения. Структура, возникающая при большом количестве мешающих друг другу дислокаций.



n – плотность дислокаций;

Реальные кристаллы имеют много дефектов, от которых зависят свойства материала.

Строение металлического слитка.

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

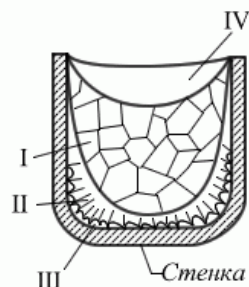
Зона II: Быстрое охлаждение, большая разность температур, мелкие кристаллы, растущие навстречу оттоку тепла. Игольчатые (столбчатые) дендриты.

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 [K].
- 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.



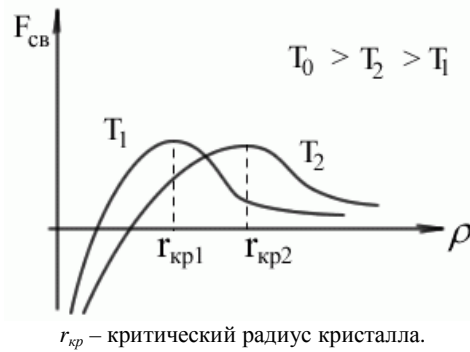
При высоких температурах по принципу минимальной свободной энергии энергетически более выгодно жидкое агрегатное состояние, при низких – твердое.

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°C – теоретическая температура кристаллизации воды. Для начала кристаллизации необходимо, чтобы $T_δ < T_0$, где $T_δ$ – действительная температура начала кристаллизации.

Важнейшая характеристика процесса кристаллизации – степень переохлаждения: $\Delta T = T_0 - T_δ$. 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.

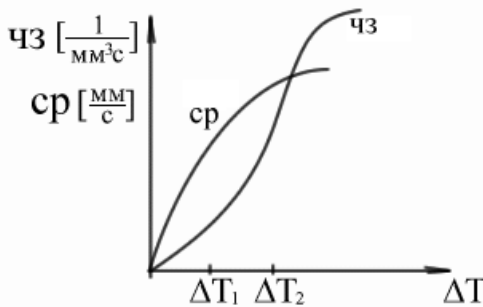
При образовании кристаллической решетки происходят следующие процессы:

- 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.



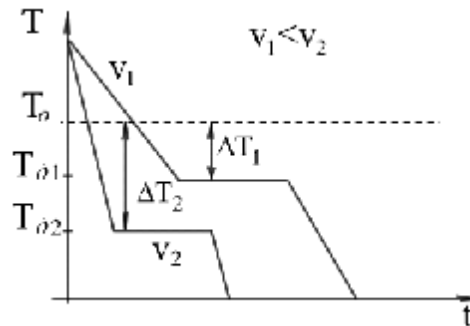
$r_{кр1} < r_{кр2}$ означает, что при некоторой температуре T_2 начальный объем зародыша должен быть больше, следовательно вероятность его самопроизвольного развития меньше. Чем меньше степень переохлаждения, тем меньше зародышей кристаллов образуется в единице объема жидкости за единицу времени.

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



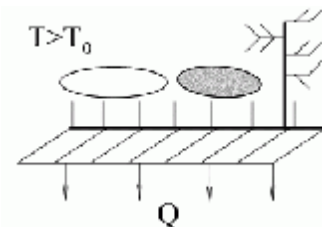
Чем больше $\Delta T = T_0 - T_\delta$, тем меньше T_δ . При ΔT_1 – число зародышей мало, скорость роста отлична от нуля. В результате кристаллы вырастают до крупных размеров. При ΔT_2 – число зародышей резко возрастает, скорость роста увеличивается, но кристаллы из-за большого количества не успевают 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 ΔT 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.

Несамостоятельная 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.

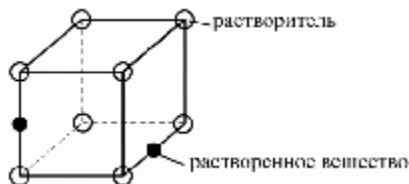
В дальнейшем будем рассматривать двойные сплавы.

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.

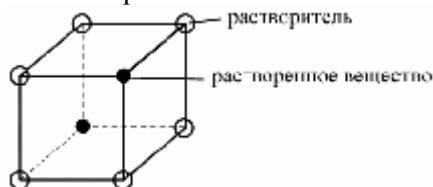
В твердых растворах внедрения – атомы растворенного вещества находятся в межатомных промежутках растворителя.



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;

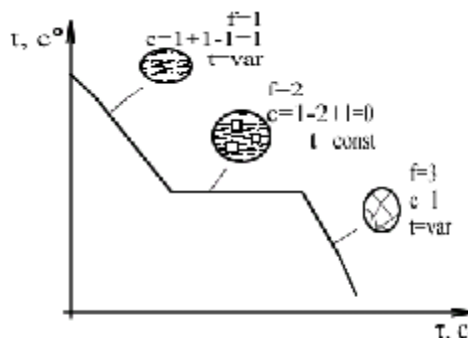
С помощью правила Гиббса можно узнать количество степеней свободы: $c = 1$ (для данного процесса температура может меняться), или $c = 0$ (температура остается неизменной).



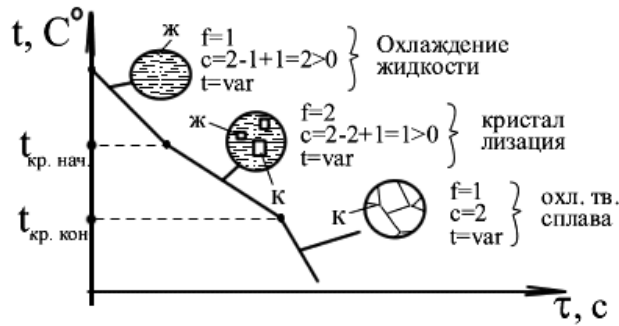
Так как в наших условиях $k = 2$, а число термодинамических параметров, которые могут изменяться = 1, то с помощью правила Гиббса для каждого процесса фазового перехода можно определить (в сплавах), происходит ли этот процесс при постоянной температуре, или при переменной.

Применение правила Гиббса.

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



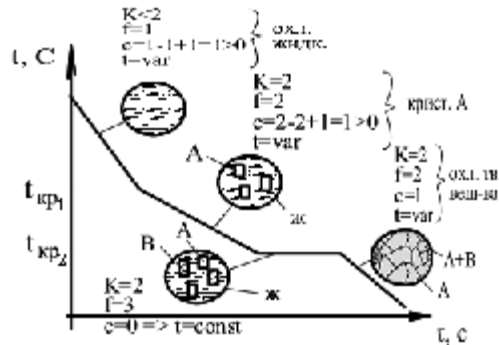
2. Кристаллизация сплава двух компонентов, неограниченно растворимых друг в друге в твердом состоянии ($k = 2$). Во время процесса изменяется число фаз.



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.

Диаграммы состояния.

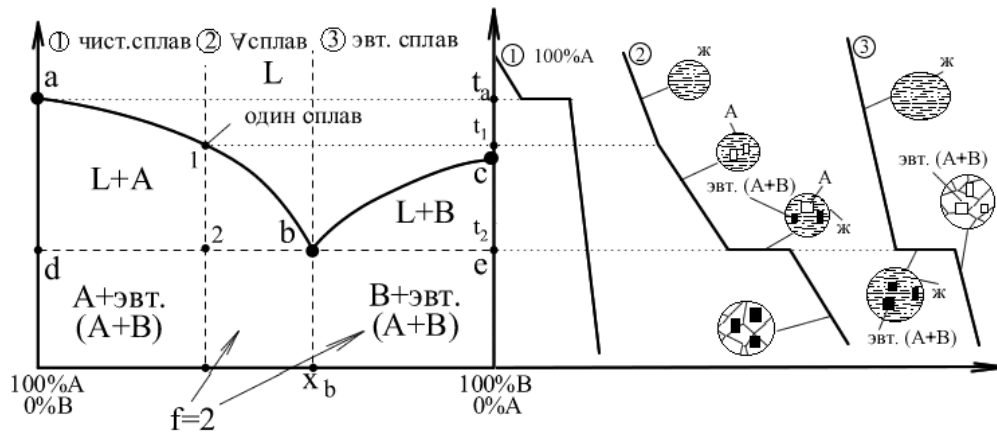
Рассматриваются только бинарные сплавы.

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.



Основные линии диаграммы:

abc – линия ликвидус – геометрическое место точек начала кристаллизации сплавов различного химического состава: Выше этой линии все сплавы находятся в жидком состоянии. L – liquid.

dbe – линия солидус – геометрическое место точек конца процесса кристаллизации; Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии.

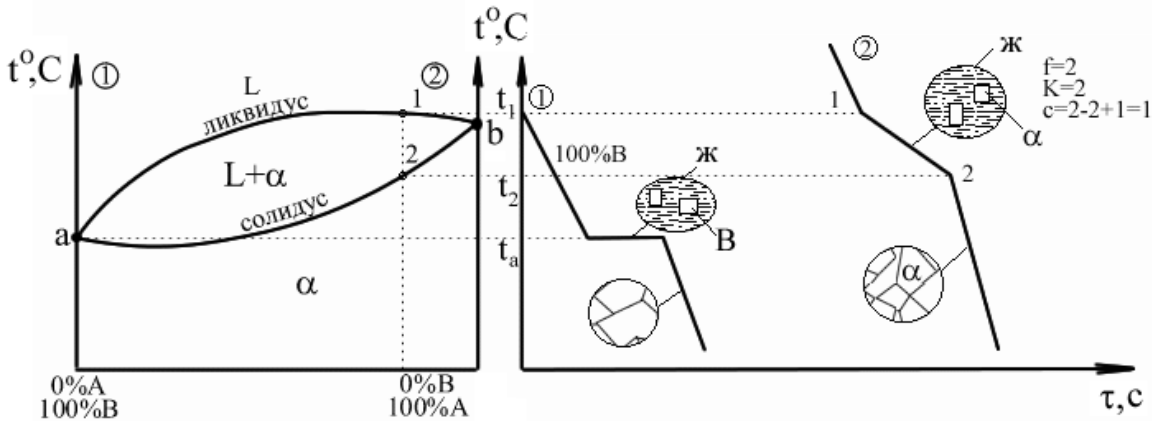
abd и bce – двухфазное состояние сплавов – происходит процесс кристаллизации.

Точка b – точка эвтектики; x_b – эвтектический состав для данной пары компонентов.

Анализ превращений на диаграмме состояния каждого сплава необходимо вести вдоль вертикальной линии, проходящей через точку на оси химического состава, определяющую суммарный химический состав сплава. То есть состав сплава определяется точкой на диаграмме с координатами температура–химический состав. Структура и фазовый состав будет определяться областью, в которую попадет эта точка. Сплав (3) – эвтектический сплав, включающий в себя оба компонента; кристаллизуется аналогично чистым компонентам при постоянной температуре.

Диаграммы II рода.

Компоненты неограниченно растворимы друг в друге в твердом состоянии.

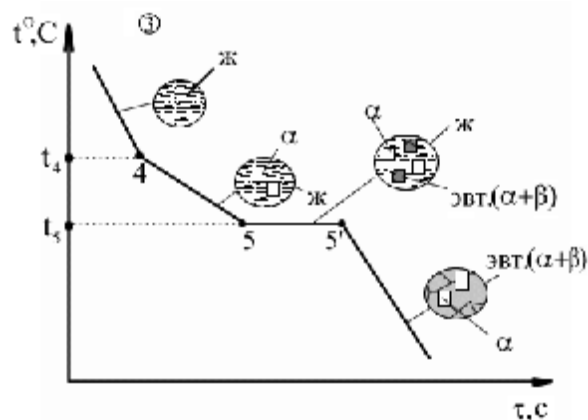
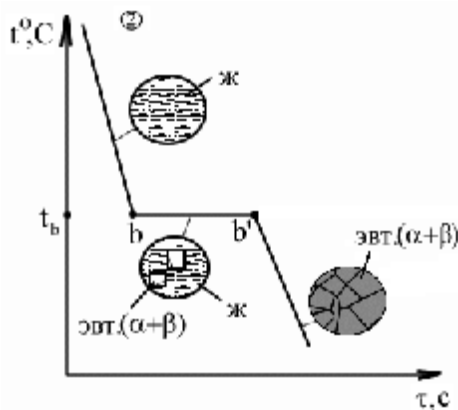
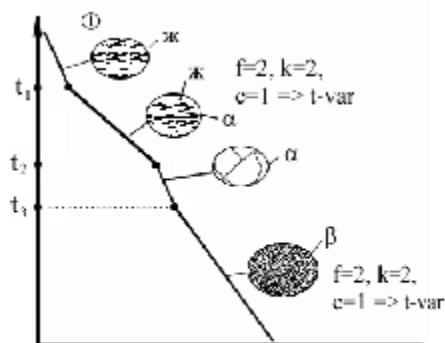
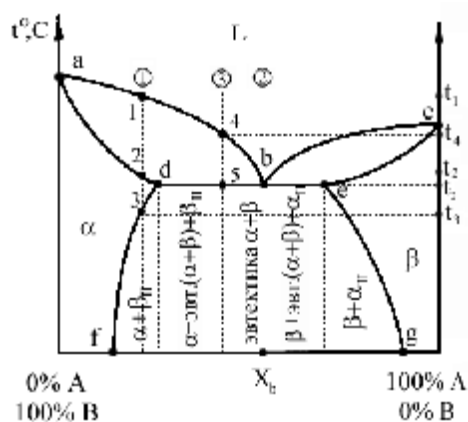


Компоненты имеют близкие атомные параметры и кристаллические решетки.

α – твердый раствор компонентов A и B друг в друге. Для разных веществ химический состав кристаллов α будет разным. Кристаллы в ходе кристаллизации имеют разный химический состав между точками (1) и (2). Диаграммы такого типа имеют компоненты близкие по атомным параметрам и по типу кристаллической решетки.

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.

α – ограниченный твердый раствор компонента A в компоненте B.

β – ограниченный твердый раствор компонента B в компоненте A.

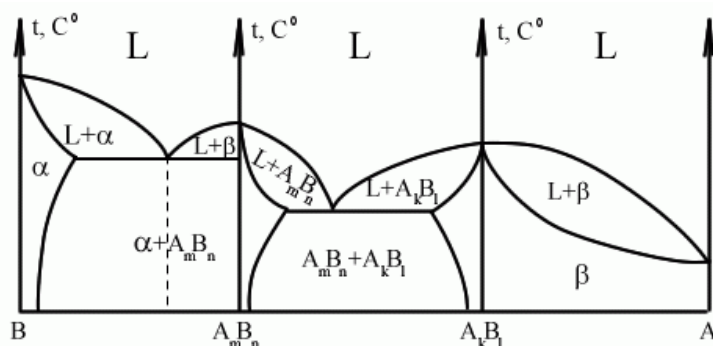
Сплав (1): Выше t_1 – охлаждение с высокой скоростью, зависящее от внешних условий. 1-2 – первичная кристаллизация, образование α твердого раствора. Вследствие низкого содержания компонента A в исходном сплаве при достижении t_2 весь компонент A расходуется на образование α -кристаллов, следовательно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

Сплав (2): Процесс аналогичен образованию эвтектики, только вместо чистых компонентов A и B – α - и β -твердые растворы.

Сплав (3): Выше температуры t_4 – охлаждение сплава – превращений нет. $t_4 - t_5$ – первичная кристаллизация α -кристаллов, при этом содержание компонента A 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 β_{II} -вторичных кристаллов. Для заэвтектической области процессы и кривые охлаждения сплавов аналогичны, только α - и β -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 .

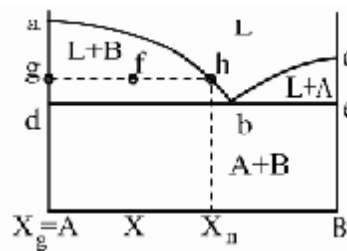
Правило отрезков позволяет определить относительное количество фаз.

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

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

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.

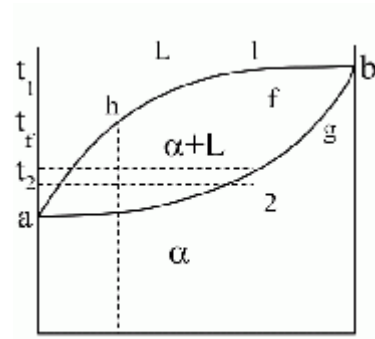
Химический состав фаз при заданной температуре определяется проекцией точек пересечения горизонтального отрезка с заданными границами областей на ось химического состава.



Правило отрезков для диаграмм II рода.

Для a1b2 работает правило отрезков:
 $L_f = \frac{gf}{gh} \cdot 100\%$; $a_f = \frac{hf}{gh} \cdot 100\%$; $x_L = x_h$; $x_a = x_g$

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 α – определяет химический состав α -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 α -кристаллов будет меняться от x, через x_g до исходного состава x в соответствии с правилом отрезков, то есть при кристаллизации α -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 α -кристаллы с отличающимся от среднего химическим составом. Это явление носит название химической ликвации.

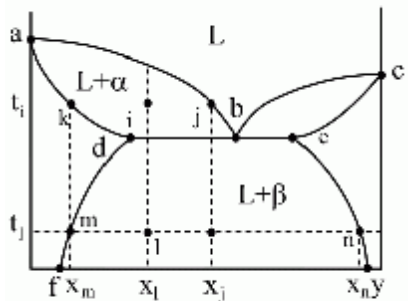
Ликвация – процесс, при котором часть структуры сплава отличается по своему химическому строению от основного состава. В реальных сплавах всегда происходит процесс ликвации.

Правило отрезков для диаграмм III рода.

Применим правило отрезков для линий adf, fdeg и сег. Для сплава состава x при температуре t_i (точка i). Две фазы: жидкость и α -кристаллы: $L_i = \frac{ki}{kj} \cdot 100\%$; $a_i = \frac{ij}{kj} \cdot 100\%$;

$$x_L = x_j; x_a = x_k.$$

Для сплава x при температуре t_j (точка l). Две фазы α и β : $L_a = \frac{nl}{mn} \cdot 100\%$; $L_b = \frac{ml}{mn} \cdot 100\%$; $x_a = x_m$; $x_b = x_n$.

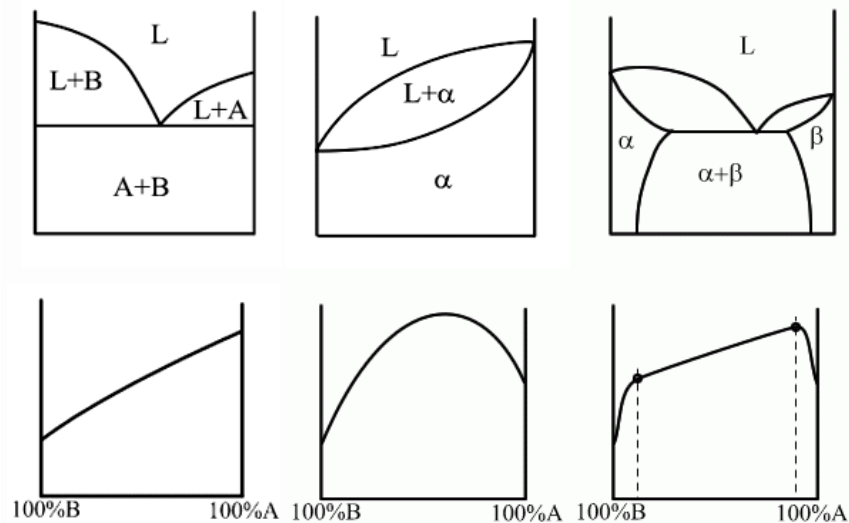


Для двухфазной области fdeg правило отрезков также работает. Изменение относительного количества и химического состава в этой области происходит за счет изменения растворимости компонентов друг в друге и соответствующих диффузионных процессов перераспределений внутри сплавов.

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.



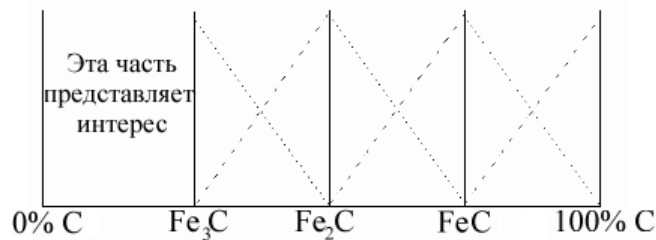
Эта связь позволяет:

- 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.

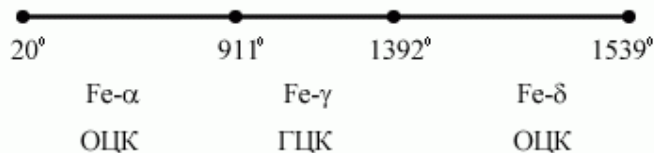
Диаграмма Fe-Fe₃C является частью диаграммы железо-углерод.



Общие принципы построения диаграммы.

В основе всех превращений лежат следующие явления:

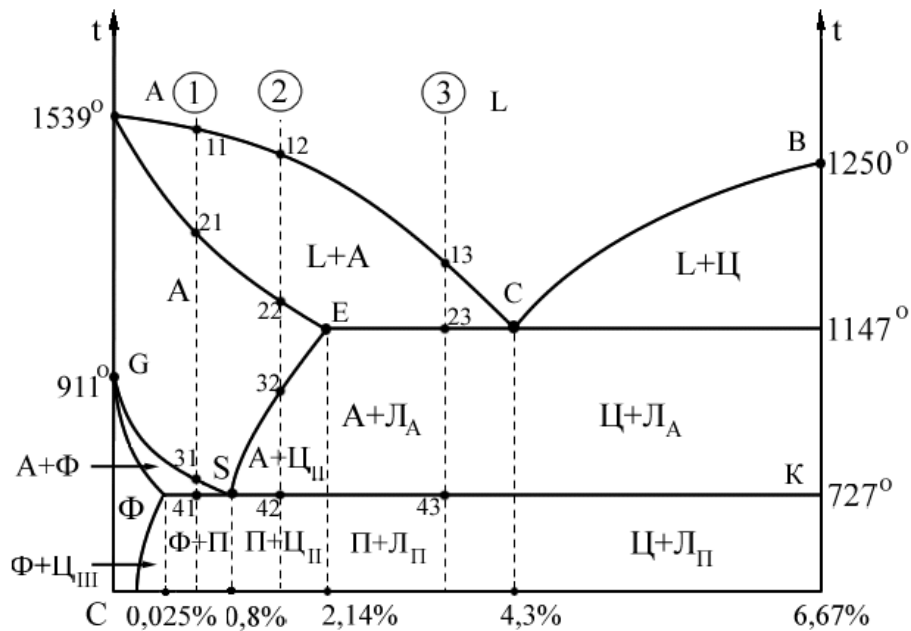
- 1) Наличие у железа нескольких вариантов кристаллической решетки (аллотропические модификации). Для чистого железа существуют диапазоны:



Изменение типа решетки приводит к существенному изменению физических свойств. В дальнейшем высокотемпературная область Fe_δ рассматриваться не будет, так как не представляет интереса. Будем считать, что от 911° C до 1539° C – область Fe_γ.

- 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.

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

П – перлит – эвтектоидная механическая смесь феррита и цементита. Содержание углерода – 0,8%. Образуется в результате перераспределения углерода в A 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_α ; 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.

Л_A – ледебурит аустенитный – эвтектическая смесь фаз A и Ц. Образуется при температуре 1147° С (линия ECD).

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

Основные линии на диаграмме.

ACB – линия ликвидус.

AECD – линия солидус.

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

SE – линия предельной растворимости C в A; ниже линии C выделяется в виде Ц_{II}.

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

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

PM – линия предельной растворимости C 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': $k = 2$; $f = 3$ (Ф + А + Ц); $c = 2-3+1=0$ ($t = \text{const}$).

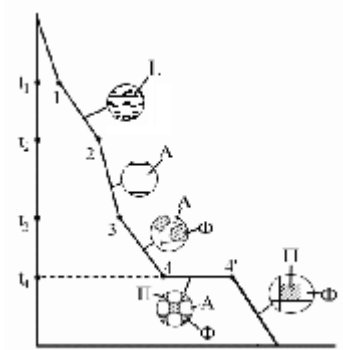
1–2 – первичная кристаллизация А из жидкости

2–3 – охлаждение А (превращений нет)

3–4 – диффузионное перераспределение углерода, образование Ф, повышение содержания углерода в А.

4–4' – распад А, образование П.

Ниже 4' – охлаждение сплава, выделение избыточного углерода из Ф (Ц_{III}).



1) Заэвтектоидная сталь:

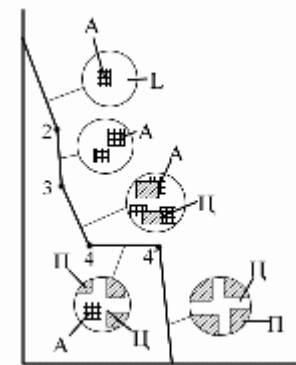
1–2 – первичная кристаллизация, образование аустенитной структуры

2–3 – охлаждение твердого сплава (превращений нет)

3–4 – вторичная кристаллизация; 3 – образование насыщенного твердого раствора углерода в Fe_γ. 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 А в П; 4' – конец превращения; $t = 727^\circ \text{C} = \text{const}$.

Ниже 4' – остывание сплава, идет процесс третичной кристаллизации, Ц_{III} из феррита (теоретически).



1) Доэвтектический чугун:

1–2 – кристаллизация аустенита.

2–2' – кристаллизация эвтектики L_A ($t = 1147^\circ \text{C}$);

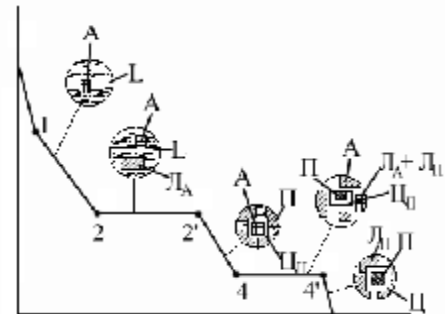
2' – конец первичной кристаллизации, жидкости нет.

2'–4 – образование вторичного цементита.

4–4' – эвтектоидное превращение А в П.

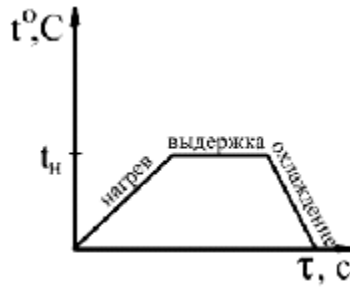
Ниже 4' – остывание сплава.

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.

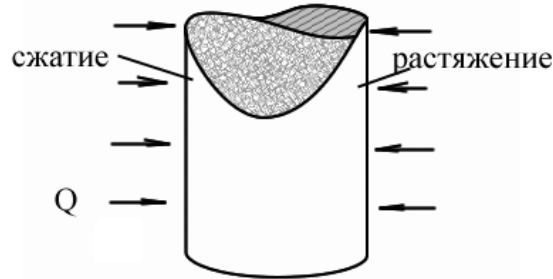


Термическая обработка стали.

Термическая обработка – комплекс мероприятий, направленных на изменение внутреннего строения сплава и его свойств и заключающийся в сочетании определенных этапов нагрева и, выдержки и охлаждения с заданной скоростью.



1) Нагрев. Основная характеристика – скорость нагрева. Выбор скорости нагрева определяется характером распределения температуры внутри детали. В результате неравномерного нагрева деталь может разрушиться.



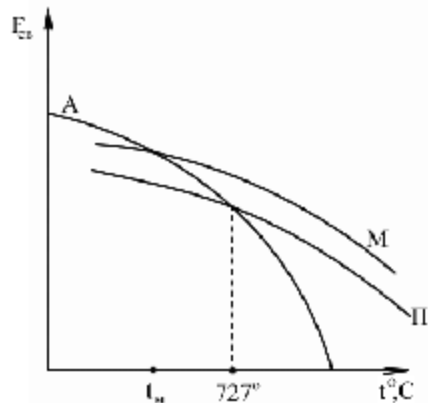
Термические напряжения.

2) Выдержка. Температура нагрева – определяющий параметр. В зависимости от температуры меняется характер диффузионных процессов. Коэффициент диффузии: $D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$, где D – постоянная; Q – энергия активации; T – температура. Время выдержки – второстепенный параметр, выбирается так, чтобы а) обеспечить равномерное распределение температуры по требуемому объему металла б) обеспечить завершение необходимых процессов.

3) Охлаждение. Скорость охлаждения – критический параметр. В зависимости от скорости охлаждения процессы в структуре могут быть а) диффузионными (малая скорость) б) бездиффузионными (большая скорость). Результат в зависимости от скорости охлаждения качественно различный.

Основные превращения в сплавах Fe-C.

Все превращения, происходящие в сплавах Fe-C, подчинены принципу минимума свободной энергии.



М – мартенсит, А – аустенит, П – перлит.

Наличие нескольких уровней свободной энергии для твердой структуры сталей означает:

1) Если процесс равновесный, то есть охлаждение происходит медленно, то система всегда перейдет в состояние с минимальной свободной энергией.

2) Если охлаждение быстрое (процесс неравновесный) то система за счет подавления диффузии может остановиться на промежуточном уровне. Возникающая структура не устойчива, то есть при создании соответствующих условий (повышение температуры, ускорение диффузии) система может вернуться в равновесное состояние.

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в кристаллической решетке α -железа. Особенности: термодинамически неравновесен; образуется при быстром охлаждении аустенита; бездиффузионный процесс.

Основные превращения при термической обработке.

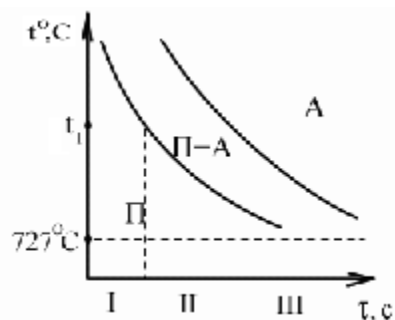
1) Превращение перлита в аустенит. Превращение происходит при $t_1 > 727^\circ \text{C}$. Процесс диффузионный: происходит перераспределение углерода внутри кристалла, распад цементита, вход в состояние перлита, изменение типа кристаллической решетки, образуется ГЦК, γ -железо.

Этапы превращения:

I. Инкубационный период. Кристаллы П не изменяются.

II. Процесс превращения. Отдельные кристаллы П превращаются в А. В структуре присутствуют и П, и А.

III. Образование устойчивой аустенитной структуры. С повышением температуры длительность фазы I уменьшается.



2) Превращение аустенита в перлит.

Превращение происходит при $t_1 > 727^\circ \text{C}$. Процесс диффузионный, иллюстрируется диаграммой изотермического распада аустенита.

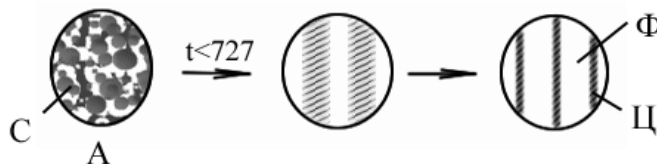
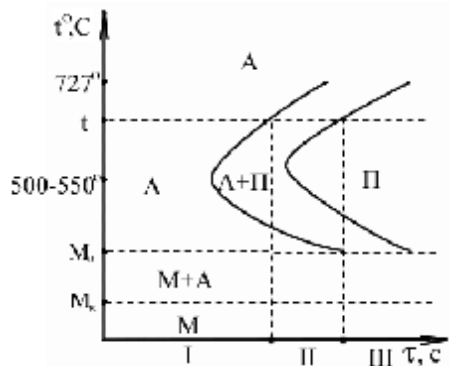
Линия начала распада – геометрическое место точек начала превращения А в П при температуре $t > 727^\circ \text{C}$.

Линия конца распада – геометрическое место точек окончания превращения А в П, образование перлитной структуры.

M_H – температура начала мартенситного превращения, температура прекращения диффузионных процессов перераспределения углерода.

M_K – температура конца мартенситного превращения.

До температуры $500\text{--}550^\circ \text{C}$ процесс распада А ускоряется, так как термодинамическое равновесие нарушается сильнее, а диффузия еще достаточно интенсивна. При температуре $< 550^\circ \text{C}$ процесс превращения замедляется из-за уменьшения скорости диффузии.



Этапы превращения:

I. Инкубационный период. Атомы углерода концентрируются вдоль определенных плоскостей, образуя плоские зоны с повышенной концентрацией углерода.

II. Образование первых кристаллов П.

III. Полное превращение аустенита в перлит. При понижении температуры размеры пластинок Ц и Ф уменьшаются, то есть перлитная структура становится мелкодисперсной.

3) Превращение аустенита в мартенсит. Процесс бездиффузионный. Превращение

происходит при $M_H < t < M_K$. Каждому значению температуры соответствует строго определенное отношение А и М. С понижением температуры количество аустенита уменьшается, увеличивается количество мартенсита. Скорость образования мартенсита в несколько раз превышает скорость звука, этот процесс происходит практически мгновенно. Мартенсит не существует в виде отдельных кристаллов, а образуется в виде большого объема металла. Условно размер кристаллов мал. Говорят о сплошных бесструктурных М. Из-за сильного искажения кристаллической решетки М, образующаяся структура является практически сплошным объемом, из которого невозможно выделить отдельные кристаллы. Сильное искажение решетки приводит к значительному увеличению твердости и прочности. Причина – напряжение межзатомных связей. Образование Мартенсита – смысл закалки.

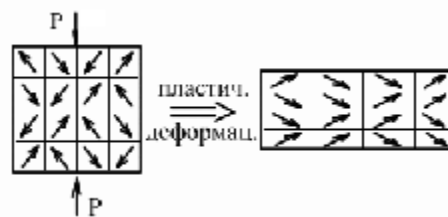
Виды термической обработки.

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.

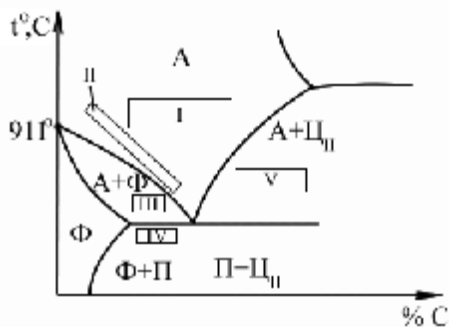
Металл, свойства которого были одинаковы во всех направлениях из-за произвольной хаотической ориентации кристаллов приобретает преимущественные направления распределения свойств. Устранить влияние пластической деформации на структуру металла можно двумя способами.



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.

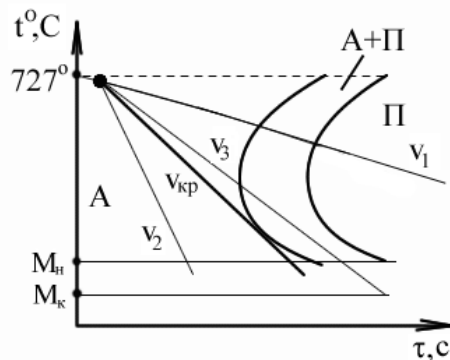
III, IV. Неполный отжиг. Происходит уменьшение степени неравновесности, частично сохраняются следы предварительной термообработки.

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.

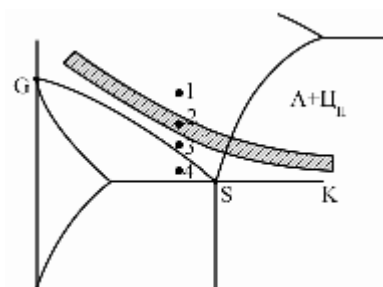
2) Температура оптимальная: превращение происходит быстро, результат качественный.

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 20–50° С 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.

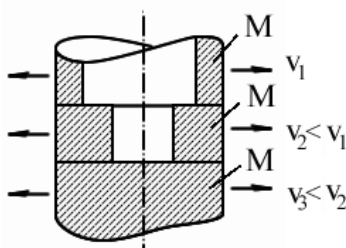


После закалки при температуре на 20–50° С выше линии SK, избыточный углерод остается в виде цементита, содержание углерода в аустените пониженное, аустенит практически полностью превращается в мартенсит. Влияние остаточного аустенита компенсируется высокой прочностью и твердостью вторичного цементита.

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.

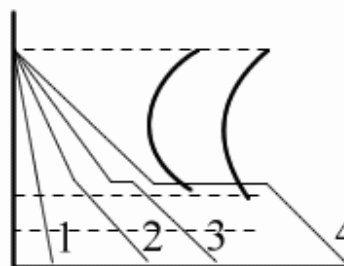
Цель отпуска: Улучшение механических свойств закаленной стали, снижение хрупкости, повышение пластичности, некоторое снижение твердости и прочности.

Закалка + Отпуск = Улучшение свойств стали.

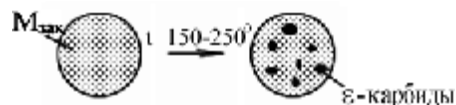
Исходная структура – мартенсит закалки: высокое содержание углерода, сильно искаженная кристаллическая решетка, значительное напряжение в структуре, высокая степень неравновесности.

Виды отпуска:

1) Низкотемпературный отпуск (низкий отпуск):



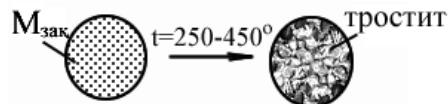
Исходная структура – мартенсит закалки, температура отпуска $t_{отп} = 150-250^\circ \text{C}$. В результате отпуска – мартенсит отпуска и ϵ -карбиды.



При повышении температуры активизируется диффузия. Часть атомов углерода покидает кристаллы мартенсита, концентрируется в локальных областях, где образуется карбид железа (ϵ -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):

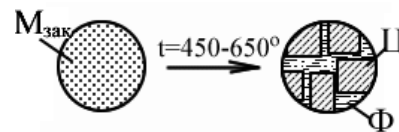
Исходная структура – мартенсит закалки, температура отпуска $t_{отп} = 250-450^\circ \text{C}$. В результате отпуска – тростит отпуска.



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 равноостные, 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 $t_{отп} = 450-650^\circ \text{C}$. 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.

Состав и маркировка высокоуглеродистых сталей.

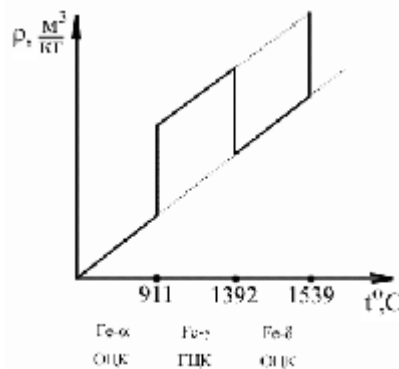
Состав сталей.

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_γ (ГЦК) при переходе Fe_γ в Fe_α 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 O₂). 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: БГГЗПС

а) б) в)

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): Y13A

а) б) в)

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: $\overset{C=13\%}{37} \overset{Mn=8\%}{X13} \overset{Mo<1,5\%; V<1,5\%; Nb<1,5\%}{f8} N8 \overset{Mn=8\%}{Mn} \overset{Mo<1,5\%; V<1,5\%; Nb<1,5\%}{Mn} \overset{Mn=8\%}{Mn} \overset{Mo<1,5\%; V<1,5\%; Nb<1,5\%}{Mn} \overset{Mn=8\%}{Mn}$

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.

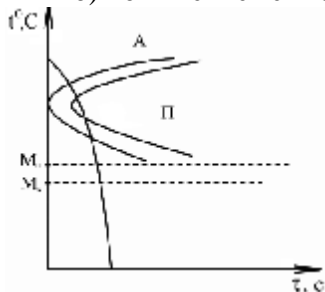
- а) По назначению:
- конструкционные (строительные и машиностроительные);
 - инструментальные (штамповые);
 - стали с особыми свойствами (нержавеющие, жаропрочные, немагнитные);
- б) По степени легированности:
- низколегированные $0\% \leq \sum \text{л.э.} \leq 2,5\%$
 - среднелегированные $2,5\% \leq \sum \text{л.э.} \leq 10\%$
 - 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 (37X13Г8Н8МБФ);
- 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.

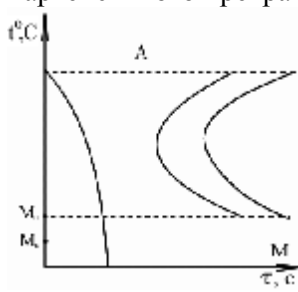
Все легирующие элементы, кроме алюминия и кобальта, повышают устойчивость аустенита при температуре ниже критической.

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

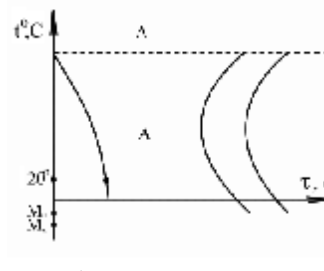
- а) увеличивается продолжительность инкубационного периода до распада аустенита (кривые сдвигаются вправо);
- б) понижение температуры мартенситного превращения.



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.

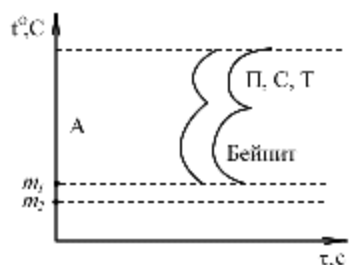
5. Марганец. Марганец способствует повышению твердости и прочности, обеспечивает высокую вязкость сталей.

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.



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/см³);
- высокая пластичность;
- высокая тепло- и электропроводность;
- коррозионная стойкость (наличие оксидного слоя Al₂O₃);

Отрицательные свойства алюминия:

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

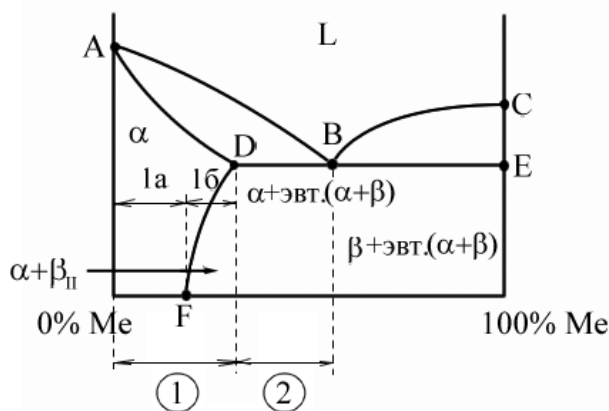
Алюминий применяется как конструкционный материал. Из него изготавливают слабонагруженные детали в химических аппаратах.

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: (1а) – 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.

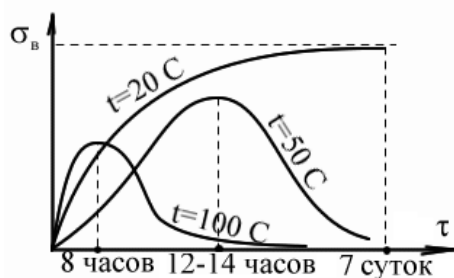
Закалка – нагрев выше температуры DF и охлаждение со скоростью выше критической; результат – образование пересыщенного твердого раствора меди в алюминии (после закалки $\sigma_b = 250$ Мпа).

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.

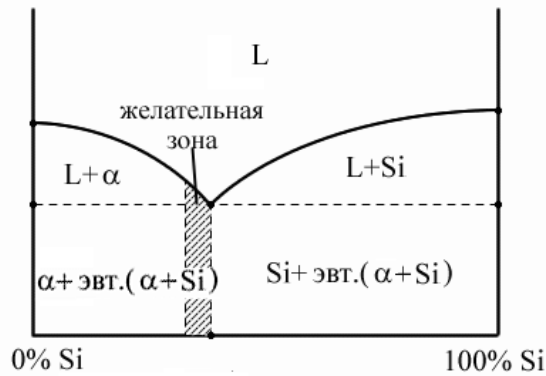


При искусственном старении увеличение времени выдержки может привести к образованию вторичных β - кристаллов и падению предела прочности до $\sigma_b = 200$ Мпа.

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, $\sigma_b = 150\text{--}170$ 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).

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	М00	М0	М1	...
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).

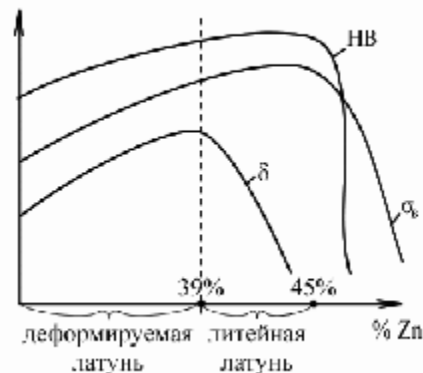
Существует однофазная (содержит α -твердый раствор цинка в алюминии, $Zn < 39\%$) и двухфазная (содержит α -твердый раствор и β -твердый раствор цинка в алюминии, $39\% < Zn < 45\%$) латунь.

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.