

Материаловедение

Andreyachshenko V.A.

PhD, associative professor

Почему мы изучаем
материаловедение?

- Материаловедение – наука о материалах, их строении и свойствах. По применению в технике металлы и их сплавы являются самым обширным и универсальным классом материалов.
- В курсе «Материаловедение» изучается зависимость между составом, строением и свойствами металлов и сплавов, а также закономерности их изменения под действием внешних факторов: тепловых, химических, механических, электромагнитных и радиоактивных.
- Все основные физико-химические свойства металлов и сплавов определяются их атомно-кристаллическим строением и местом металлов в периодической системе элементов, и именно поэтому наука о металлах начинается с изучения кристаллического строения металлов.

Лекция 1

Кристаллическое строение металлов

План занятия:

- 1.1 Общая характеристика и структурные методы исследования металлов.
- 1.2 Атомно-кристаллическая структура металлов.
- 1.3 Дефекты кристаллов

1.1 Общая характеристика и структурные методы исследования металлов.

- Все металлы и металлические сплавы – тела кристаллические, атомы (ионы) расположены в металлах закономерно в отличие от аморфных тел, в которых атомы расположены хаотично.
- Металлы (если их получают обычным способом) представляют собой поликристаллические тела, состоящие из большого числа мелких ($10^{-1} \dots 10^{-4}$ см), различно ориентированных по отношению друг к другу кристаллов. В процессе кристаллизации они приобретают неправильную форму и называются кристаллитами, или зернами.

Характерные свойства металлов

- высокие теплопроводность и электрическая проводимость;
- положительный температурный коэффициент электрического сопротивления; с повышением температуры электрическое сопротивление чистых металлов возрастает; большое число металлов (~30) обладает сверхпроводимостью (у этих металлов при температуре, близкой к абсолютному нулю, электрическое сопротивление падает скачкообразно, практически до нуля);
- термоэлектронная эмиссия, т.е. способность испускать электроны при нагреве;
- хорошая отражательная способность: металлы непрозрачны и обладают металлическим блеском;
- повышенная способность к пластической деформации.

Чистые металлы в обычном структурном состоянии обладают низкой прочностью и не обеспечивают во многих случаях требуемых свойств, поэтому они применяются сравнительно редко.

Наиболее широко используются сплавы, которые получают сплавлением или спеканием порошков двух или более металлов или металлов с неметаллами. Они обладают характерными свойствами, присущими металлическому состоянию.

Химические элементы, образующие сплав, называют *компонентами*. Сплав может состоять из двух или большего числа компонентов

Совокупность фаз, находящихся в состоянии равновесия, называют *системой*.

Фазой называют однородные (гомогенные) составные части системы, имеющие одинаковый состав, кристаллическое строение и свойства, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от составных частей поверхностями раздела.

Под структурой понимают форму, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах.

Структурными составляющими сплава называют обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

Различают

- *макроструктуру* (строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении в 30 – 40 раз)

и

- *микроструктуру* (строение металла или сплава, наблюдаемое с помощью микроскопа при больших увеличениях).

- Макроструктуру исследуют на специальных макрошлифах (темплетах). Для приготовления макрошлифа образцы вырезают из крупных заготовок (слитков, поковок и т. д.) или изделий, поверхность которых шлифуют, полируют, а затем подвергают травлению специальными реактивами.
- При исследовании макрошлифа можно обнаружить форму и расположение зерен в литом металле; волокна (деформированные кристаллиты) в поковках и штамповых заготовках, дефекты, нарушающие сплошность металла; химическую неоднородность сплава, вызванную процессом кристаллизации или созданную термической или химико-термической (цементация, азотирование и т. д.) обработкой.

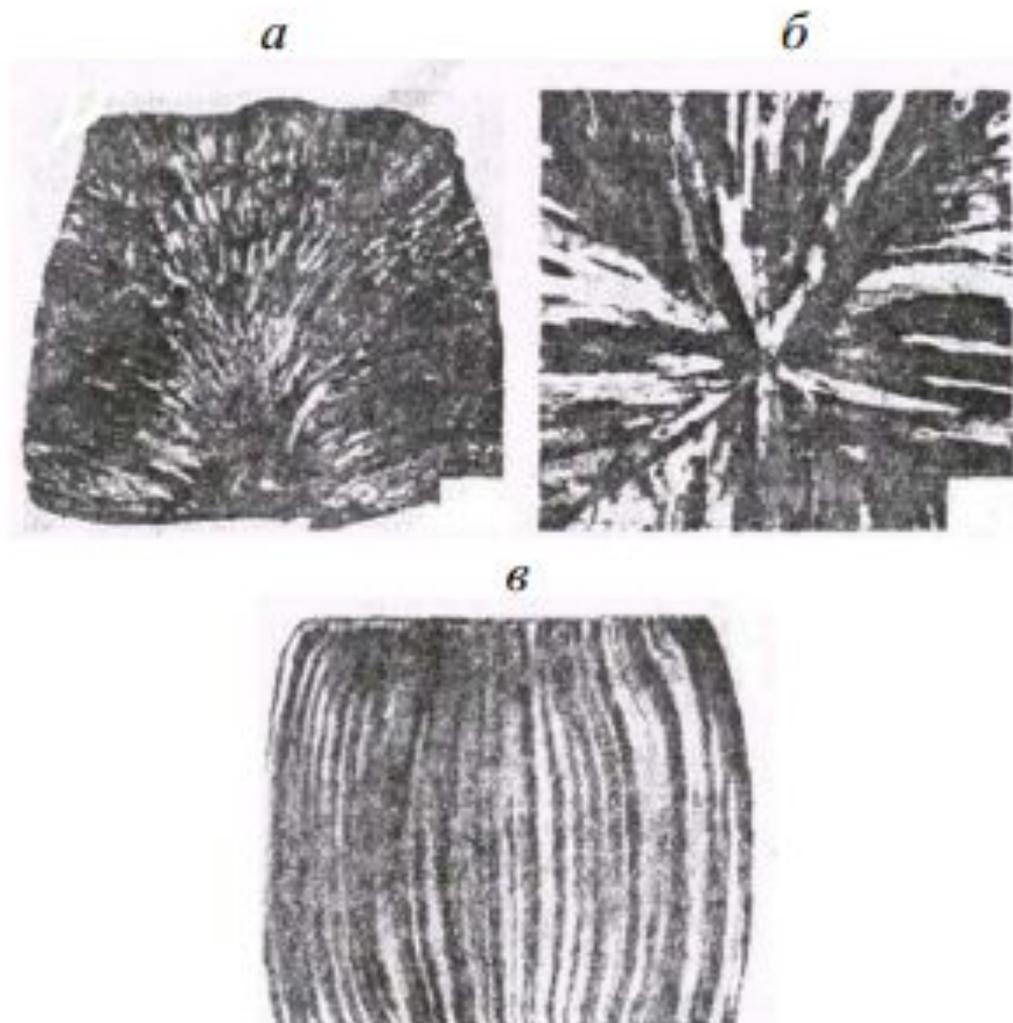


Рис. 1. Макроструктура излома слитка цинка (*a*), слитка меди (*б*) и деформированной стали (*в*)

- Микроструктура показывает размер и форму зерен, взаимное расположение фаз, их форму и размеры.
- Микроструктуру металлов наблюдают в микроскопе – оптическом или электронном.
- Для оценки металлургического качества металла, закономерностей процесса разрушения, влияния структурных, технологических и других факторов на разрушение широко применяют методы фрактографии – области знания о строении изломов.
- Под изломом понимают поверхность, образующуюся в результате разрушения металла. Вид излома определяется условиями нагружения, кристаллографическим строением и микроструктурой металла (сплава), формируемой технологией его выплавки, обработки давлением, термической обработки, температурой и средой, в которой работает конструкция.

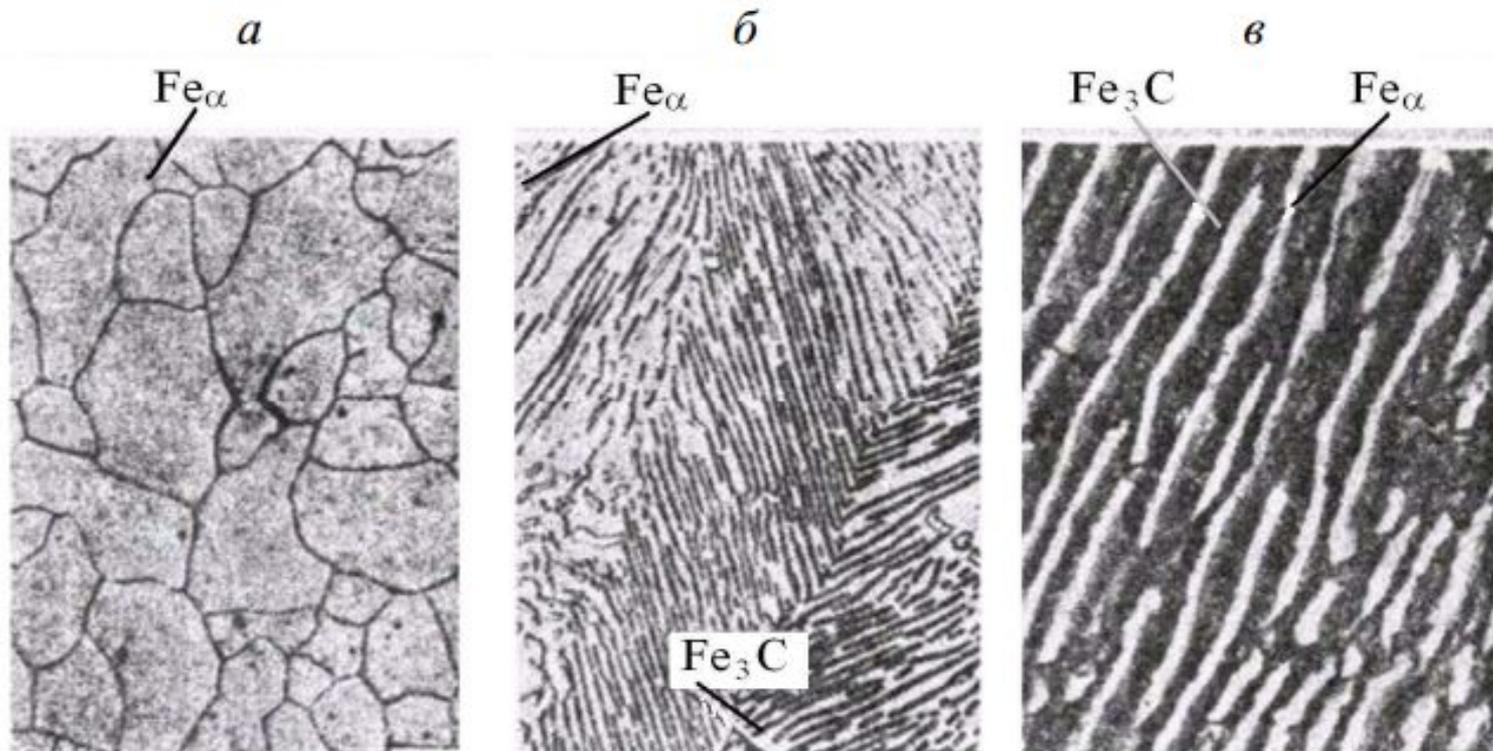
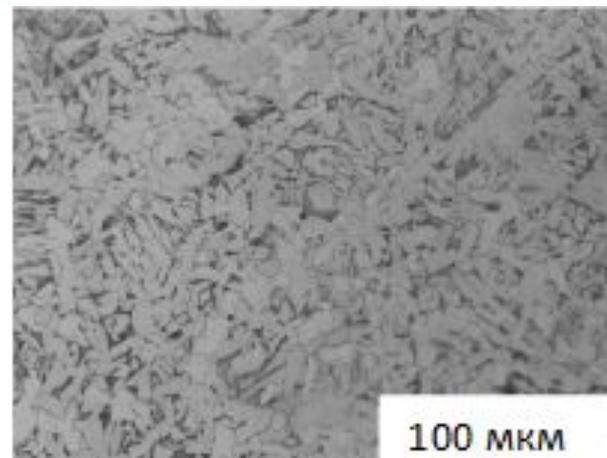
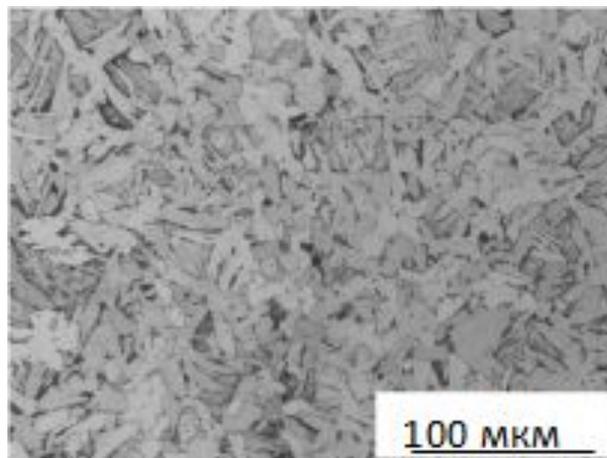
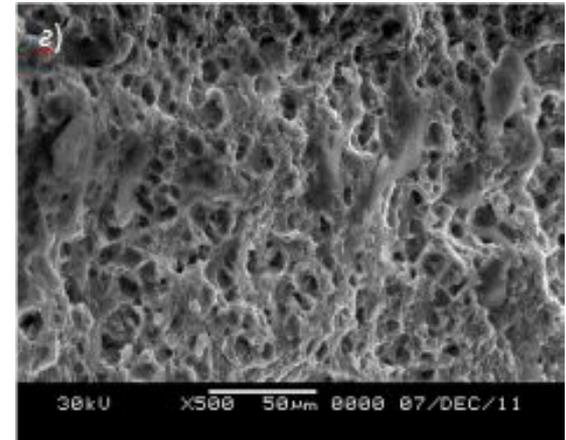
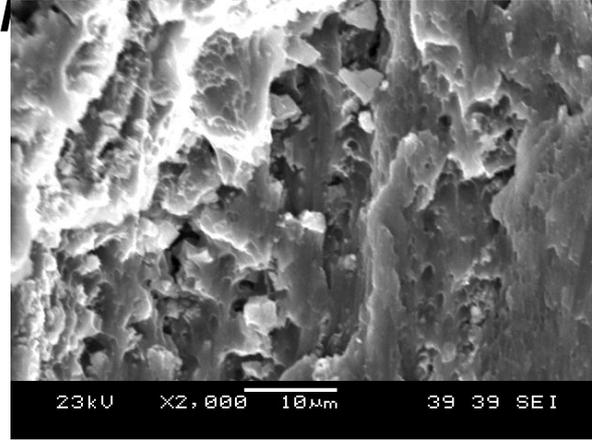
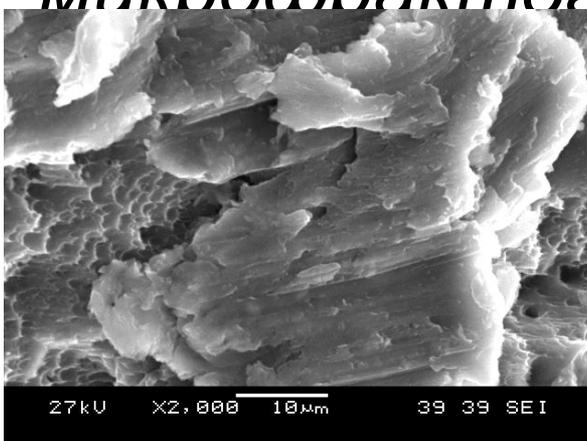


Рис. 2. Микроструктура железа (а) и стали с 0,8 % С (б, в):
 а – $\times 250$; б – $\times 300$; в - электронная микрофотография, $\times 5000$



Изломы изучают на макро- и микроуровне. Метод визуального изучения изломов, а также с помощью светового микроскопа при небольших увеличениях, называется *фрактографией*.

Исследование особенностей тонкой структуры изломов под электронным или растровым микроскопом носит название *микрофрактографии*.



- Для изучения атомно-кристаллического строения применяют рентгеноструктурный анализ. Он основан на дифракции рентгеновских лучей с очень малой длиной волны (0,02 – 0,2 нм) рядами атомов в кристаллическом теле. Для этой цели кроме рентгеновских лучей используют электроны и нейтроны, которые также дают дифракционные картины при взаимодействии с ионами (атомами) металла.
- В металловедении все шире применяют метод рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) для изучения распределения примесей и специально введенных элементов в сплавах. Метод РСМА определяет химический состав микрообластей на металлографическом шлифе, при этом достигается разрешение порядка микрометров.

Для изучения металлов и сплавов нередко используют физические методы исследования (тепловые, объемные, электрические, магнитные). В основу этих исследований положены взаимосвязи между изменениями физических свойств и процессами, происходящими в металлах и сплавах при их обработке или в результате тех или иных воздействий (термических, механических и др.). Наиболее часто применяют дифференциальный термический анализ (построение кривых охлаждения в координатах температура – время) и дилатометрический метод, основанный на изменении объема при фазовых превращениях. Для ферромагнитных материалов применяется магнитный анализ.

1.2 Атомно-кристаллическая структура металлов.

Под атомно-кристаллической структурой понимают взаимное расположение атомов (ионов), существующее в реальном кристалле.

Связь в металле осуществляется электростатическими силами. Между ионами и коллективизированными электронами проводимости возникают электростатические силы притяжения, которые стягивают ионы. Такая связь называется металлической

Силы связи в металлах определяются силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами.

Атомы (ионы) располагаются на таком расстоянии один от другого, при котором энергия взаимодействия минимальна.

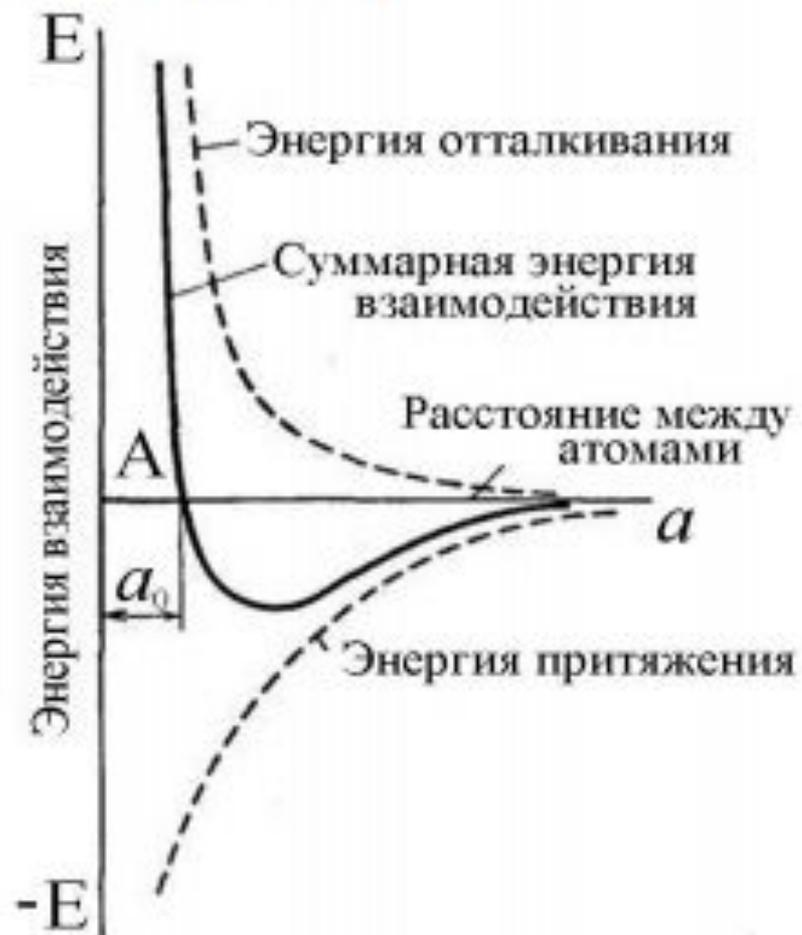
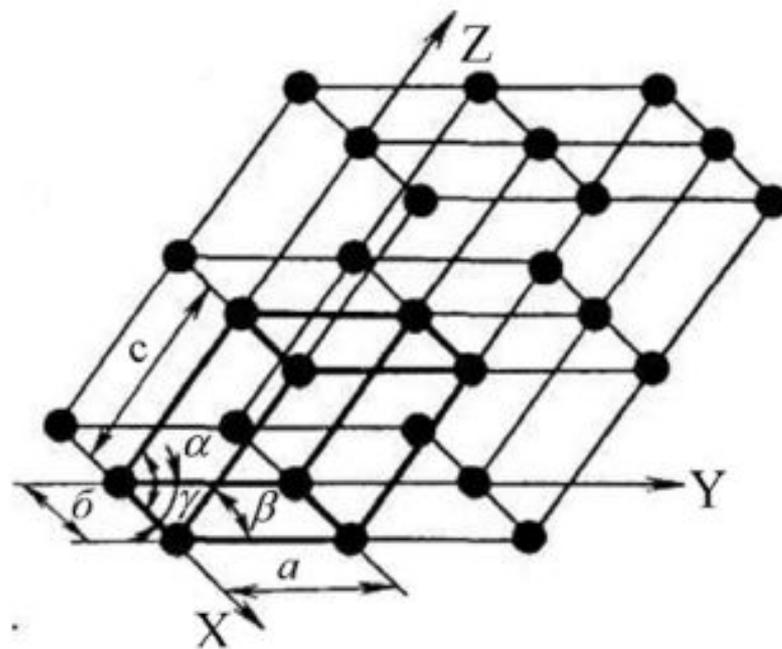


Схема взаимодействия двух атомов в зависимости от межатомного расстояния

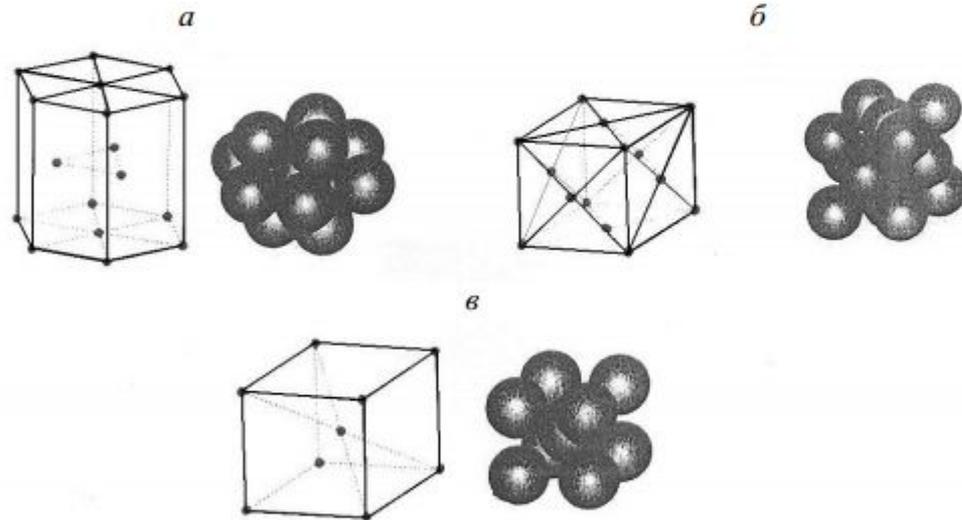
Кристаллическая решетка состоит из воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки расположения ионов в пространстве.

Наименьший параллелепипед, последовательным перемещением которого вдоль трех своих осей может быть построен весь кристалл называется элементарной ячейкой.

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме называется элементарной кристаллической ячейкой



Для однозначной характеристики кристаллической ячейки необходимо знать следующие величины: три ребра (a , b и c) и три угла между осями α , β и γ . Большинство металлов образует одну из следующих высокосимметричных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемноцентрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную плотноупакованную.



Плотность кристаллической решетки – объема, занятого атомами, которые условно можно рассматривать как жесткие шары, характеризуется координационным числом, под которым понимают число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома. Чем выше координационное число, тем больше плотность упаковки атомов.

- Для определения положения атомных плоскостей в кристаллических пространственных решетках пользуются индексами $(h \ k \ l)$, представляющими собой три целых рациональных числа, являющихся величинами, обратными отрезкам осей, отсекаемым данной плоскостью на осях координат.
- Индексы направлений $[u \ v \ w]$ – это три целых простых числа, являющиеся координатами узла от ближайшего начала ординат и расположенного на этом направлении.
- Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки свойства (химические, физические, механические) каждого монокристалла зависят от направления вырезки образца по отношению к направлениям в решетке. Подобная неодинаковость свойств монокристалла в разных направлениях называется анизотропией.

1.3 Дефекты кристаллов

В реальных кристаллах всегда содержатся дефекты, которые подразделяют на:

- точечные,
- линейные,
- поверхностные
- объемные

Точечные дефекты

К точечным дефектам относятся вакансии, межузельные атомы основного вещества, чужеродные атомы внедрения

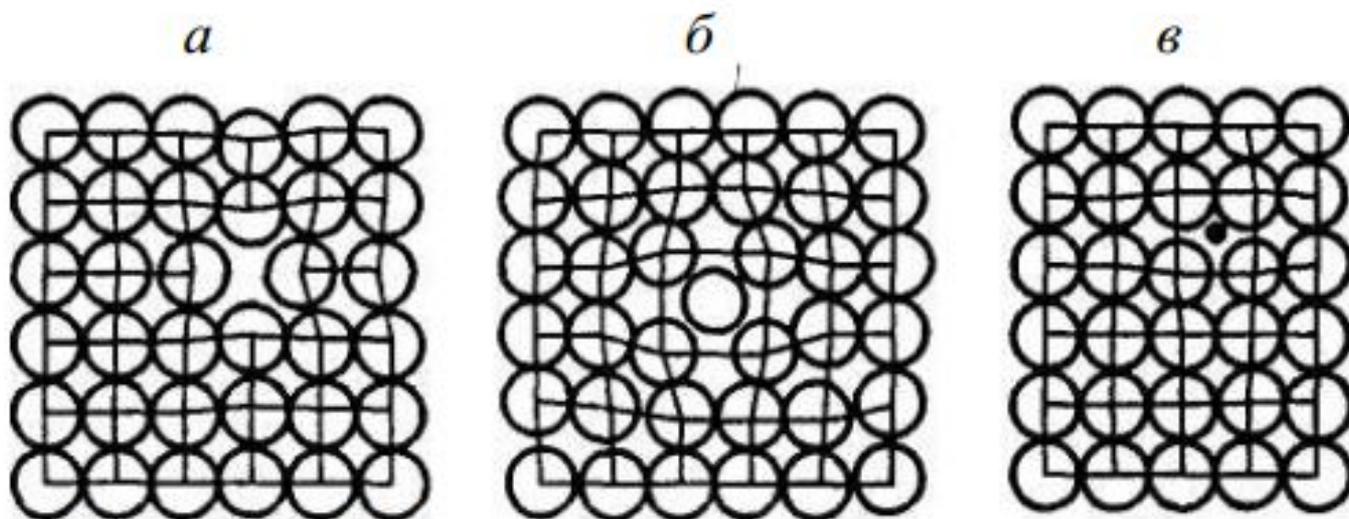


Рис. 8. Точечные дефекты в кристаллической решетке: *а* – вакансия; *б* – межузельный атом; *в* – примесный атом внедрения

Вакансии и межузельные атомы появляются в кристаллах при любой температуре выше абсолютного нуля из-за тепловых колебаний атомов. Каждой температуре соответствует равновесная концентрация вакансий, а также межузельных атомов.

Пересыщение точечными дефектами достигается при резком охлаждении после высокотемпературного нагрева, при пластическом деформировании и при облучении нейтронами.

Вакансии являются самой важной разновидностью точечных дефектов; они ускоряют все процессы, связанные с перемещениями атомов (диффузия, спекание²⁵

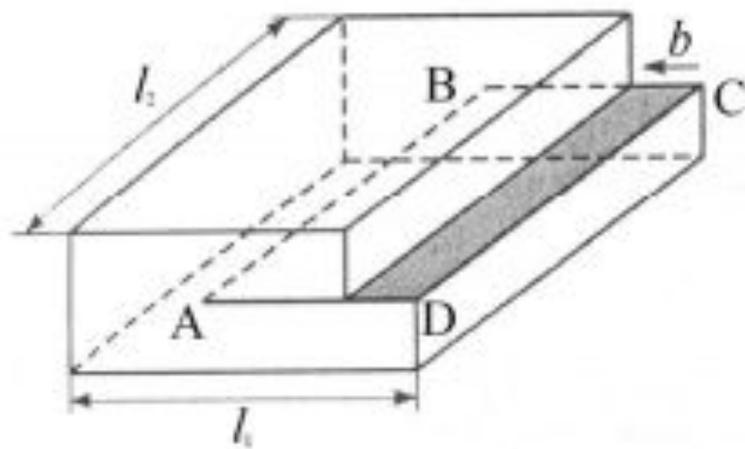
Линейные дефекты

Линейные несовершенства :

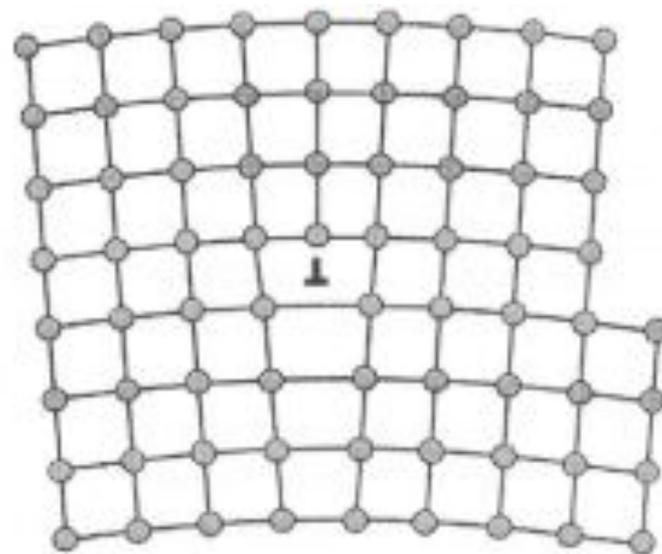
- краевые дислокации
- винтовые дислокации
- краудион
- дисклинации

Краевая дислокация в сечении представляет собой край «лишней» полуплоскости в решетке. Вокруг дислокаций решетка упруго искажена.

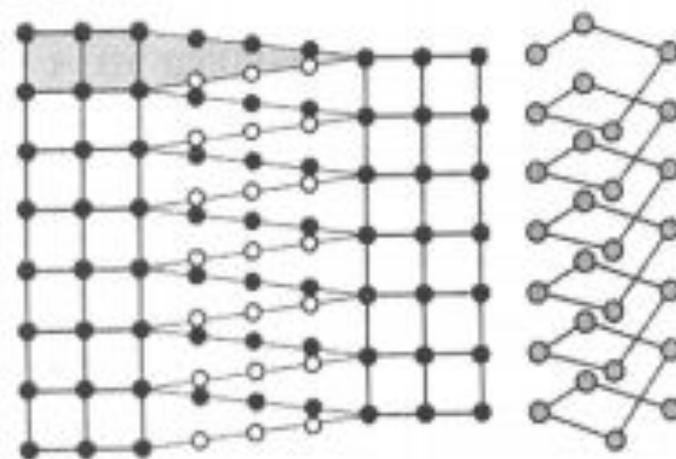
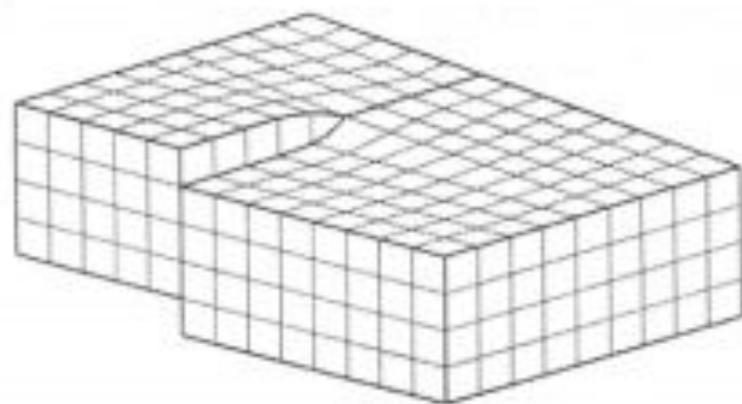
Мерой искажения служит вектор Бюргерса.



6



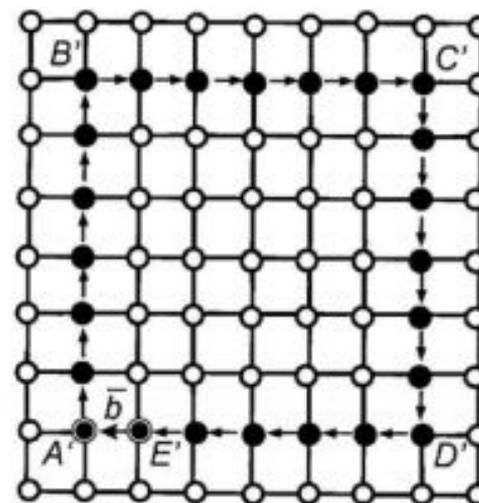
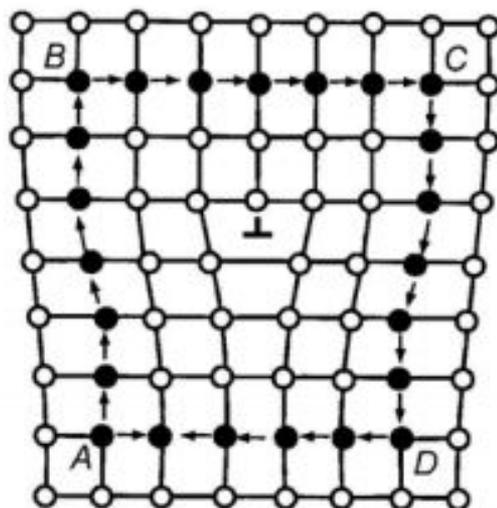
2



Вектор Бюргерса

У краевой дислокации вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен линии краевой дислокации, у винтовой дислокации – параллелен ей.

Полные дислокации легко перемещаются под действием напряжений в отличие от частичных дислокаций, у которых вектор Бюргерса меньше межатомного расстояния.

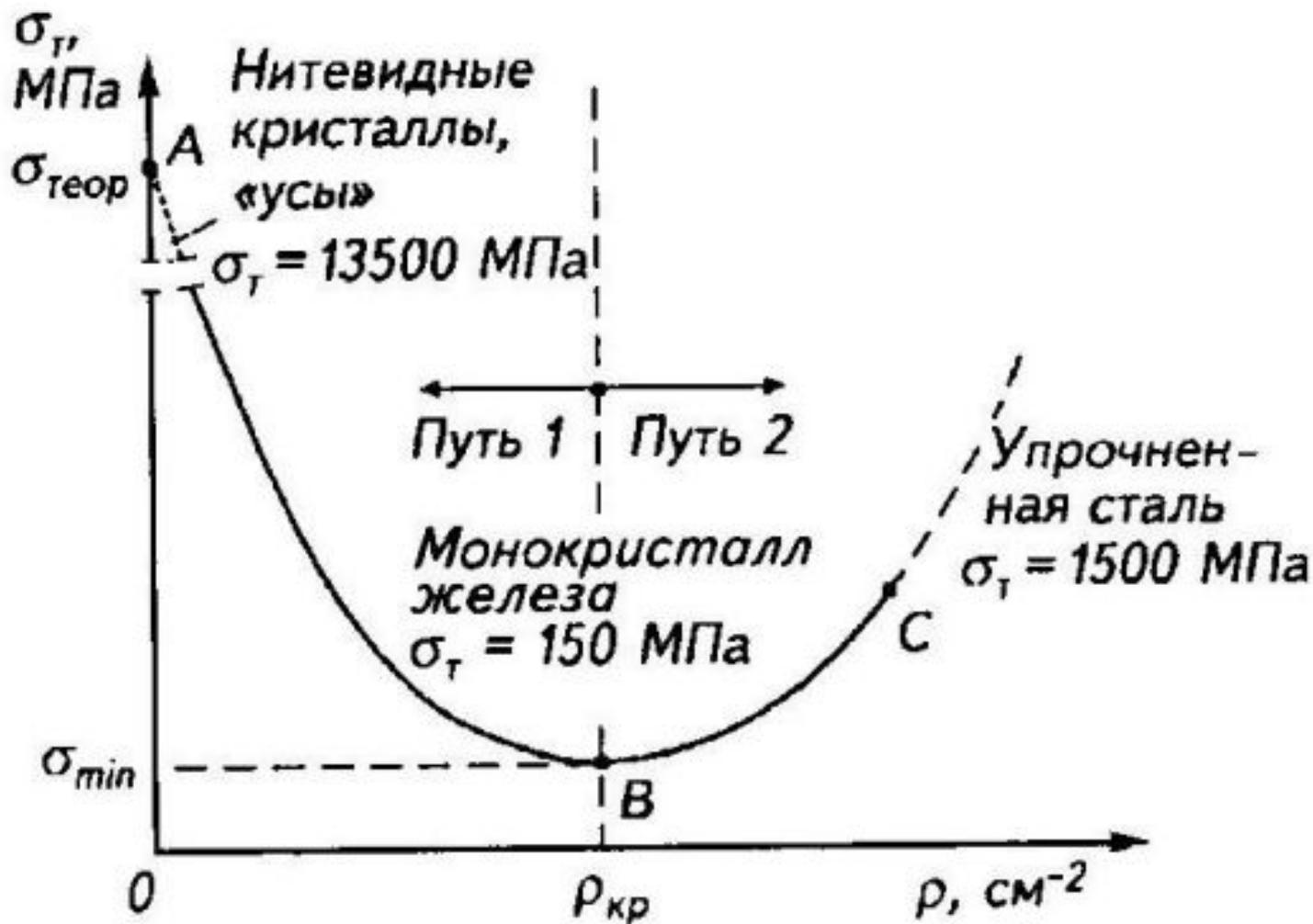


Плотность дислокаций – это суммарная длина всех линий дислокаций в единице объема.

Примесные атомы образуют вокруг дислокации зону повышенной концентрации – атмосферу Коттрелла, которая мешает движению дислокаций и упрочняет металл.

Прочность бездефектных участков (в том числе длинных и тонких «усов», полученных кристаллизацией из газовой фазы) приближается к теоретической

Зависимость предела текучести σ_T от плотности дислокаций ρ



Поверхностные дефекты

- большеугловые границы
- малоугловые границы
- дефекты упаковки
- границы двойников

В соседних зернах решетки ориентированы различно, и граница между зернами представляет собой переходный слой шириной 1 – 5 нм.

В нем нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей.

Каждое зерно, в свою очередь, состоит из субзерен (блоков).

Дефект упаковки представляет собой часть атомной плоскости, ограниченную дислокациями, в пределах которой нарушен нормальный порядок чередования атомных слоев.

Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Аналогично, но более слабо влияет на механические свойства размер субзерен.

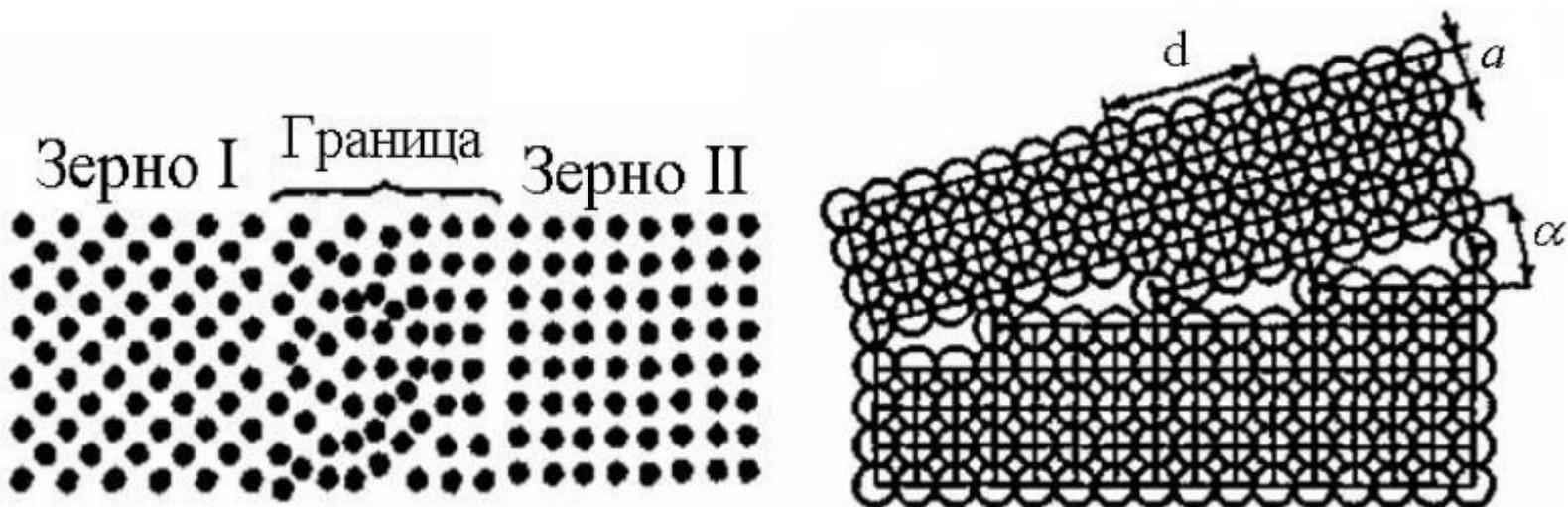


Рис. 12. Схемы строения большеугловых (а) и малоугловых (б) границ

Лекция 2

Кристаллизация металлов и строение слитка

План занятия:

- 2.1. Кристаллизация чистых металлов.
- 2.2 Строение металлического слитка.
- 2.3 Полиморфные магнитные превращения

2.1. Кристаллизация чистых металлов

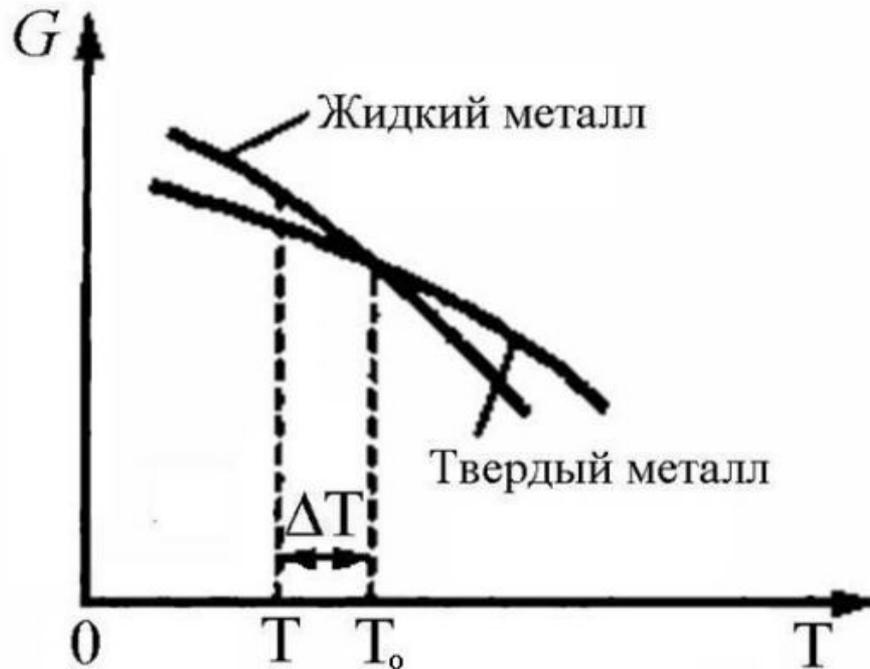
- Переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называется кристаллизацией.
- В жидком металле сохраняется так называемый ближний порядок, когда упорядоченное расположение атомов распространяется на небольшое расстояние. Вследствие интенсивного теплового движения атомов ближний порядок неустойчив.

Кристаллизация состоит из двух одновременно идущих процессов – зарождения и роста кристаллов. Кристаллы могут зарождаться самопроизвольно – самопроизвольная кристаллизация или расти на имеющихся готовых центрах кристаллизации – несамопроизвольная кристаллизация.

Самопроизвольная кристаллизация

- Самопроизвольная кристаллизация обусловлена стремлением вещества иметь более устойчивое состояние.
- Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей энергией Гиббса (свободной энергией) G , т. е. когда энергия Гиббса кристалла меньше, чем энергия Гиббса жидкой фазы.

Изменение энергии Гиббса



Процесс кристаллизации может протекать только при переохлаждении металла ниже равновесной температуры T_0 .

Разница между равновесной T_0 и реальной T температурой кристаллизации называется степенью переохлаждения ΔT .

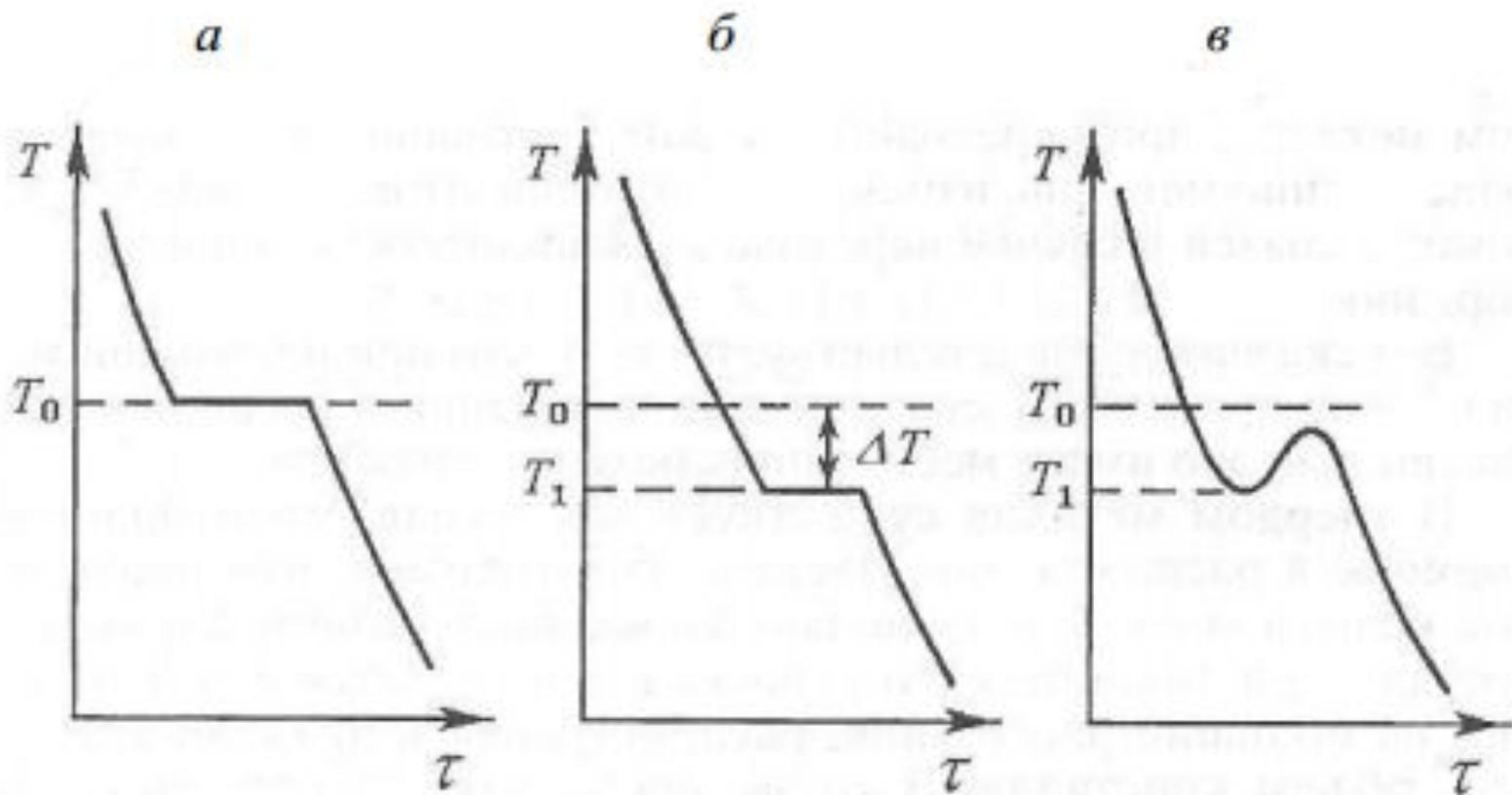


Рис. 14. Термические кривые охлаждения при кристаллизации металла в условиях равновесия (а) и переохлаждения (б, в)

Плавление – процесс, обратный кристаллизации, происходит при температуре выше равновесной, т. е. при перегреве.

Степень перегрева при плавлении металлов, как правило, не превышает нескольких градусов.

В жидкости имеются группировки атомов небольшого объема, в пределах которых расположение атомов вещества во многом аналогично их расположению в решетке кристалла. Эти группировки неустойчивы, они рассасываются и вновь появляются в жидкости. При переохлаждении жидкости некоторые из них (наиболее крупные) становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомов называют центрами кристаллизации (зародышами).

Образованию зародышей способствуют флуктуации энергии, т. е. отклонения энергии группировок атомов в отдельных зонах жидкого металла от некоторого среднего значения.

Размер образовавшегося зародыша зависит от величины зоны флуктуации.

Несамостоявольная кристаллизация

В реальных условиях процессы кристаллизации и характер образующейся структуры в значительной мере зависят от имеющихся центров кристаллизации.

Таковыми центрами являются частицы тугоплавких неметаллических включений, оксидов, интерметаллических соединений, образуемых примесями. К началу кристаллизации центры находятся в жидком металле в виде твердых включений.

Такая кристаллизация называется несамостоявольной, или гетерогенной. При несамостоявольной кристаллизации роль зародышей могут играть и стенки формы.

В жидком металле могут присутствовать растворенные примеси, которые также вызывают измельчение структуры.

Адсорбируясь на поверхности зарождающихся кристаллов, они уменьшают поверхностное натяжение на границе раздела жидкость – твердая фаза и линейную скорость роста кристаллов. Примеси, понижающие поверхностное натяжение, называют поверхностно-активными.

Измельчение структуры способствует улучшению механических свойств металла.

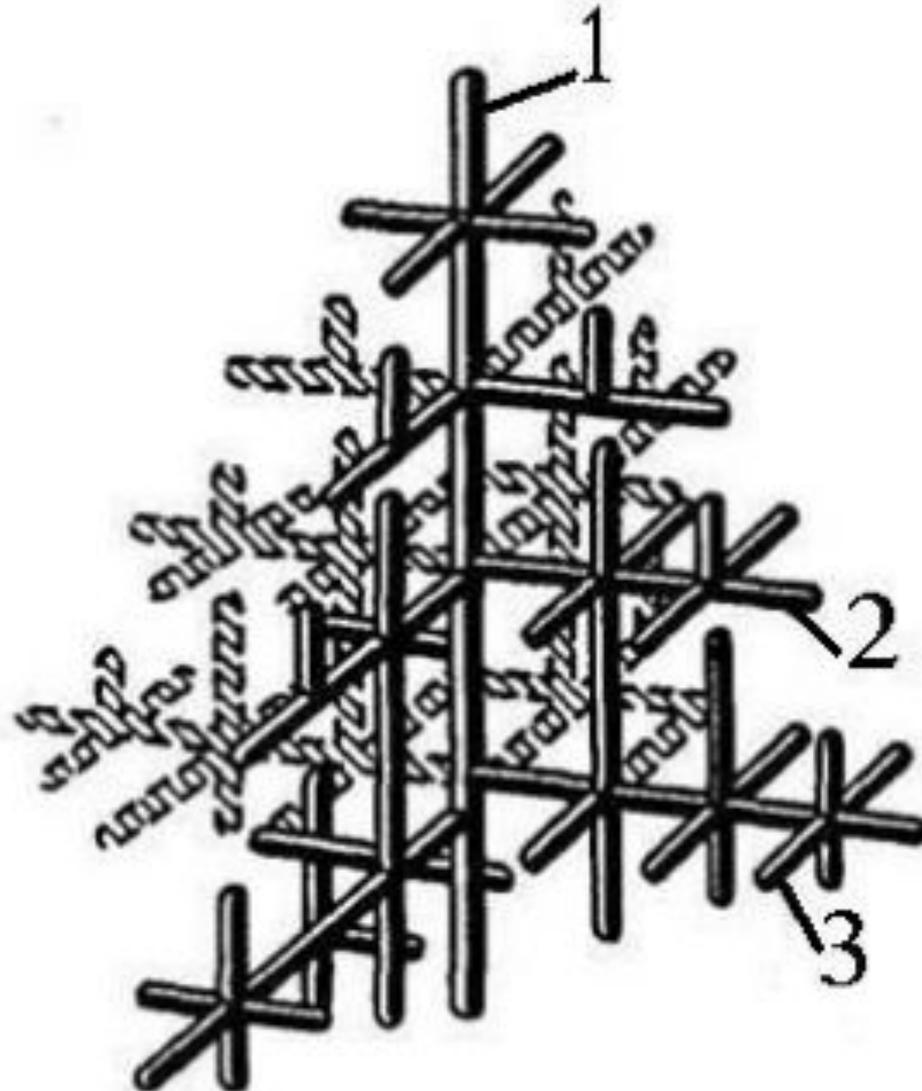
На практике для измельчения структуры металлов и сплавов широко применяют технологическую операцию, называемую модифицированием. Она состоит во введении в жидкий сплав перед разливкой специальных добавок – модификаторов. В качестве последних используют поверхностно-активные вещества (например, бор в сталях, натрий в алюминии и его сплавах), а также элементы, образующие тугоплавкие тонкодисперсные частицы (например, титан, цирконий в алюминии и его сплавах; алюминий, титан в сталях).

Модификаторы добавляют в сплавы в количествах от тысячных до десятых долей процента.

2.2 Строение металлического слитка

Рост зерна происходит по дендритной (древовидной) схеме. Максимальная скорость роста кристаллов наблюдается по наиболее плотно упакованным плоскостям и направлениям. В результате вырастают длинные ветви, которые называются осями первого порядка. По мере роста на осях первого порядка появляются и начинают расти ветви второго порядка, от которых ответвляются оси третьего порядка и т. д. В последнюю очередь идет кристаллизация в участках между осями дендритов. Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся между собой. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой. Такие кристаллы называют зернами или кристаллитами. При недостатке жидкого металла для заполнения межосных пространств (например, на открытой поверхности слитка или в усадочной раковине) кристалл сохраняет дендритную форму.

Схема строения дендрита



Кристаллы растут преимущественно в направлении, обратном отводу теплоты, поэтому при направленном теплоотводе образуются столбчатые кристаллы.

Если теплота от растущего кристалла отводится во всех трех направлениях с приблизительно одинаковой скоростью, формируются равноосные кристаллы.

Структура слитка зависит от:

- количества и свойств примесей в чистом металле или легирующих элементов в сплаве,
- температуры разливки, скорости охлаждения при кристаллизации,
- конфигурации, температуры, теплопроводности, состояния внутренней поверхности литейной формы.

Типичная структура слитка сплавов состоит из трех зон.

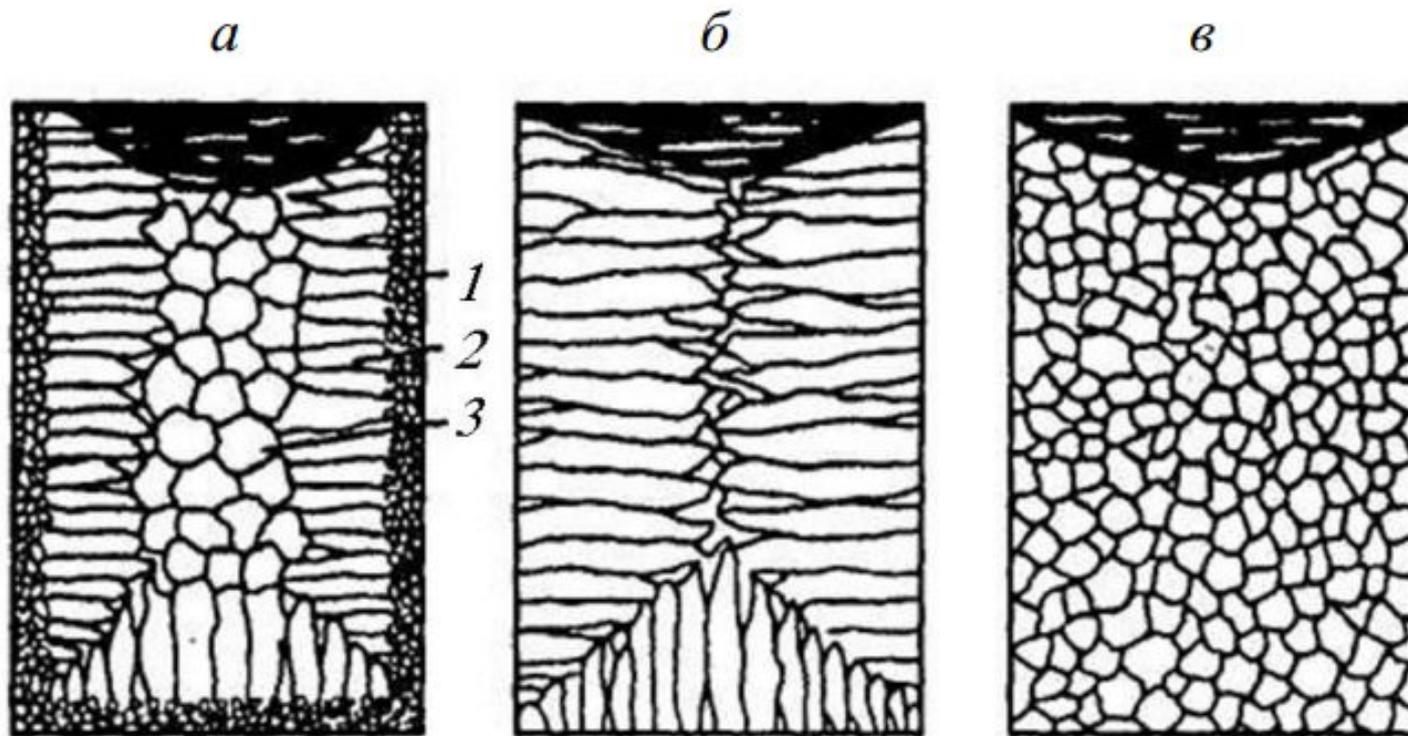


Рис.18. Схемы макроструктур слитков: *a* - типичная; *б* - транскристаллическая; *в* - однородная мелкозернистая

Большое научное и практическое значение имеют монокристаллы.

Монокристаллы отличаются минимальными структурными несовершенствами. Получение монокристаллов позволяет изучать свойства металлов, исключив влияние границ зерен.

Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность использовать их полупроводниковые свойства и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств.

Монокристаллы можно получить, если создать условия для роста кристалла только из одного центра кристаллизации.

Существует несколько методов, в которых использован этот принцип.

Важнейшими из них являются методы Бриджмена и Чохральского.

2.3. ПОЛИМОРФНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Существует два типа превращений, происходящих в металлах:

- полиморфные, связанные с превращением одной кристаллической решетки в другую;
- магнитные превращения, связанные с изменением магнитных свойств и не сопровождающиеся изменением кристаллической решетки.

Известны полиморфные превращения для металлов:

- $\text{Fe}\alpha \rightleftharpoons \text{Fe}\gamma \rightleftharpoons \text{Fe}\delta$;
- $\text{Co}\alpha \rightleftharpoons \text{Co}\beta$;
- $\text{Ti}\alpha \rightleftharpoons \text{Ti}\beta$;
- $\text{Mn}\alpha \rightleftharpoons \text{Mn}\beta \rightleftharpoons \text{Mn}\gamma \rightleftharpoons \text{Mn}\delta$;
- $\text{Sn}\alpha \rightleftharpoons \text{Sn}\beta$ и т. д.

Переход чистого металла из одной полиморфной модификации в другую в равновесных условиях протекает при постоянной температуре (критической точке) и сопровождается выделением тепла при охлаждении и поглощением тепла при нагреве.

Полиморфное превращение осуществляется, как и при кристаллизации, путем образования зародышей и их дальнейшего роста в результате перехода атомов из старой модификации в новую.

Превращение может быть:

- Диффузионным
- Бездиффузионным (мартенситным).

В результате полиморфного превращения образуются новые кристаллические зерна, имеющие другой размер и форму, поэтому такое превращение также называют перекристаллизацией. Если нагрев металла проводился до температуры, незначительно превышающей температуру полиморфного превращения (критической точки), то получается очень мелкое зерно, что часто используется на практике для получения мелкозернистой структуры. Полиморфное превращение сопровождается скачкообразным изменением всех свойств металлов и сплавов: удельного объема, теплопроводности, электропроводности, магнитных, механических, химических и других свойств.

Все вещества по магнитным свойствам можно разделить на три группы:

- парамагнитные,
- диамагнитные
- ферромагнитные.

При нагреве выше определенной температуры, называемой «точкой Кюри», ферромагнитные материалы теряют свои магнитные свойства и превращаются в парамагнитные. Для железа точка Кюри расположена при температуре около 768°C .

Лекция 3

Механические свойства

- 3.1. Испытания на твердость
- 3.2 Испытания на растяжение и сжатие
- 3.3 Испытания на изгиб
- 3.4 Испытания на ударную вязкость

- Механические свойства характеризуют поведение тел под действием механических напряжений.
- Такие напряжения возникают при эксплуатации металлических изделий, а также в процессе их изготовления (при литье, обработке давлением, сварке и т. п.), поэтому механические свойства – это важнейшие для инженера характеристики металлов и сплавов.
- Механические свойства определяют с помощью механических испытаний специально изготовленных образцов.
- Механические свойства не являются такими константами материала, как физические. Они зависят не только от химического состава и структуры материала, но и от условий испытаний: формы и размеров образца, скорости нагружения и других факторов.
- Большинство механических свойств очень сильно зависят от структуры, например от размера зерна и плотности дислокаций, т. е. относятся к разряду структурно-чувствительных свойств.

3.1. ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ

- Методы измерения твердости могут базироваться на совершенно разных принципах, числа твердости имеют разную размерность.
- Для количественной оценки твердости наиболее широко применяют статическое вдавливание по нормали к испытуемой поверхности под заданной нагрузкой очень твердого наконечника – *индентора*.
- Число твердости характеризует сопротивление материалов местной пластической деформации, возникающей при вдавливании индентора

Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012-59)

- Шарик из закаленной стали диаметром D вдавливается в образец (изделие) под действием нагрузки P , после снятия которой измеряют диаметр отпечатка d .
- Все числа твердости обозначают буквой H (от англ. Hardness – твердость). Число твердости по Бринеллю HB равно отношению нагрузки P (кгс) к площади шаровой поверхности отпечатка A (мм²):

$$HB = \frac{P}{A} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

- Твердость по Бринеллю имеет размерность напряжения кгс/мм².
- В целях преемственности эта размерность не заменена на МПа, как это требует современная система международных единиц (СИ).
- Рядом с числом твердости размерность не указывают.
- Например, твердость по Бринеллю, равную 185 кгс/мм², записывают как 185 НВ, что означает 185 единиц Бринелля.

- Методом Бринелля можно испытывать материалы с твердостью не более 450 НВ, так как при большей твердости материала шарик из закаленной стали сам недопустимо деформируется.
- Рекомендуется для сталей и чугунов $P/D^2 = 30$ кгс/мм², для меди, никеля и их сплавов – 10 кгс/мм², для алюминия, магния и их сплавов – 5 кгс/мм².
- Можно выбрать шарик диаметром 1; 2; 2,5; 5 или 10 мм и нагрузку от 1 до 3000 кгс.
- Расчет по формуле не производят, а по измеренному отпечатку d при выбранных D и P по таблице находят значение НВ.
- Временное сопротивление и числа твердости по Бринеллю связаны между собой:
 - для стали $\sigma_b = 0,34$ НВ,
 - для медных сплавов
 - $\sigma_b = 0,45$ НВ,
 - для алюминиевых сплавов $\sigma_b = 0,35$ НВ.

Твердость по Виккерсу (ГОСТ 2999-75).

- Индентором является правильная четырехгранная алмазная пирамида с углом между противоположными гранями 136° .
- Число твердости по Виккерсу HV равно отношению нагрузки P (кгс), к площади поверхности пирамидального отпечатка, мм²:

$$HV = 1,854 P / d^2$$

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка в плоскости испытуемой поверхности после снятия

- В соответствии с ГОСТом размерность твердости по Виккерсу кгс/мм², размерность у числа твердости не указывается.
- Например, твердость по Виккерсу, равную 550 кгс/мм², записывают как 550 HV.
- При увеличении глубины вдавливания пирамидального индентора, в отличие от шарика, получаются геометрически подобные отпечатки, и значение HV не зависит от величины нагрузки.
- Угол 136° выбран из расчета, чтобы числа твердости HB и HV были близкими (до значений 300 они в точности совпадают).
- Благодаря алмазному индентору можно испытывать очень твердые материалы – с твердостью до 2500 HV. Нагрузки могут быть от 1 до 100 кгс.
- Расчеты по формуле не производят, а по измеренному значению d при выбранной нагрузке в таблице находят значение HV.

Твердость по Роквеллу (ГОСТ 9013-59).

- Индентором служит алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм или шарик из закаленной стали диаметром 1/16 дюйма (1,5875 мм).
- Величину твердости оценивают по глубине вдавливания индентора.
- Чтобы зафиксировать исходное положение индентора, его поджимают к испытуемой поверхности под предварительной нагрузкой $P_0=10$ кгс, после чего стрелку индикатора глубины вдавливания выводят на нуль. Затем прикладывают основную нагрузку – $P_1=140$ кгс при использовании алмазного конуса и $P_1 = 90$ кгс при использовании шарикового индентора.

После снятия основной нагрузки R_1 (нагрузка R_0 остается) индикатор глубины вдавливания прямо показывает число твердости по Роквеллу.

Число твердости по Роквеллу при использовании алмазного конуса обозначают символом HRC (англ. – конус), при использовании шарикового индентора – символом HRB.

Числа твердости по Роквеллу являются безразмерными величинами.

Микротвердость (ГОСТ 9450-76)

- В рассмотренных методах измерения твердости размер отпечатка значительно больше размера отдельных структурных составляющих.
- Для измерения твердости отдельных структурных составляющих используют метод микротвердости, являющийся разновидностью метода Виккерса и отличающийся от последнего меньшей нагрузкой на алмазную пирамиду ($P = 1...500$ гс).

- Нагрузку подбирают так, чтобы размер отпечатка был меньше размера соответствующей структурной составляющей
- Образцом для измерения микротвердости является микрошлиф, и нагружение производят под специальным микроскопом, чтобы вдавливать индентор в выбранный микроучасток.
- Измерения отпечатка микронных размеров также производят под⁶⁸

3.2. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

- Испытание на одноосное растяжение (ГОСТ 1497-84) является основным источником информации о характеристиках прочности и пластичности металлических материалов.
- Используют и цилиндрические, и плоские образцы, головки которых вставляют в захваты разрывной машины, но чаще всего – цилиндрические образцы (их называют также круглыми).
- Плоские образцы применяют главным образом для оценки свойств листового материала.

- Цилиндрический образец характеризуется диаметром рабочей части d_0 , длиной рабочей части l , начальной расчетной длиной l_0 .
- Расчетную длину l_0 , которая меньше l , выбирают так, чтобы исключить влияние головок образца на результаты испытаний.
- Размеры образца не влияют на результат определения относительного удлинения после разрыва, если соблюдается условие геометрического подобия образцов:

$$l_0/F_0 = \text{const},$$

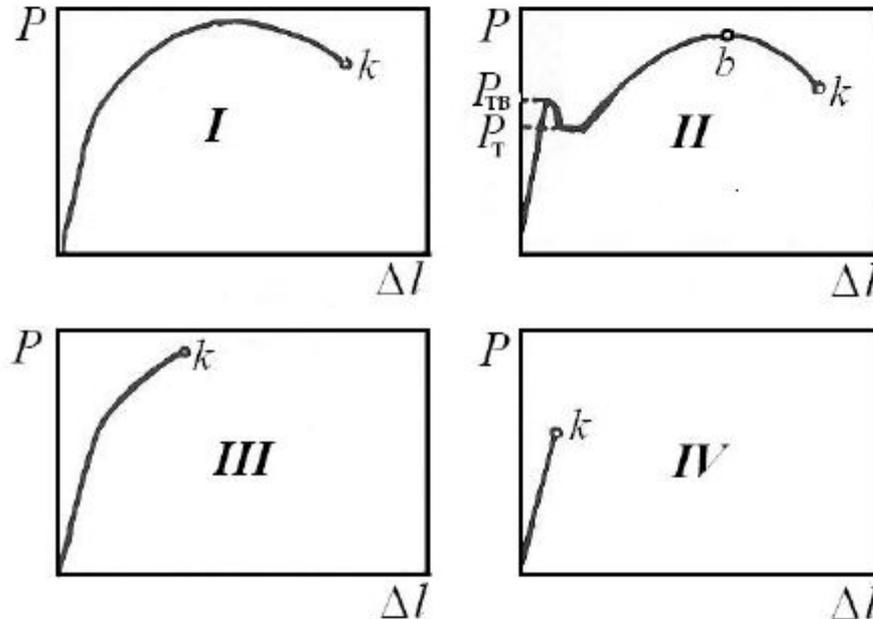
- где F_0 – площадь поперечного сечения в рабочей части
- $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$ и $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$,

т. е. соответственно $l_0 = 10d_0$ и $l_0 = 5d_0$

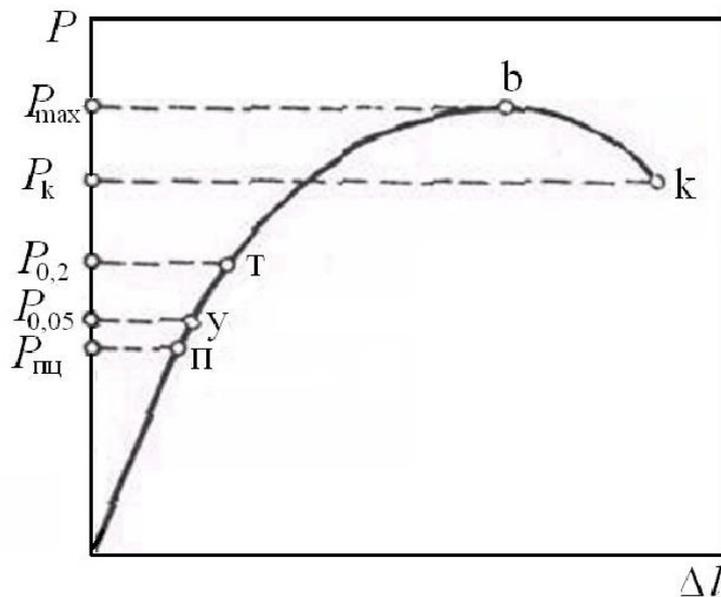
(так называемые десяти- и пятикратные образцы).

- Для литых сплавов допускается $l_0 = 2,82\sqrt{F_0}$, т. е. $l_0 = 2,5d_0$.

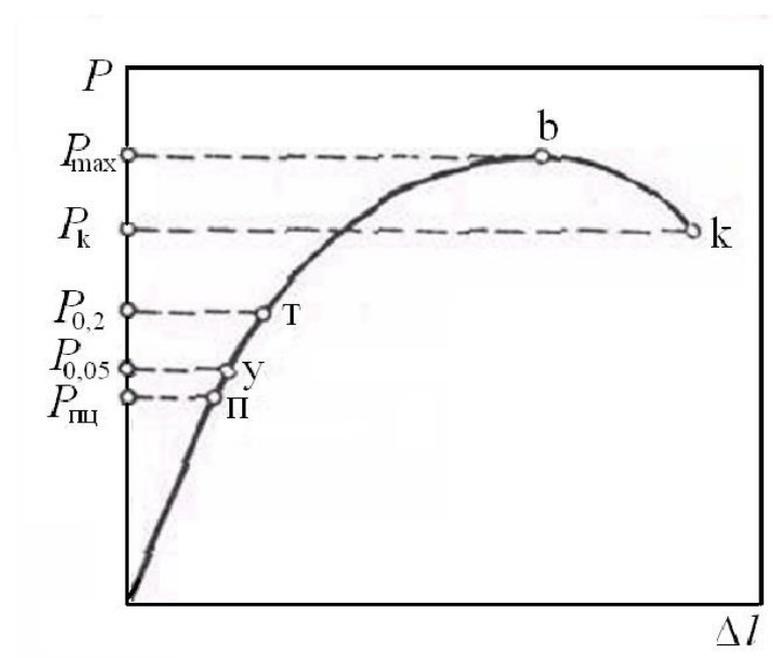
- Кривые $P - \Delta l$ называют первичными диаграммами растяжения или просто кривыми растяжения.
- Тип I – образование ярко выраженной шейки перед разрывом.
- Тип II отличается от типа I наличием зуба и площадки текучести (или только площадки текучести).
- Тип III – равномерное удлинение, без образования ярко выраженной шейки при пластической деформации вплоть до разрушения.
- Тип IV – хруп



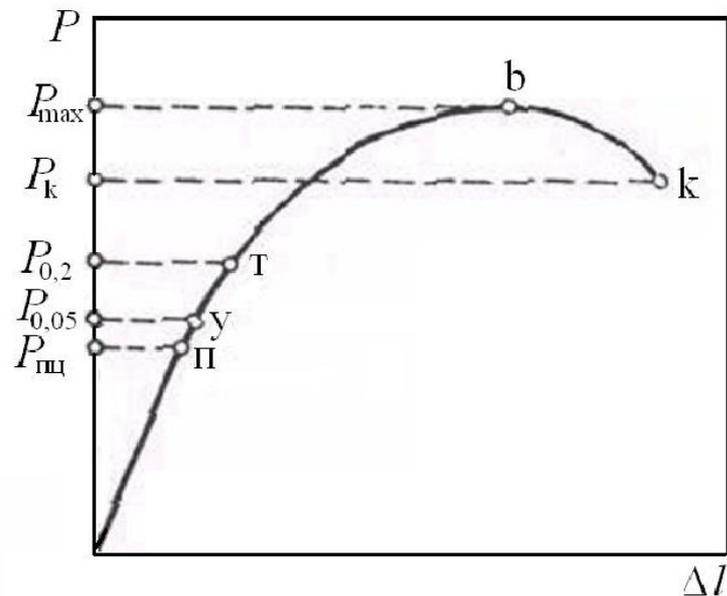
- Предел пропорциональности $\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0$ – это максимальное напряжение, при котором еще выполняется закон Гука.
- Определяют условный предел пропорциональности, соответствующий точке, в которой отклонение от линейного закона изменения нагрузки достигает заданной величины: тангенс угла наклона касательной в этой точке на 50 % меньше, чем на начальном прямолинейном участке.
- Величина $\sigma_{пц}$ в инженерных расчетах указывает напряжение, без остаточных деформаций может работать



- Предел упругости $\sigma_{0,05} = P_{0,05}/F_0$ – это напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 0,05 %.
- Он характеризует сопротивление материала пластической деформации, которая обеспечивается движением ограниченного числа наиболее подвижных дислокаций.
- Технический смысл предела упругости состоит в том, что он характеризует предельное напряжение, которое допустимо при работе упругих элементов. Допуск на остаточную деформацию может быть еще более жестким, например 0,005 %
- (предел упругости $\sigma_{0,005}$).
- Пределы пропорциональности и упругости очень близки и практически могут совпадать.



- Предел текучести $\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$ – это напряжение, при котором остаточная деформация составляет 0,2 %.
- Пластическая деформация величиной 0,2 % происходит путем массового скольжения дислокаций.
- Предел текучести $\sigma_{0,2}$, характеризующий сопротивление малым пластическим деформациям, широко используют в инженерных расчетах конструкций, так как одно из главных требований к нагруженным деталям состоит в том, чтобы их остаточные деформации были не больше определенной величины.



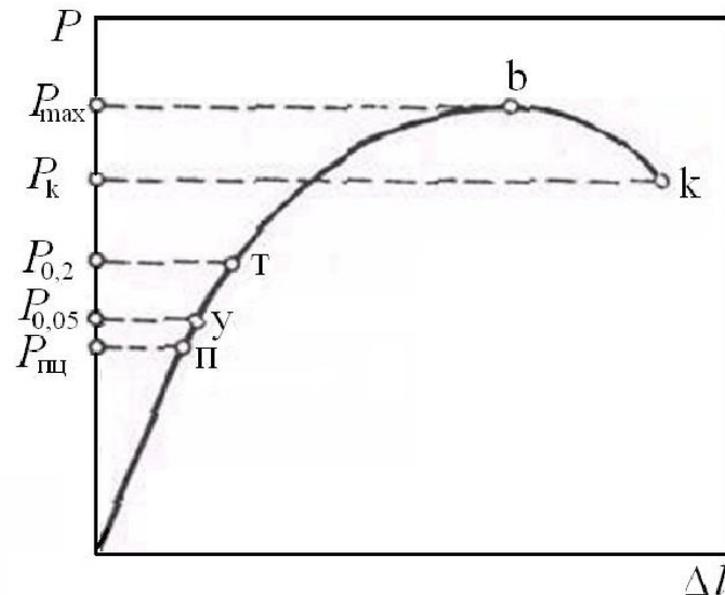
- Низкоуглеродистые стали, многие металлы и сплавы, особенно с ОЦК решеткой, характеризуются наличием на кривой растяжения зуба и площадки текучести или только площадки текучести.
- Площадка текучести означает пластическую деформацию при постоянном напряжении, называемом физическим пределом текучести $\sigma_T = P_T / F_0$.
- Деформация на площадке текучести может достигать 1 %.
- Напряжение $\sigma_{T.v.} = P_{T.v.} / F_0$, рассчитанное по усилию, соответствующему вершине зуба текучести, называют верхним пределом текучести.

- С уменьшением размера зерен (или субзерен) d увеличивается число барьеров на пути скользящих дислокаций и физический предел текучести возрастает в соответствии с соотношением Холла—Петча:

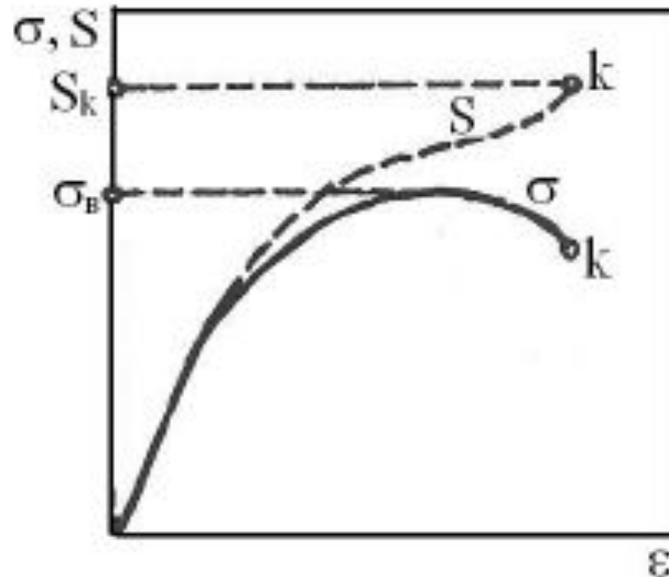
$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2},$$

- где σ_0 и k – константы.
- Точно так же влияет размер зерна на величину $\sigma_{0,2}$.

- Временное сопротивление $\sigma_b = P_{\max}/F_0$ – это напряжение, соответствующее максимальной нагрузке на кривой растяжения.
- Точка *b* соответствует окончанию равномерной пластической деформации и началу образования шейки.
- Резкое уменьшение поперечного сечения в шейке приводит к снижению сопротивления образца растяжению.
- Локализация деформации заканчивается разрушением образца в его наименьшем сечении



- Если для каждого текущего значения P_i на первичной кривой растяжения рассчитать значения условного (P_i/F_0) и истинного растягивающего напряжения (P_i/F_i), то можно построить графики зависимости условных и истинных напряжений от относительного удлинения $\delta = \Delta l/l_0$



- Характеристики пластичности при растяжении – относительное удлинение после разрыва δ и относительное сужение после разрыва ψ .
- Слова «после разрыва» обычно опускают, всегда подразумевая их, когда речь идет о свойствах, обозначаемых буквами δ и ψ .
- Относительное удлинение – это отношение приращения расчетной длины разорванного образца к ее первоначальной величине

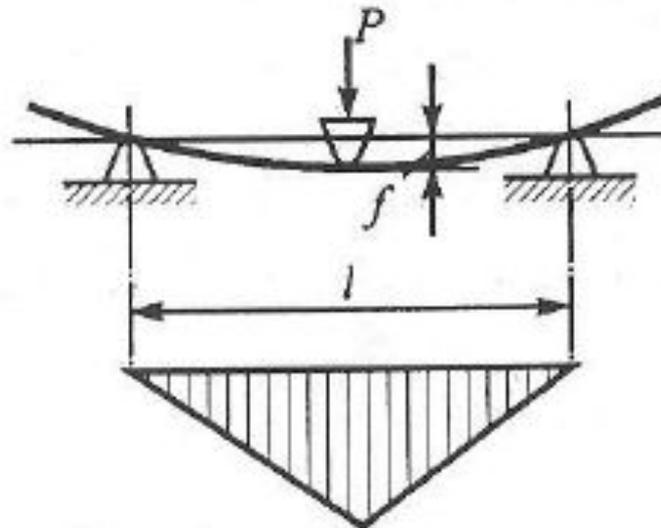
$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%$$

Относительное сужение – это отношение уменьшения площади поперечного сечения в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения образца

$$\psi = \frac{F - F_0}{F_0} 100\%$$

3.3. ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ

- При испытаниях на изгиб в образце возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения. По этой причине изгиб – более мягкий способ нагружения, чем растяжение.
- На изгиб испытывают малопластичные материалы: чугуны, инструментальные стали, стали после поверхностного упрочнения, керамику.



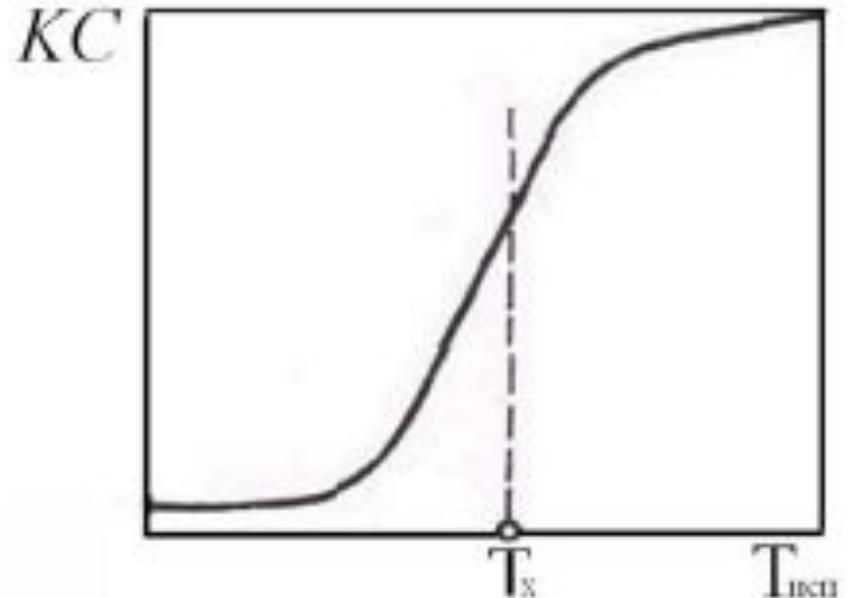
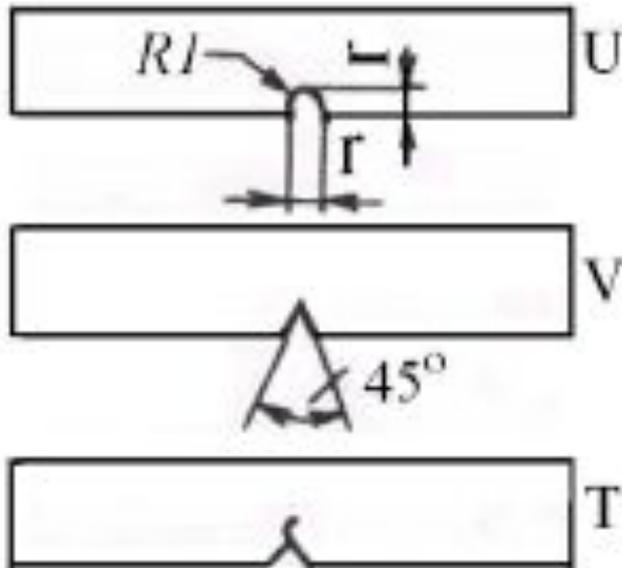
3.4. ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

- Наиболее распространенные образцы для испытаний имеют форму стержня длиной 55 мм с квадратным сечением 10×10 мм.
- В соответствии с формой нанесенного посередине надреза – концентратора напряжений – образцы подразделяют на три типа: U, V и T
- Концентратор типа T (трещина) получают в вершине начального надреза при циклическом изгибе образца.
- Образцы с концентраторами типа V используют при испытаниях материалов для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, трубопроводы и пр.), с концентраторами типа T – при испытании материалов особо ответственных конструкций, для которых первостепенное значение имеет сопротивление развитию трещины.

- Испытания на ударную вязкость проводят на маятниковом копре при ударе маятника по образцу со стороны, противоположной концентратору напряжения.
- Энергию, затрачиваемую на деформацию и разрушение образца, называют работой удара и обозначают символом K с указанием вида концентратора (K_U , K_V , K_T).

- Ударная вязкость (обозначается символом KC) – это работа удара, отнесенная к начальной площади поперечного сечения в месте расположения концентратора.

$$KC = K/F_0$$



Ударная вязкость характеризует сочетание прочностных свойств и пластичности материала.

Недостаток характеристики KC – невозможность использования ее в расчетах конструкций.

4. Деформация и разрушение

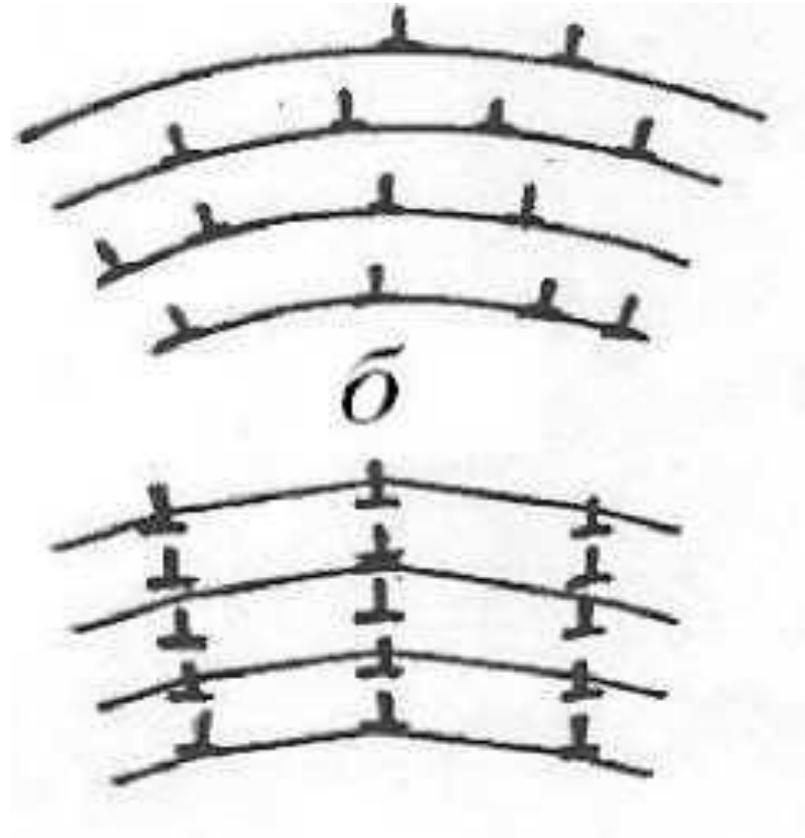
- 4.1 Упругая деформация
- 4.2 Механизм пластического деформирования
- 4.3 Разрушение металлов

Лекция 5

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

- 5.1 Возврат
- 5.2 Рекристаллизация
- 5.3 Холодная и горячая деформация

Схема процесса полигонизации



Влияние нагрева на механические свойства и структуру металла, упрочненного деформацией

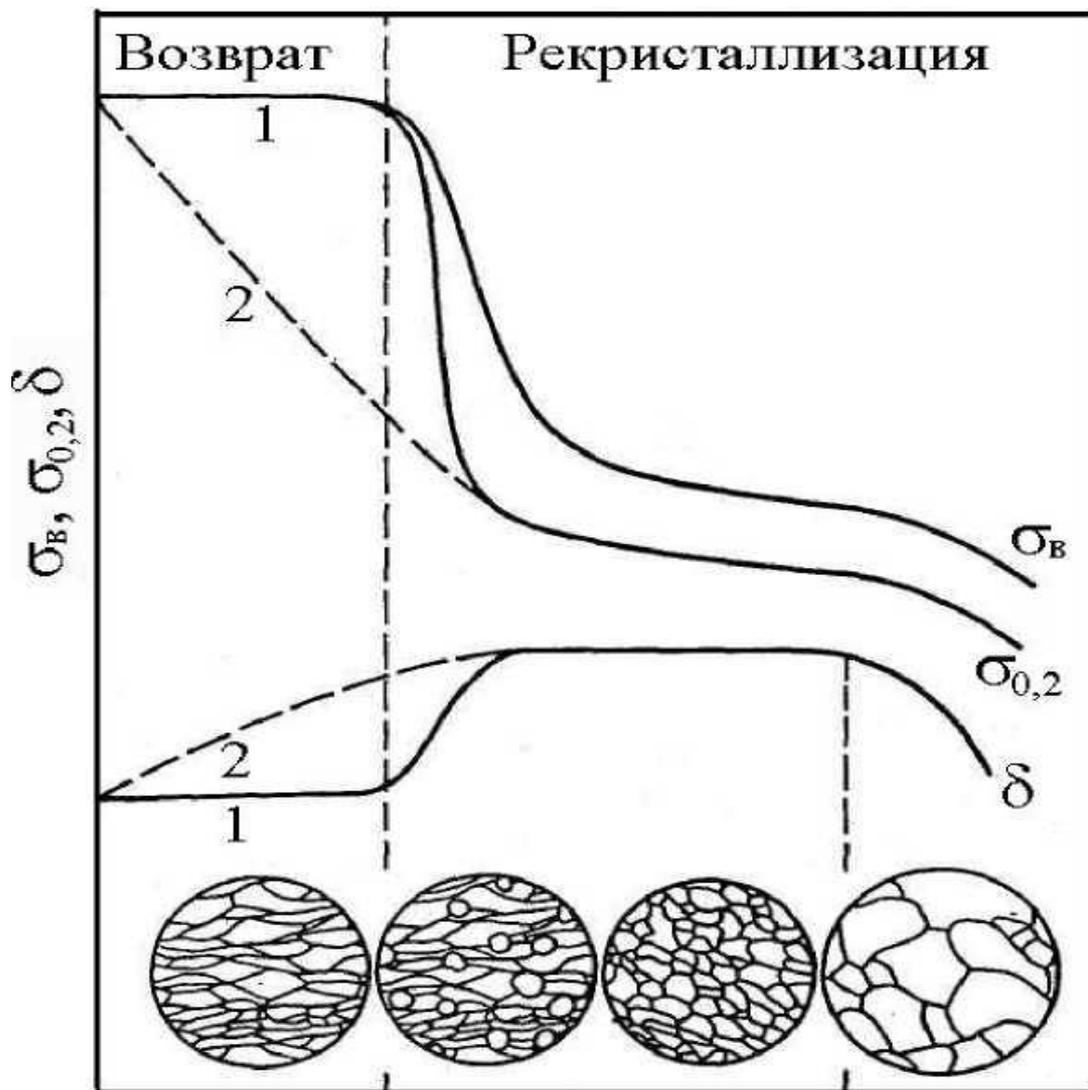
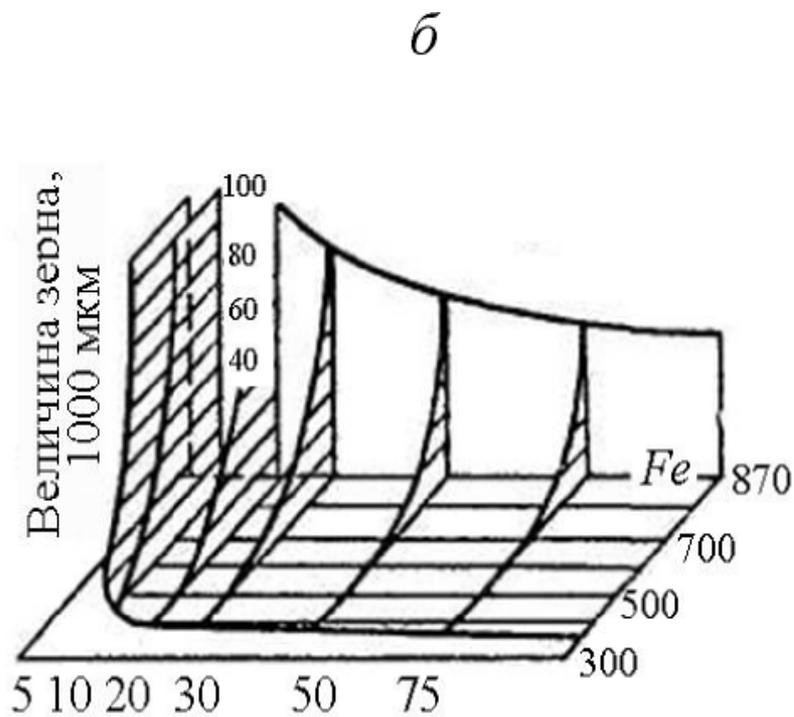
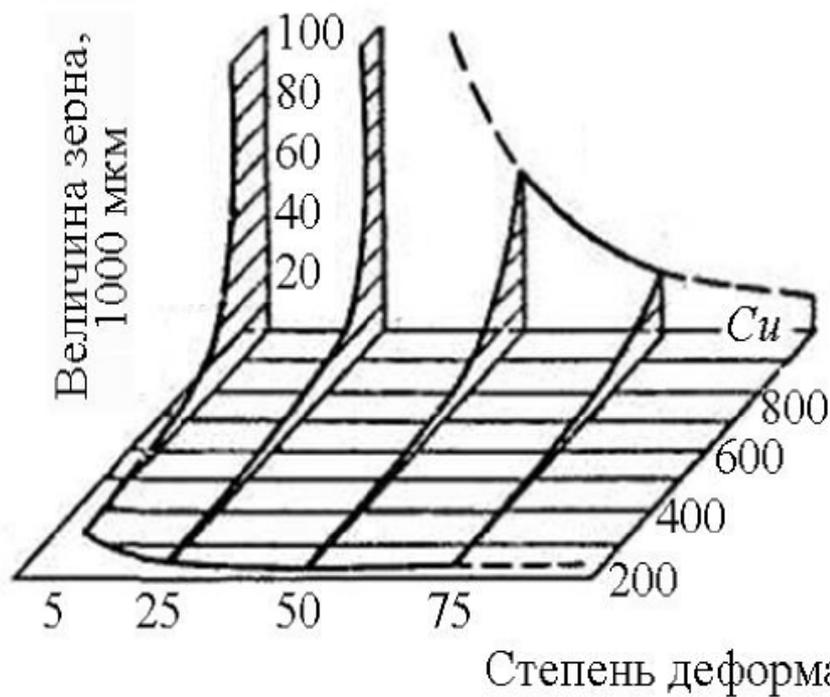


Диаграмма рекристаллизации: а - меди; б - железа



Лекция 6. ДВОЙНЫЕ СПЛАВЫ

- 6.1 Фазы в сплавах
- 6.2 Диаграммы состояния систем
 - 6.2.1 Диаграмма состояния с отсутствием растворимости в твердом состоянии и эвтектическим превращением
 - 6.2.2. Диаграмма состояния с химическими соединениями
 - 6.2.3. Диаграмма состояния с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии
 - 6.2.4. Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии
 - 6.2.5 Диаграммы с ограниченной растворимостью компонентов в жидком состоянии
 - 6.2.6. Диаграмма состояния с наличием полиморфных превращений у компонентов

Фазы в сплавах

- Сплав считается двойным, если он получен из двух компонентов, и тройным, если – из трех и т. д.
- Большинство сплавов при соответственных высоких температурах образуют однородную жидкую фазу.
- Некоторые компоненты при сплавлении образуют не одну, а две разные по химическому составу жидкие несмешивающиеся фазы (медь - свинец, цинк - свинец, алюминий - натрий).
- В металлургии известны случаи, когда два металлических компонента вообще не сплавляются друг с другом в жидком состоянии (железо - свинец, железо - висмут).

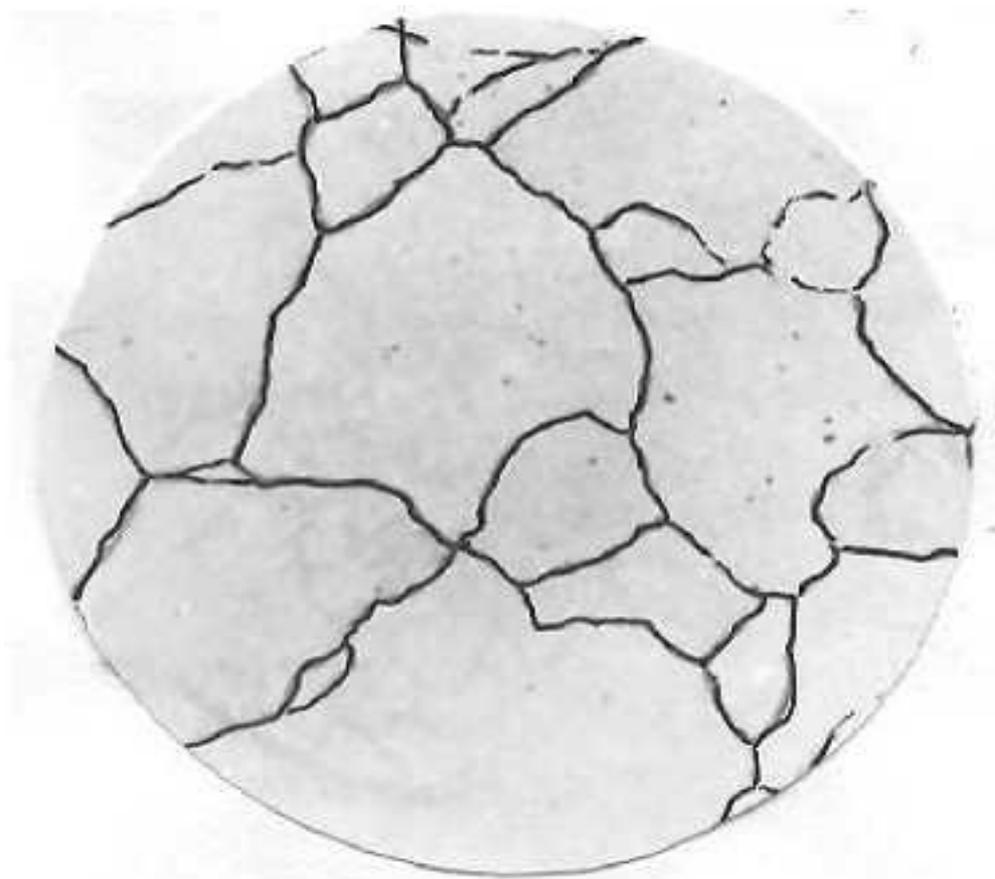
Фазы в сплавах

- При кристаллизации жидкого сплава в зависимости от вида взаимоотношения компонентов могут выделиться такие кристаллические фазы: твердые растворы, исходные компоненты, химические соединения, промежуточные фазы.

Твердые растворы

- *Твердые растворы* являются самой распространенной фазой в сплавах.
- Главные признаки твердого раствора:
 - он всегда сохраняет кристаллическую решетку металла-растворителя
 - имеет переменный химический состав.
- На диаграммах состояния область твердых растворов всегда примыкает к ординатам, отвечающим чистым компонентам и поэтому их принято называть граничными твердыми растворами.
- Твердым раствором называется такая кристаллическая фаза переменного состава, в которой атомы растворенного элемента частично замещают атомы растворителя в его кристаллической решетке или располагаются в промежутках между ними.
- Твердый раствор представляет собой однородную фазу. Все зерна одинаковы по кристаллическому строению и химическому составу и состоят из атомов обоих компонентов. Твердые растворы по характеру своего образования делятся на растворы замещения и внедрения.

Твердые растворы



Твердые растворы

- При образовании твердых растворов замещения атомы растворенного компонента (металла) замещают атомы металла-растворителя в его кристаллической решетке.
- Последовательность замещения атомов при увеличении концентрации растворенного компонента бывает произвольная, и не в каждой кристаллической ячейке замещается одинаковое число атомов (особенно при малых концентрациях растворенного компонента).
- Если размеры атомов растворенного компонента (металла) больше размеров атомов металла-растворителя, то параметр кристаллической решетки увеличивается.

Твердые растворы

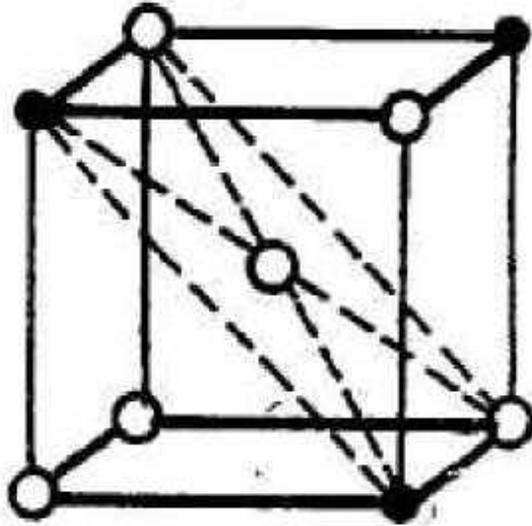


Рис. 40. Кристаллическая
решетка твердого раствора

замещения

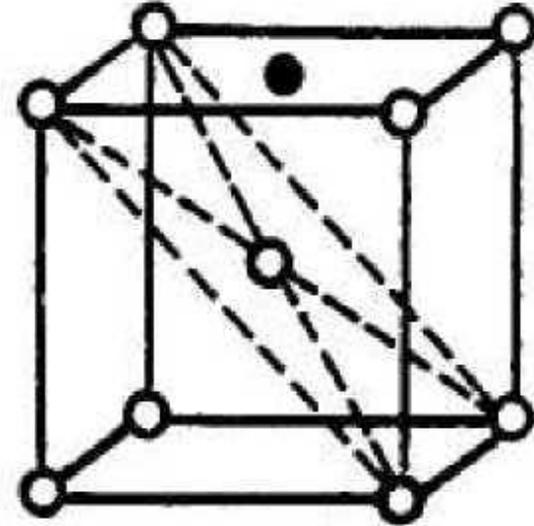


Рис. 41. Кристаллическая
решетка твердого раствора

внедрения

Твердые растворы

- В зависимости от пределов возможного растворения одного компонента в другом твердые растворы делятся на растворы с неограниченной и ограниченной растворимостью компонентов.
- Твердые растворы с неограниченной растворимостью компонентов образуются в том случае, если кристаллические решетки компонентов однотипны (золото - серебро, медь - никель, никель - железо и др.), а размеры атомов r_B и r_A различаются не более чем на 15% (разница не должна превышать:

$$r_B / r_A \geq 0,85$$

Твердые растворы

- Еще одним из неизменных условий является то, чтобы электронная концентрация компонентов не превышала критическую, т. е. предельную растворимость, которая наступает при достижении некоторой критической величины $C_{эл}$

$$C_{эл} = N_{эл} / N_A$$

Твердые растворы внедрения

- Для формирования твердого раствора внедрения требуется определенное соотношение между радиусом внедряющегося атома и поры

$$r_x / r_M \leq 0,59$$

- r_x и r_M - атомные радиусы неметалла и металла

- Чем меньше размеры атомов растворенного компонента и чем больше по величине промежутки между атомами растворителя, тем выше может быть концентрация растворенного компонента в твердом растворе внедрения.
- Обычно твердые растворы внедрения образуются металлами переходных групп с четырьмя элементами: углеродом, азотом, водородом и бором, обладающими малыми размерами атомов.
- При образовании твердого раствора внедрения параметр кристаллической решетки увеличивается. При этом возникают искажения кристаллической решетки значительно большие, чем при образовании твердых растворов замещения.
- Твердые растворы внедрения легче образуются в компактных кристаллических решетках ГЦК и ГПУ. Твердые растворы внедрения всегда с ограниченной растворимостью.

- В зависимости от природы компонентов, химического состава и температуры в сплаве могут образоваться несколько разных твердых растворов с ограниченной растворимостью.
- В металловедении различные твердые растворы принято обозначать буквами греческого алфавита.

- При образовании твердых растворов замещения встречаются случаи, когда атомы каждого компонента в решетке твердого раствора занимают вполне определенные места.
- Такие растворы называют упорядоченными.
- Например, в сплавах меди с золотом (при атомной концентрации 75 % меди и 25 % золота) атомы золота занимают углы гранецентрированной кубической ячейки кристаллической решетки, а атомы меди - места в центре всех граней.

- Некоторые твердые растворы, не упорядоченные при повышенных температурах, становятся упорядоченными при низких температурах.
- Нагрев выше определенной температуры снова переводит твердый раствор в неупорядоченное состояние.
- В упорядоченном твердом растворе по сравнению с неупорядоченным возрастают твердость, предел упругости и предел прочности. Заметно увеличивается также электропроводность. Нагрев и холодная пластическая деформация вызывают разупорядочение сплава.

Химические соединения

- При кристаллизации жидкой фазы сплавов нередко образуются *химические соединения* компонентов. Они возникают, когда один из компонентов сильно отрицателен, а другой электроположителен, и между ними образуются соединения с ионной связью.
- Химические соединения характеризуются тем, что имеют свою кристаллическую решетку, отличную от решеток исходных компонентов, и практически постоянный химический состав.
- Они обладают особыми физическими, механическими и другими свойствами, т. е. проявляют себя в сплавах как самостоятельные новые компоненты. Как правило, химические соединения в металлических сплавах тугоплавки и тверды.
- Чаще всего они образуются в сплавах между элементами, далеко расположенными друг от друга в периодической системе Менделеева.

- При образовании химических соединений вступает во взаимодействие определенное число атомов одного (например, А) и другого компонента (В), поэтому состав такого соединения можно выразить формулой A_mB_n , где m и n - целые простые числа.
- Лишь немногие из химических соединений, образующихся в металлических сплавах, имеют формулу, подчиняющуюся правилу валентности. Такие соединения (Mg_2Si , Mg_2Sn_2 , Mg_3Sb_2 и др.) обычно не образуют твердых растворов.

Промежуточные фазы

- Большую группу фаз, встречающихся в сплавах, относят к числу промежуточных, так как они занимают промежуточное место между твердыми растворами и химическими соединениями, будучи чем-то сходными с теми и другими.
- Промежуточные фазы: электронные соединения, фазы Лавеса, фазы внедрения и фазы вычитания.

- Многие металлы при своем сплавлении образуют электронные соединения. Они возникают в сплавах между одновалентными (Cu, Ag, Au, Li, Na) или переходными металлами (Mn, Fe, Co и др.), с одной стороны, и простыми металлами с валентностью от 2 до 5 (Be, Mg, Zn, Cd, Al, Sn и др.) - с другой.
- Эти соединения характеризуются определенной электронной концентрацией (отношением числа валентных электронов к общему числу атомов соединения) и имеют переменный химический состав. Для фаз характерно наличие металлической связи.

- Встречаются электронные соединения с электронной концентрацией $3/2$, $21/1$, $7/4$. Первая фаза обычно обозначается как β , вторая - γ , третья - ε . Каждая из них обладает переменным составом, т. е. растворяет в избытке исходные компоненты. Характерно для этих фаз также то, что все они имеют свои определенные кристаллические решетки: β -фаза - объемноцентрированную кубическую решетку, γ -фаза - сложную кубическую решетку, ε -фаза - гексагональную решетку.
- Каждая из этих фаз имеет свою определенную кристаллическую решетку и определенное соотношение атомов, что делает их похожими на химические соединения. Однако тот факт, что электронные соединения в то же время являются фазами переменного состава, делают их сходными с твердыми растворами. В электронных соединениях может наблюдаться явление упорядочения.

Фазы Лавеса

- Фазы Лавеса являются интерметаллидными фазами типа A_2B , к ним относятся $MgCu_2$, $AgBe_2$, $TiFe_2$, $MgNi_2$ и др.
- Элементы, формирующие фазы Лавеса, могут находиться в любой части периодической системы, при этом один и тот же металл может играть роль компонента А или В. Один или оба компонента могут быть переходными элементами.
- Возникновение фаз Лавеса определяется размерным фактором (атомные радиусы соотносятся как 1,2:1). Они имеют сложную плотноупакованную решетку, которая может относиться к кубической или гексагональным сингониям.
- Фазы Лавеса повышают прочностные характеристики и сопротивление ползучести (сопротивление деформированию образца во времени под действием напряжения) ряда промышленных сплавов.

Фазы внедрения

- К промежуточным фазам относят так называемые фазы внедрения. Они образуются между металлами переходных групп и неметаллами с малым атомным радиусом (углерод, азот, водород, бор), когда отношение атомного радиуса неметалла к атомному радиусу металла равно или менее 0,59.
- Образующиеся при этом фазы называются карбидами, нитридами, гидридами и боридами.
- При образовании фаз внедрения кристаллическая решетка металла изменяется (происходит перекристаллизация), что отличает эти фазы от твердых растворов внедрения, в которых решетка остается неизменной, присущей основному компоненту - металлу растворителю.

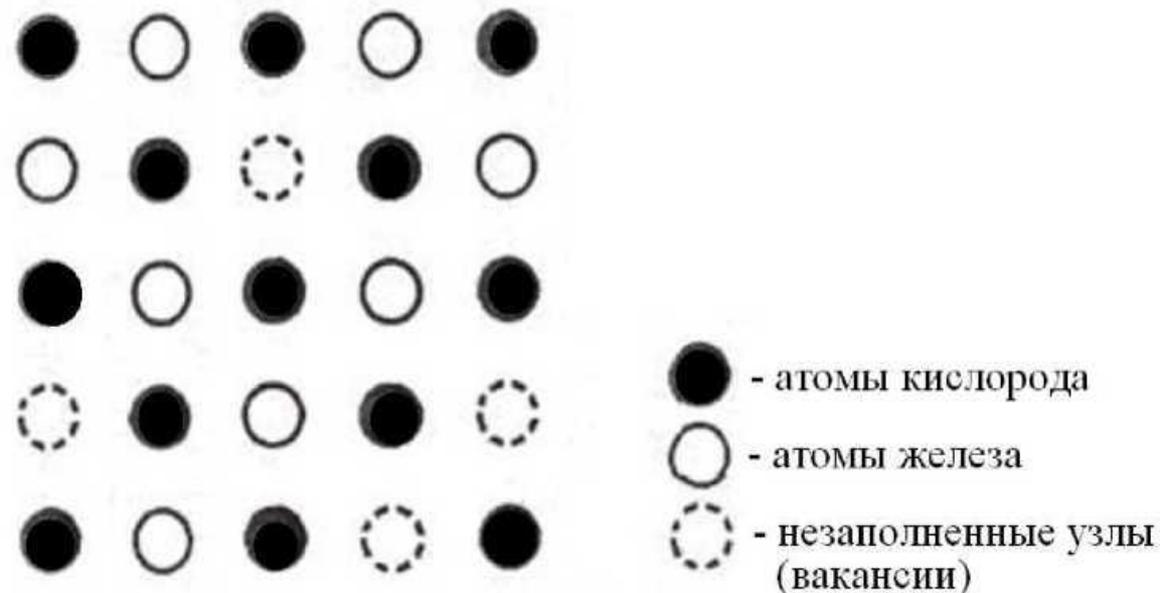
- Фазы внедрения можно разделить на типичные и нетипичные.
- К типичным фазам внедрения относятся такие, для которых отношение атомного радиуса неметалла r_x к атомному радиусу металла r_M не превышает 0,59.
- Типичные фазы внедрения могут быть выражены следующими формулами: MX_2 , MX , M_2X и M_4X , где M - металл, X - неметалл (углерод, бор, водород, азот).
- Типичные фазы внедрения чаще всего имеют переменный химический состав и в некоторых случаях область гомогенности весьма значительна.
- Фазы внедрения, несмотря на значительный процент неметалла, обладают типичными металлическими свойствами (металлическим блеском, электропроводностью, высокой

- Нетипичные фазы внедрения образуются металлами и теми же неметаллами, но имеют иной размерный фактор - $r_x/r_M > 0,59$ (в пределах 0,59 - 0,63). Этим фазам внедрения присуща сложная кристаллическая решетка, в ряде случаев они сохраняют узкую область гомогенности.
- К нетипичным фазам внедрения относятся все бориды и карбиды хрома, марганца и железа. Примером указанных фаз является карбид железа Fe_3C (цементит), имеющий сложную ромбическую решетку. Свойства типичных и нетипичных фаз внедрения во многом близки.

Фазы вычитания

- Фазы вычитания (или структуры вычитания) представляют собой соединения, в которых некоторые позиции одного из компонентов в кристаллической решетке оказываются незанятыми.
- К фазам этого типа обычно относятся соединения, у которых формальное соотношение долей атомов разного сорта должно составлять 1:1, однако некоторые места, принадлежащие одному из компонентов, оказываются пустыми (вакантными). Так, в одном из окислов железа (вюстит FeO) не соблюдается указанное соотношение - все кислородные позиции заняты, а некоторые железные пустуют

- Наличие незанятых позиций приводит к отклонению от стехиометрического соотношения атомов и вместо формулы типа АВ можно приписать формулу типа AB_n . Это приводит к изменению (уменьшению) параметра решетки.

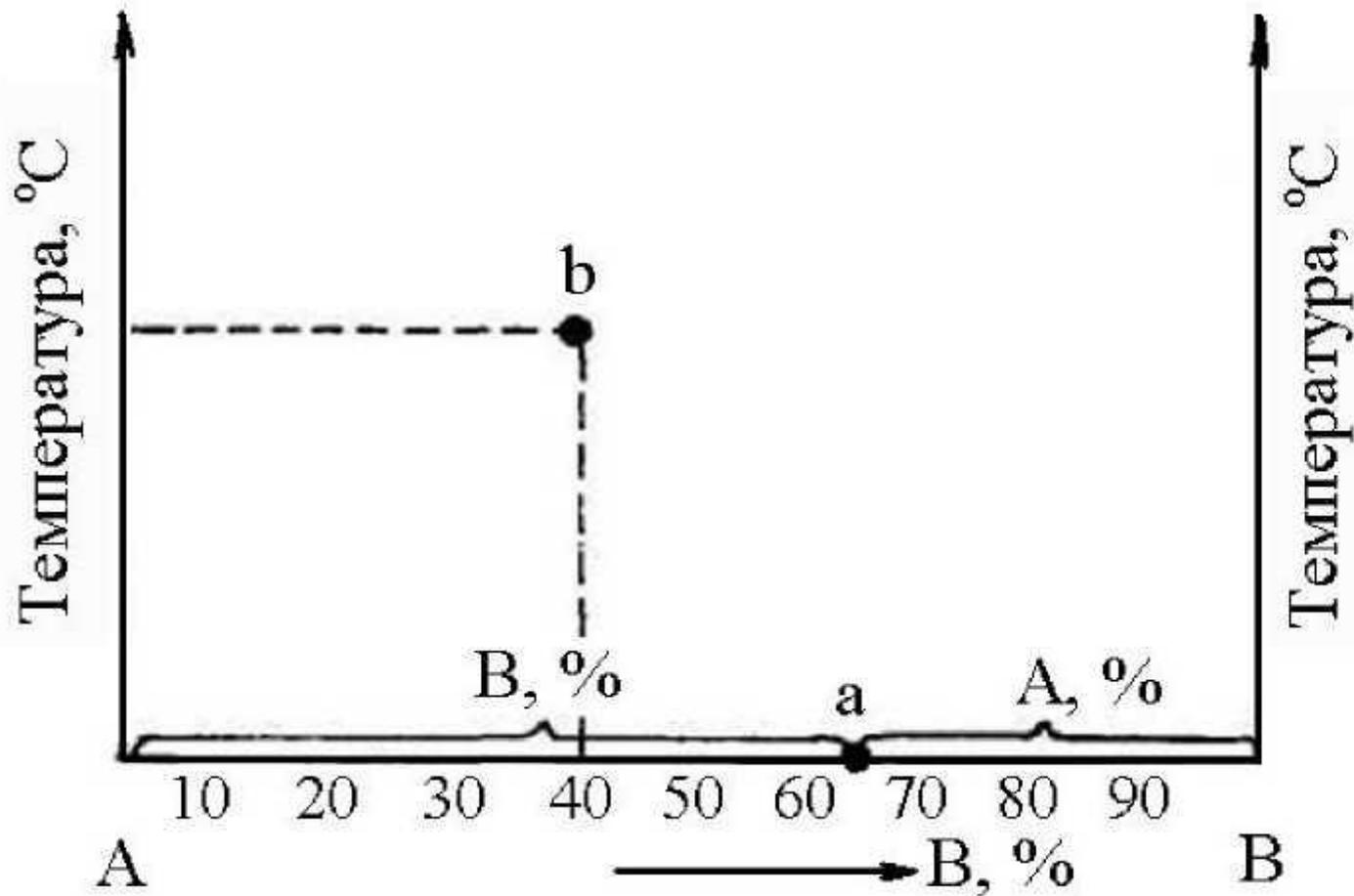


- Структуры вычитания могут быть образованы металлами и металлоидами (упомянутый окисел FeO, сульфид FeS, некоторые карбиды, например, TiC, NbC, VC), а также только металлами. Они встречаются в различных промежуточных фазах, в частности, фазах внедрения, электронных соединениях.
- Фазы внедрения имеют сходство, как с химическими соединениями, так и с твердыми растворами, поэтому их, как и электронные соединения, относят к разряду промежуточных фаз. Упорядоченные твердые растворы также можно отнести к числу промежуточных фаз.
- Сплавы при комнатной температуре могут состоять из одной кристаллической фазы или из смеси разных фаз. Окончательные свойства сплава (например, механические) зависят от физической природы, химического состава и количества присутствующих фаз, а также от внешней формы, степени измельчения и взаиморасположения этих фаз, т.е. от структуры сплава.

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ

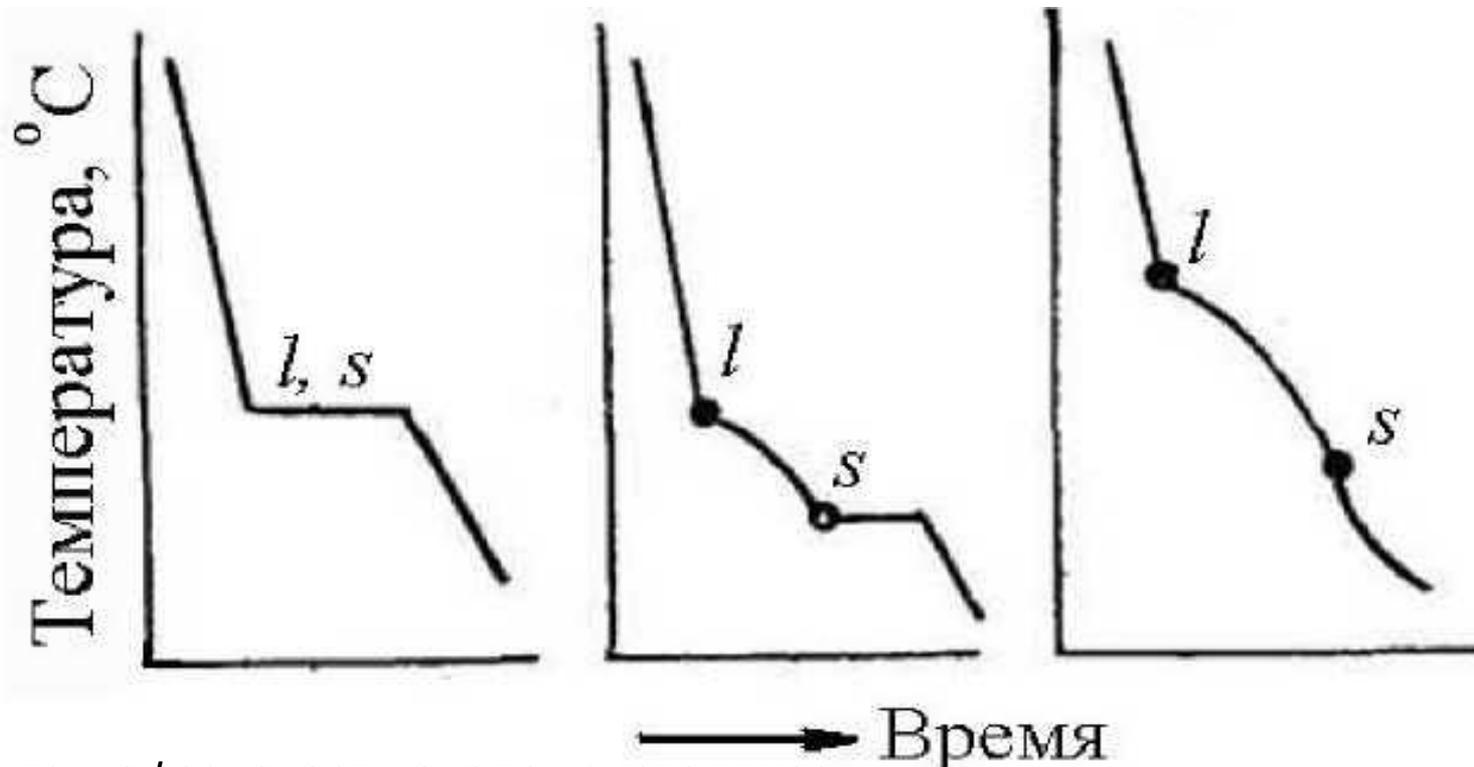
- Диаграммы состояния для каждой пары компонентов (системы) показывают характер взаимоотношения компонентов, описывают фазовый состав любого сплава при любой температуре и дают возможность изучить процессы превращений в сплавах при их нагреве и охлаждении.
- *Диаграмма состояния* представляет собой графическое изображение состояния сплава.
- Вертикальная ось – температура;
- Горизонтальная - концентрация компонентов в весовых (иногда в атомных) процентах.

Определение концентрации КОМПОНЕНТОВ



- Любая точка, взятая на диаграмме, называется *фигуративной*.
- Фигуративная точка b определяет химический состав (концентрацию компонентов) и температуру сплава путем проекции этой точки на соответствующие оси диаграммы.
- Вертикальные линии, проведенные на диаграмме состояния и отвечающие сплаву определенного состава, называются *линиями фигуративных точек* сплава.

Термические кривые охлаждения:
а - чистый металл; б - сплав свинца с сурьмой; в - сплав меди с никелем



точка *l* означает начало кристаллизации,
точка *s* - конец кристаллизации жидкой фазы

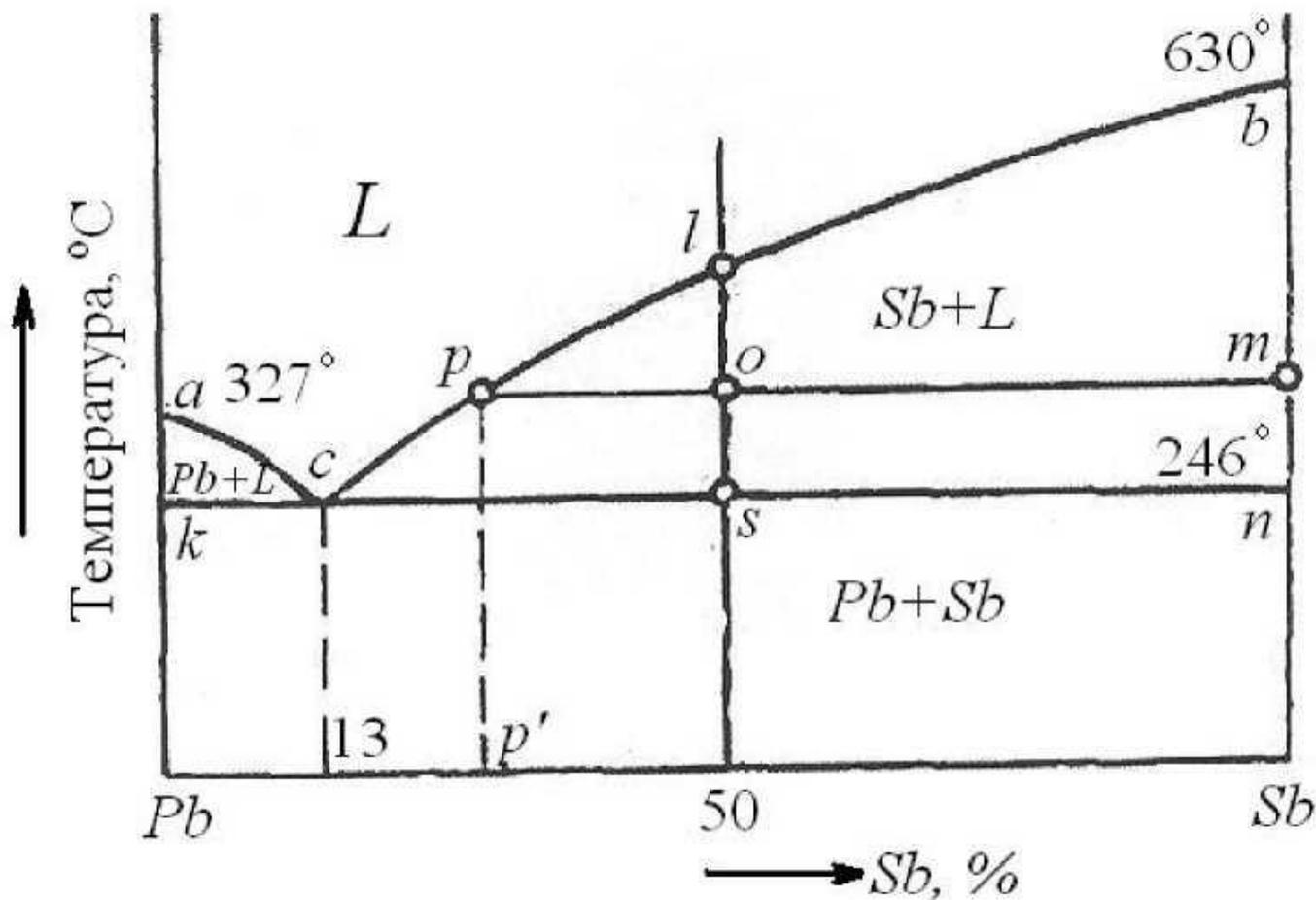
ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ С ОТСУТСТВИЕМ РАСТВОРИМОСТИ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ И ЭВТЕКТИЧЕСКИМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ

- Полного отсутствия растворимости компонентов в твердом состоянии, строго говоря, не существует. Однако при очень малой растворимости компонентов можно считать, что растворимость в твердом состоянии *практически* отсутствует.

Диаграмма состояния системы

$Pb - Sb$

(кристаллизация сплава с 50 % Sb)



- Линии ac и bc соответствуют началу кристаллизации сплавов при охлаждении, причем по линии ac из сплавов выделяются кристаллы свинца, а по линии bc - кристаллы сурьмы и называются линиями *ликвидуса* (в переводе с латинского - жидкий).
- Линии ликвидуса ac и bc показывают пределы растворимости одного компонента в другом в жидком состоянии.

- Линия ksn является линией конца кристаллизации всех сплавов (246°C).
- Линия, ниже которой при охлаждении полностью исчезает жидкая фаза, называется линией *солидуса* (в переводе «солидус» - твердый).
- Кристаллизация двух твердых фаз из одной жидкой называется эвтектической (от греческого слова «эвтектика», что означает «легко плавящаяся»).
- Точка s называется эвтектической точкой, а линия ksn - линией эвтектического превращения.
- Одновременная кристаллизация двух твердых фаз из одной жидкой фазы, наблюдаемая при эвтектическом превращении, протекает при постоянной температуре и приводит к получению особой смеси из обеих кристаллических фаз. Эвтектики различных систем имеют свою характерную структуру.
- Сплав с 13 % Sb будет называться эвтектическим и его структура должна быть представлена одной эвтектикой. Сплавы, лежащие правее точки s , называются заэвтектическими, а левее точки s - доэвтектическими.

Правило рычага

- Для определения фаз, находящихся в равновесии друг с другом:
- 1. Через заданную фигуративную точку провести горизонтальную линию (коноду) вправо и влево до встречи с ближайшими фазовыми линиями диаграммы. Тогда точки встречи (пересечения) укажут физическую природу равновесных фаз, а их проекции на ось концентраций - химический состав фаз.
- 2. Проведенная конода делится в фигуративной точке на два отрезка (плеча), величина которых обратно пропорциональна весовым количествам найденных фаз.

- Для определения количества любой фазы в 2-х фазной области необходимо взять отношение длины противоположного плеча к длине всего рычага (коноды) и выразить в процентах.
- Весовое количество фазы в однофазной области всегда 100% , т.к. количество сплава принимаем за 100% .
- Химический состав фазы в однородной области равен составу сплава.
- В 3-х фазной области весовые количества фаз нельзя определить, а химический состав каждой фазы равен химическому составу точки, лежащей на линии превращения и принадлежащей этой фазе.

Термические кривые для сплавов
доэвтектического (а),
эвтектического (б) и заэвтектического (в)
составов

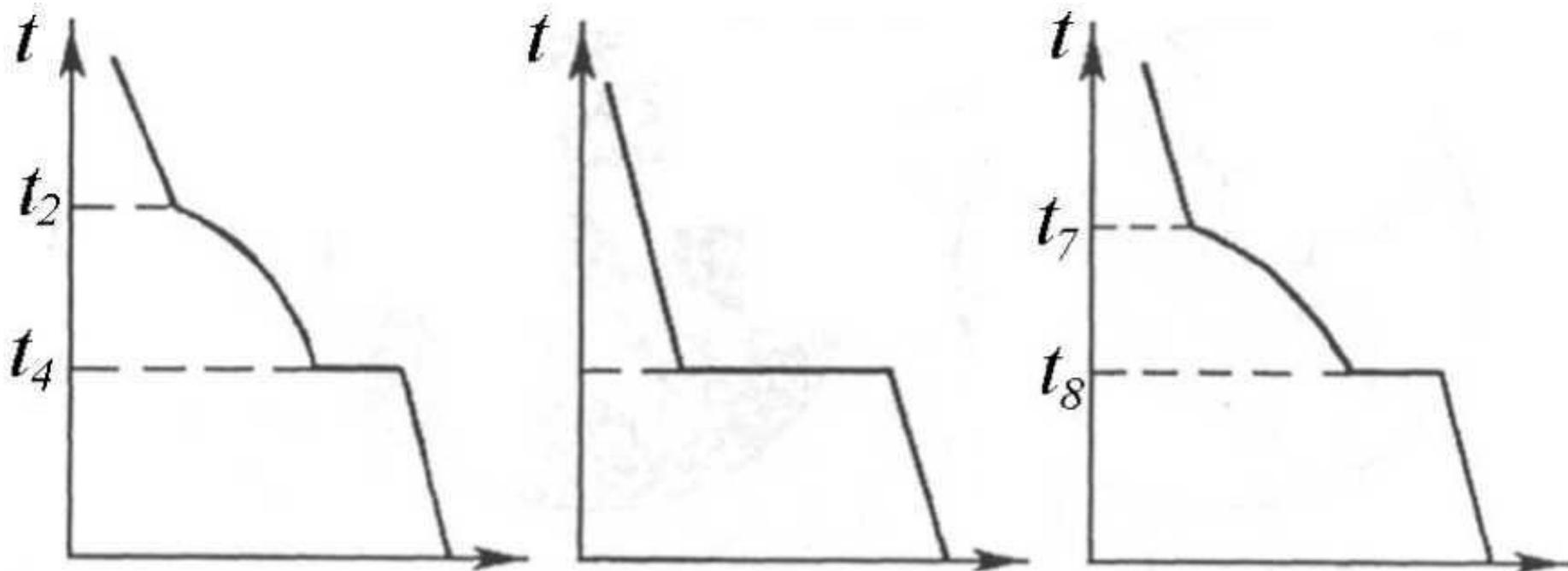
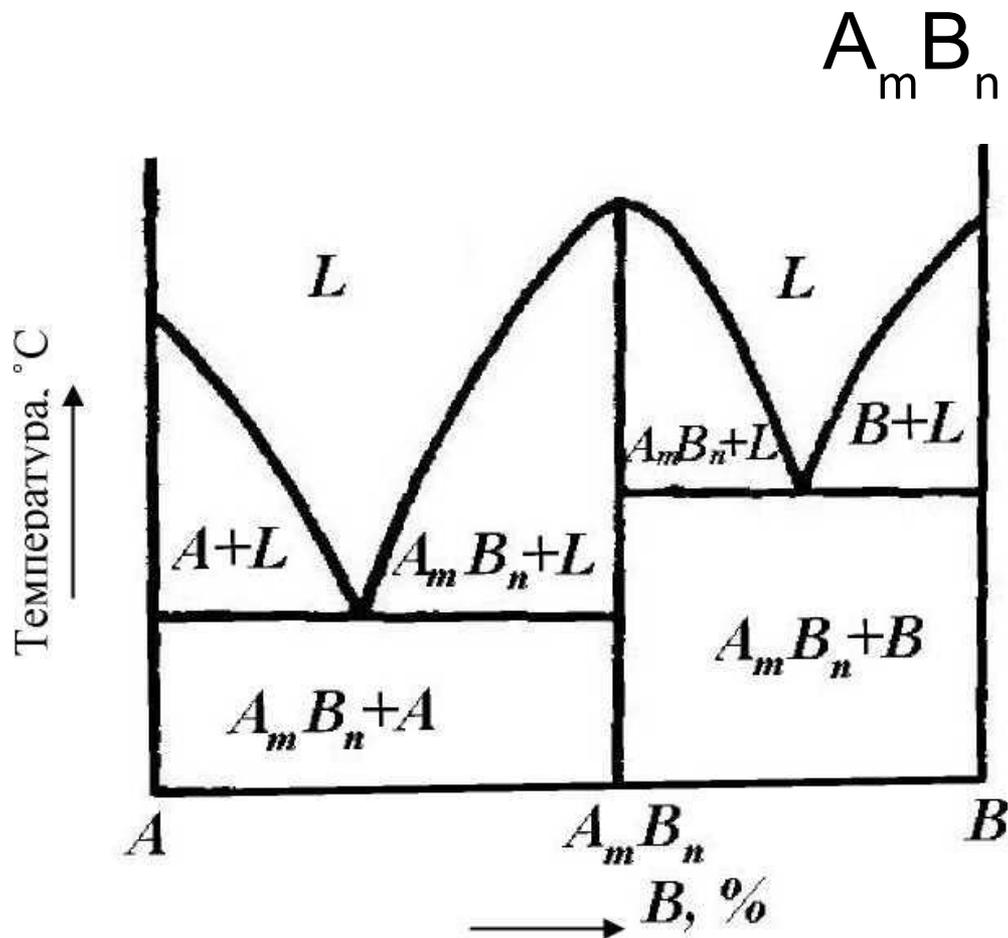


ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ С ХИМИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

- Устойчивым химическим соединением называется такое соединение, которое имеет ясно выраженную точку (температуру) плавления.

В системе образуются две разные эвтектики:
 одна состоит из фаз A и $A_m B_n$, вторая - из B и



Структурными составляющими от A до $A_m B_n$ концентраций будут:

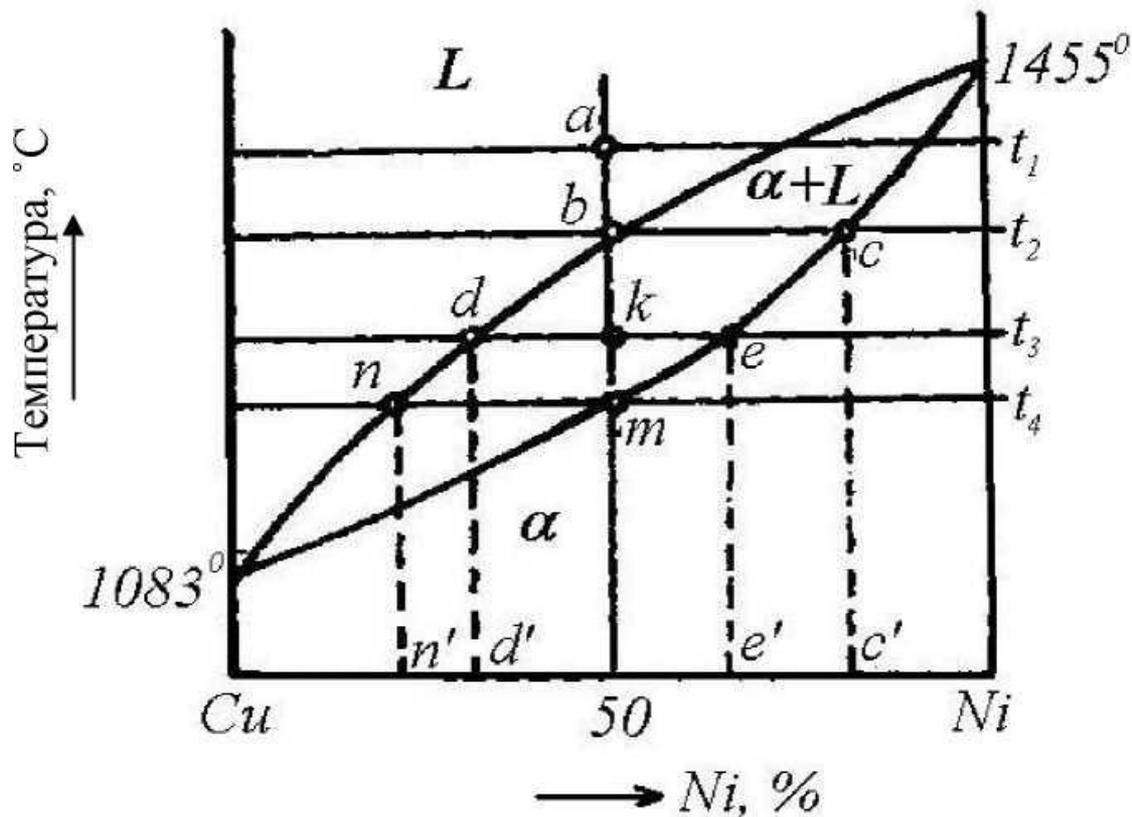
- а) доэвтектические сплавы: A + эвтектика ($A + A_m B_n$);
- б) заэвтектические сплавы: $A_m B_n$ + эвтектика ($A + A_m B_n$).

Структурными составляющими от $A_m B_n$ до B концентраций будут:

- а) доэвтектические сплавы: $A_m B_n$ + эвтектика ($B + A_m B_n$);
- б) заэвтектические сплавы: B + эвтектика ($B + A_m B_n$).

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

- Верхняя линия - линия ликвидуса, нижняя - линия солидуса.
- В случае образования твердых растворов в сплавах при кристаллизации не выделяются исходные компоненты.
- Во всех случаях образуются кристаллы только твердого раствора.



При промежуточной температуре t_3 состав фаз сплава:

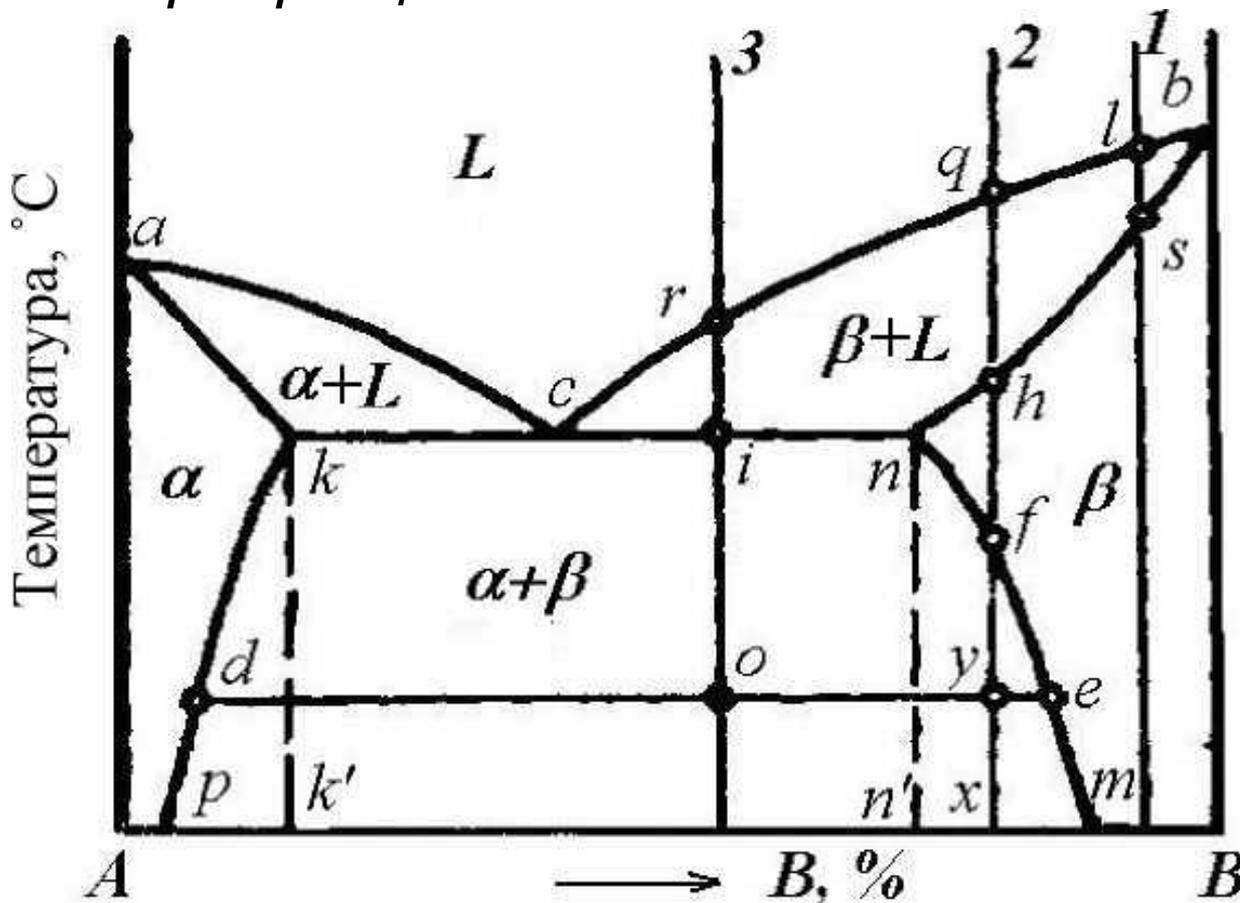
?

Изменение содержания меди и никеля в α-твердом растворе осуществляется путем диффузии внутри твердого раствора и в жидкой фазе - при межфазовом взаимодействии расплава и кристаллов.

Для выравнивания химического состава твердого раствора необходимо очень медленное охлаждение сплава.

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ С ОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

- *Диаграмма состояния системы с эвтектическим превращением*



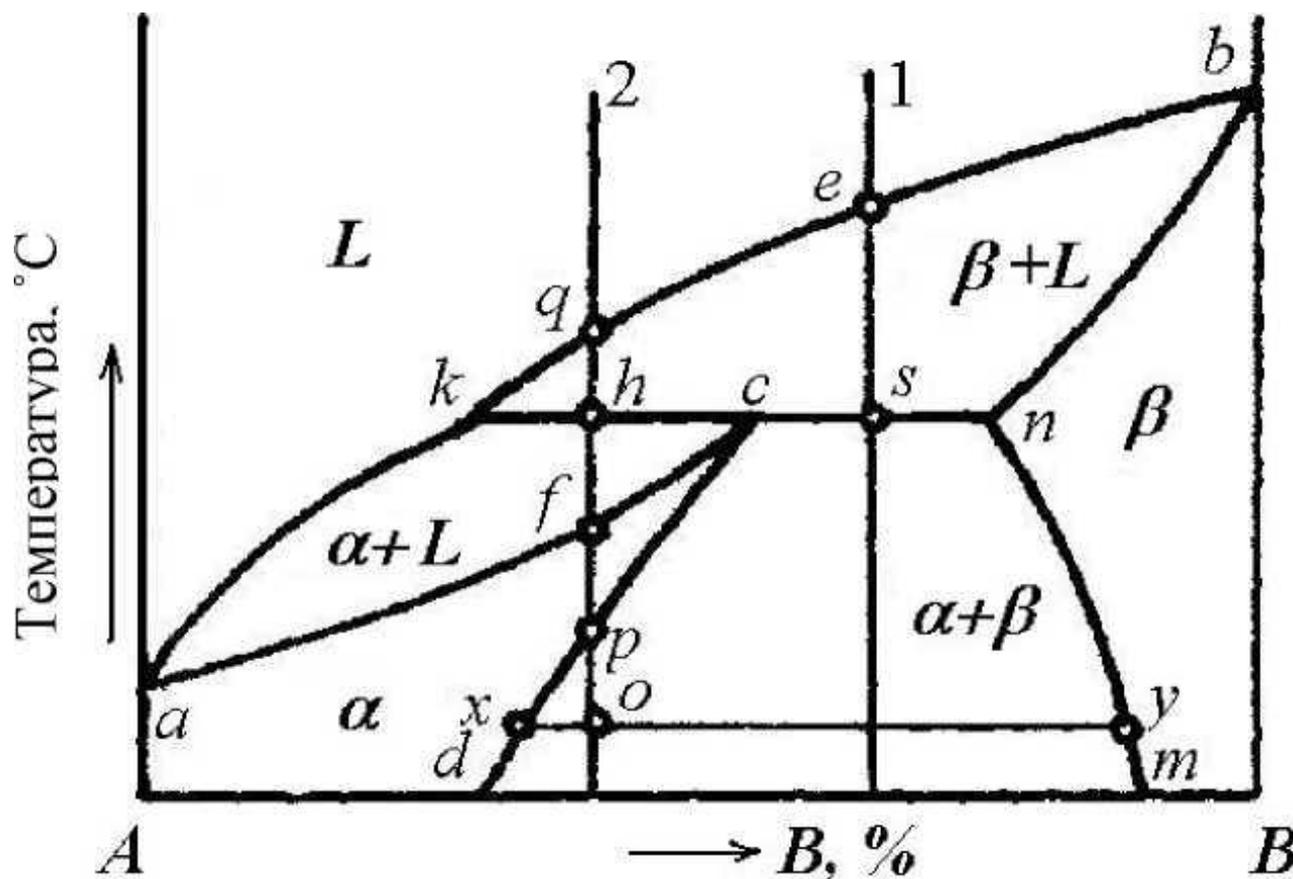
Линия *kr* указывает на пределы растворимости компонента *B* в *A*, т. е. в α -растворе, линия *nm* - на пределы растворимости компонента *A* в *B*, т. е. в β -растворе, при разных температурах (линии сольвуса).

- Сплавы, в которых есть переменная растворимость компонентов в твердых растворах при изменении температуры, представляют особый интерес для технических целей. На диаграмме к ним можно отнести две группы сплавов: от точки p до точки k' и от точки n' до точки m .
- В подобных сплавах методом специальной термической обработки можно получить различные неравновесные состояния и структуры, в результате чего эти сплавы могут приобрести ценные свойства (повышенную прочность и твердость).
- Если нагреть сплав 2 до температуры выше точки f (но ниже точки h), то фазовое состояние сплава будет представлено одним β -твердым раствором с исходной концентрацией компонентов. Последующее быстрое охлаждение в воде (закалка) предотвратит выделение избыточной α -фазы, и сплав при комнатной температуре будет состоять, как и в нагретом состоянии, из одного β -раствора состава точки x . Это будет неравновесное состояние сплава, β -твердым раствор окажется пересыщенным компонентом A .
- Последующий распад такого пересыщенного твердого раствора, происходящий при комнатной температуре (естественное старение) или при невысоком нагреве (искусственное старение), может привести к получению новых структурных состояний и свойств.
- Так, например, получают повышенную прочность и твердость сплавов алюминия с медью (дуралюмины) и меди с бериллием (бериллиевые бронзы).

Диаграмма состояния системы с перитектическим превращением

- Перитектическим превращением называется такое фазовое превращение, когда в результате взаимодействия жидкой фазы с ранее выделившейся кристаллической образуется новая кристаллическая фаза.
- При перитектическом превращении одновременно наблюдаются три фазы, эта реакция, как и эвтектическая, должна протекать при постоянной температуре и при постоянных концентрациях компонентов во всех трех фазах

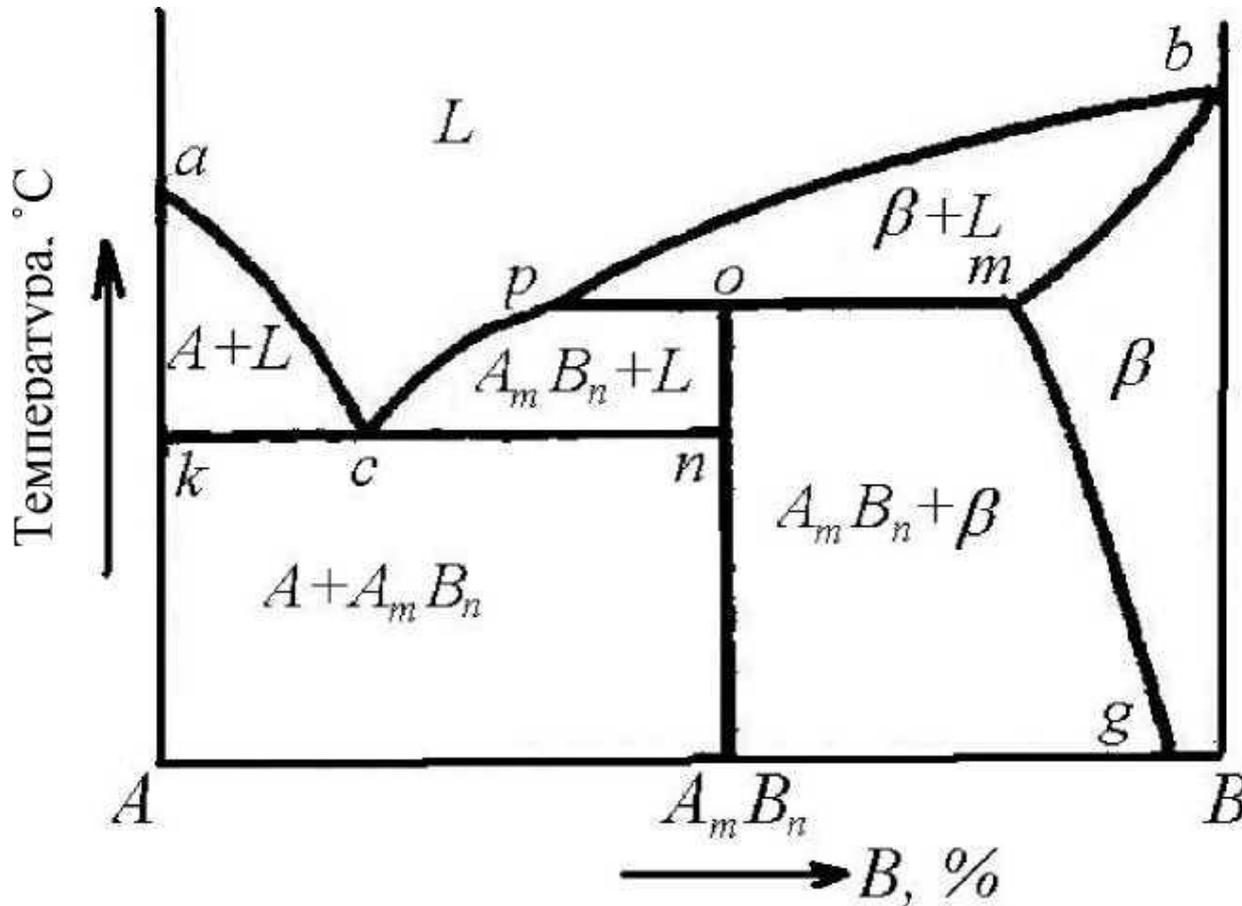
Диаграмма состояния системы с перитектическим превращением



Линия cd указывает на пределы растворимости компонента B в A , т. е. в α -растворе, линия nm - на пределы растворимости компонента A в B , т. е. в β -растворе, при разных температурах. Линия kcp является линией перитектического превращения.

- Сущность перитектической реакции состоит в следующем.
- При переохлаждении ниже перитектической температуры жидкий раствор становится пересыщенным по отношению к перитектической фазе - α -твердому раствору, которая поэтому и кристаллизуется. При кристаллизации α -фазы жидкий раствор обедняется компонентом B и становится ненасыщенным по отношению к β -фазе, что приводит к ее растворению в жидкости.
- В некоторых сплавах в результате перитектического превращения образуется не твердый раствор с ограниченной растворимостью компонентов, а *неустойчивое химическое соединение*. К неустойчивым химическим соединениям относят такие, которые при нагреве не плавятся, а распадаются на две другие фазы, из которых одна жидкая, а другая кристаллическая.

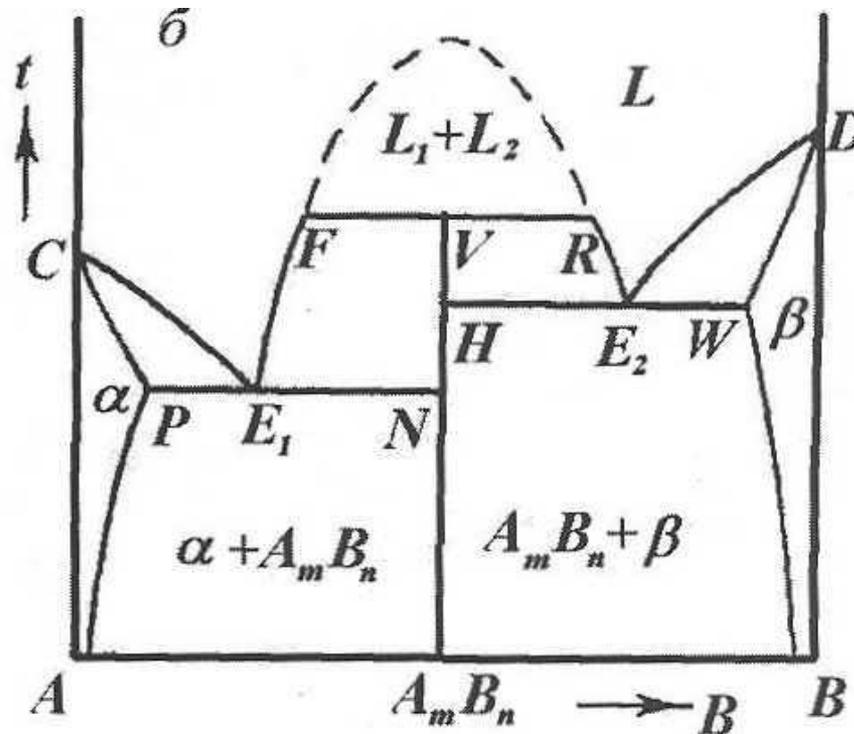
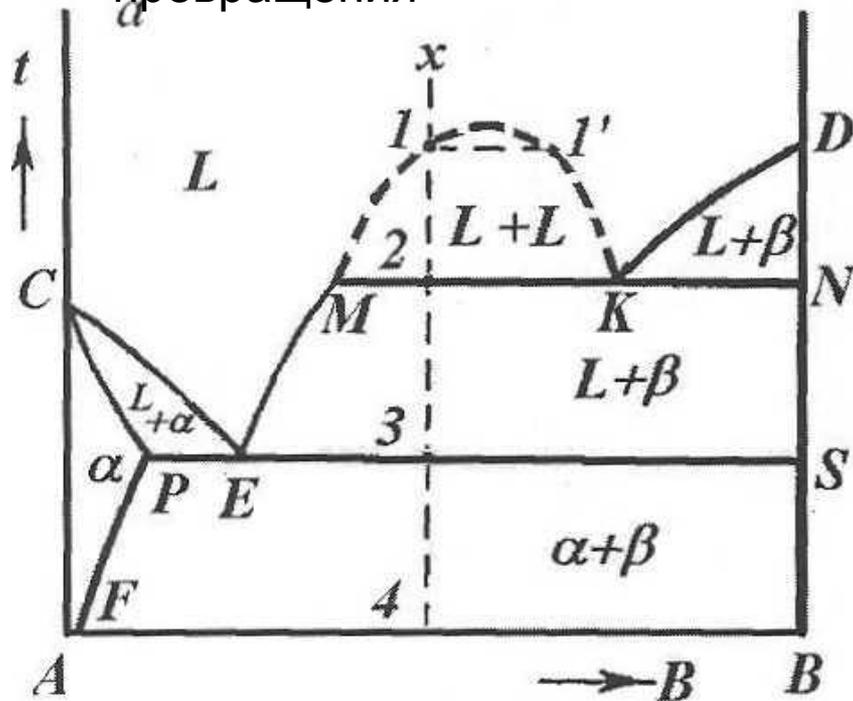
Образование неустойчивого химического соединения



В результате перитектического превращения при взаимодействии жидкой фазы и твердого раствора образуется неустойчивое химическое соединение $A_m B_n$. Это соединение при нагреве на линии rom , т. е. при достижении данной температуры, распадается, соответственно на кристаллы β -твердого раствора состава точки t и жидкую фазу состава точки p .

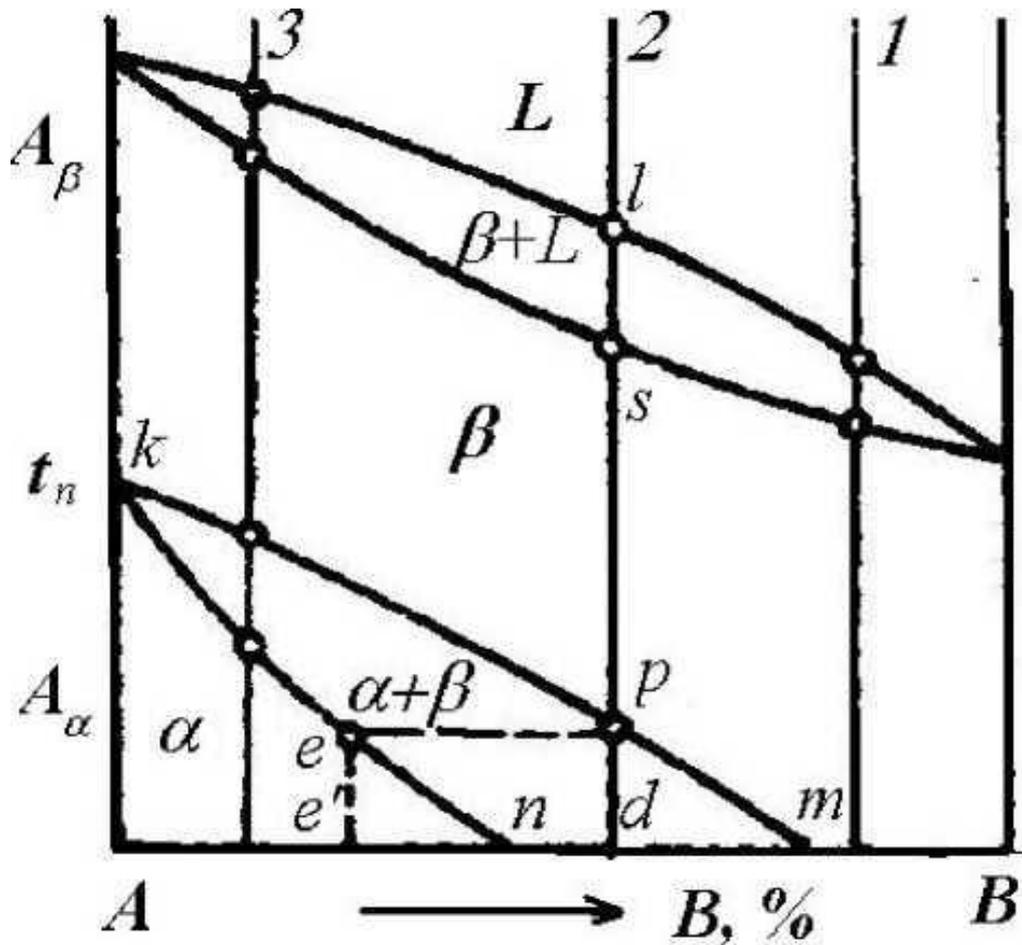
ДИАГРАММА С ОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Монотектическое (а) и синтектическое (б) превращения



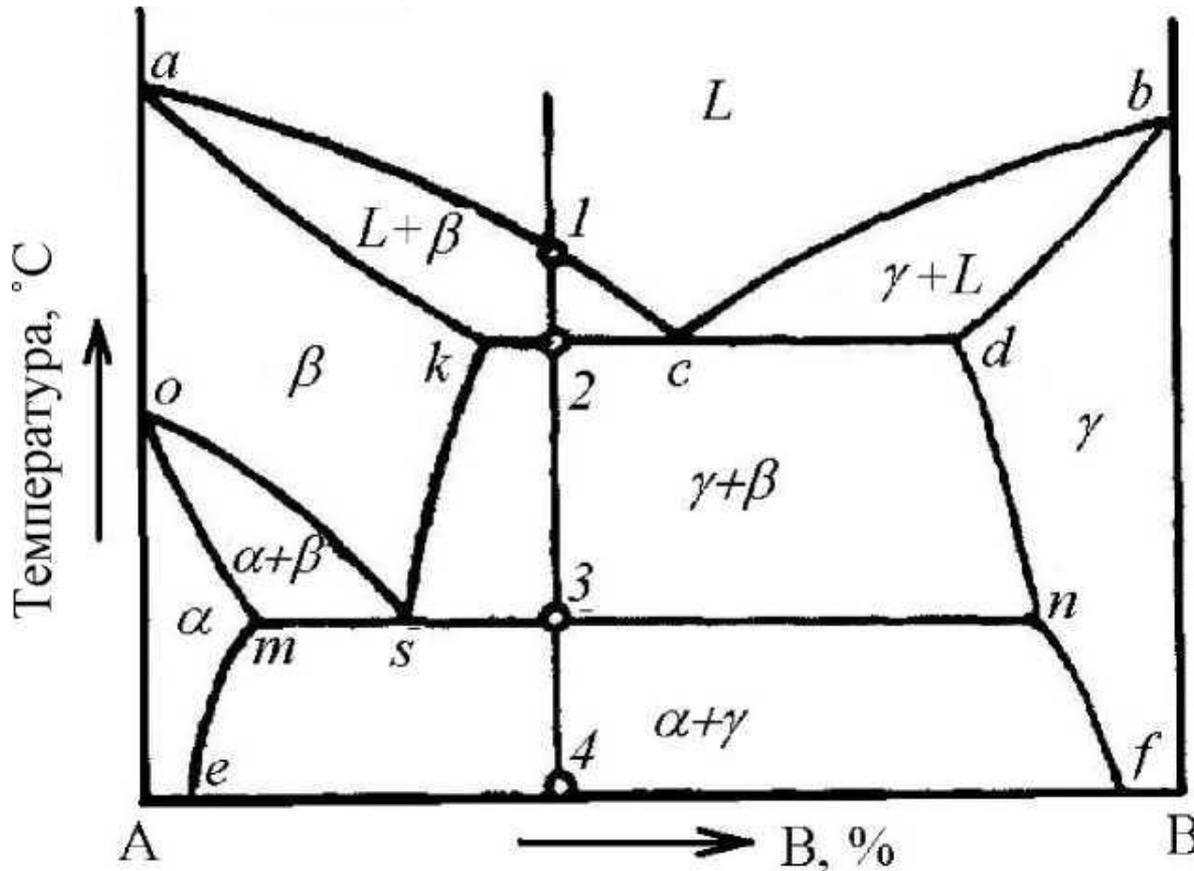
- Существует ряд металлов, которые в жидком состоянии дают ограниченную растворимость. На диаграммах состояния таких систем существует двухфазная область несмешиваемости $L_1 + L_2$ (область несмешиваемости или купол расслоения).

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ С НАЛИЧИЕМ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ У КОМПОНЕНТОВ



Полиморфное превращение в твердом растворе совершается диффузионным путем

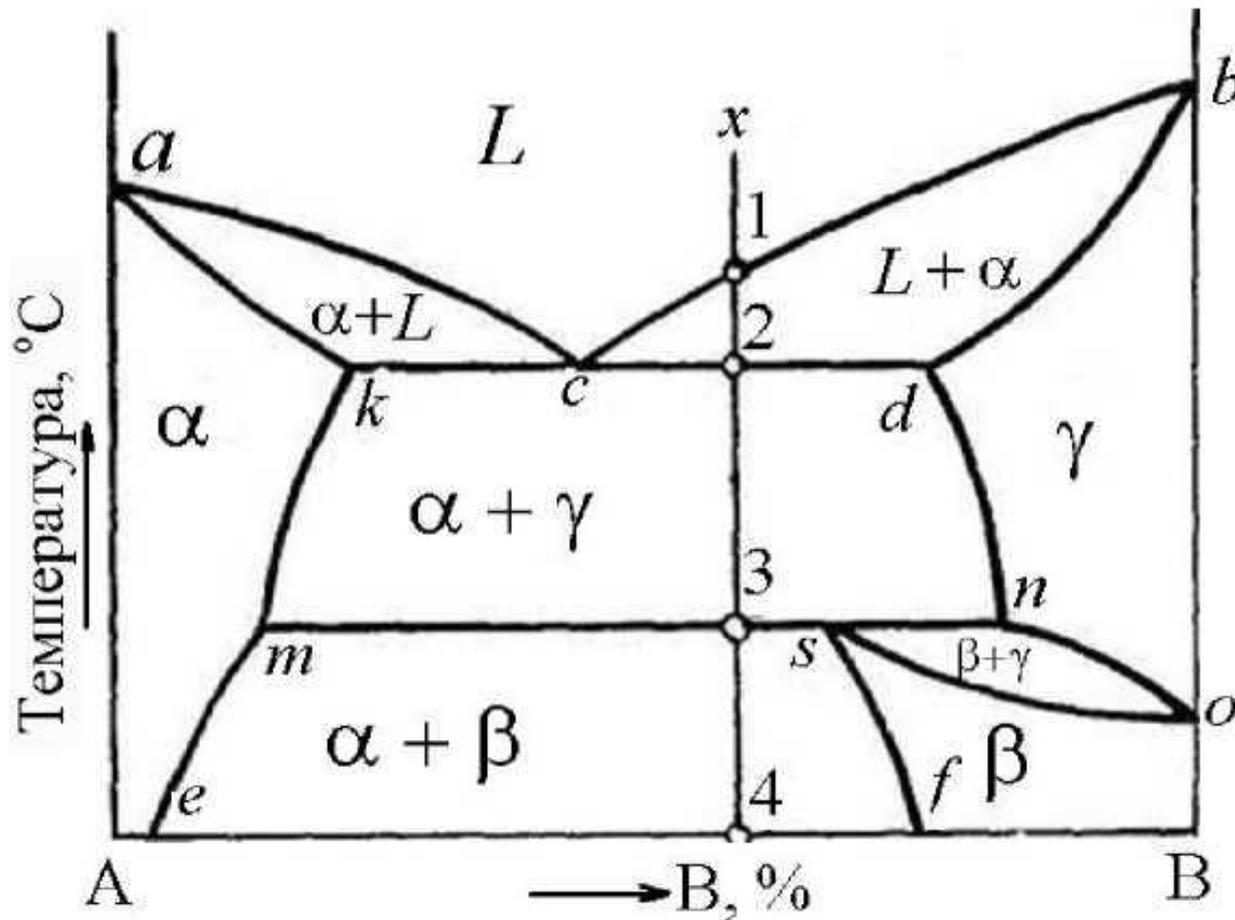
ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ А - В С ЭВТЕКТИЧЕСКИМ И ЭВТЕКТОИДНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ



На диаграмме имеются области гомогенности трех твердых растворов α , β , γ . Причем ограниченные твердые растворы α и β являются твердыми растворами на базе компонента А и различаются между собой типом кристаллической решетки. Соответственно γ - это ограниченный твердый раствор на основе компонента В.

Эвтектоидным называется превращение, когда из одной твердой фазы получаются две другие твердые.

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ А - В С ЭВТЕКТИЧЕСКИМ И ПЕРИТЕКТОИДНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ



При перитектоидном превращении две твердые фазы, взаимодействуя между собой, образуют новую твердую фазу

Фазы в сплавах железа с углеродом

- *Феррит* (обозначают Φ или α) - твердый раствор внедрения углерода в Fe. Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите составляет лишь 0,02 %, в высокотемпературном - 0,1 %. Столь низкая растворимость углерода в $Fe\alpha$, обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке.
- *Аустенит* (обозначают A или γ) - твердый раствор внедрения углерода в Fe_γ . Он имеет ГЦК решетку, межатомные поры в которой больше, чем в ОЦК решетке, поэтому растворимость углерода в Fe_γ значительно больше и достигает 2,14 %.
- *Цементит* (обозначают C или Fe_3C) - карбид железа (почти постоянного состава) Fe_3C , содержит 6,67 % C и имеет сложную ромбическую решетку.
- *Графит* - углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку.

Превращения

- Превращения в сплавах системы $Fe - Fe_3C$ происходят как при затвердевании жидкой фазы, так и в твердом состоянии. Первичная кристаллизация идет в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус ($ABCD$) и солидус ($AHJECFD$). Вторичная кристаллизация вызвана превращением железа одной модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите; при понижении температуры эта растворимость уменьшается. Избыток углерода из твердых растворов выделяется в виде цементита.
- Цементит имеет почти неизменный состав. Выделяющийся из расплава цементит называют *первичным*, из аустенита - *вторичным*, из феррита - *третичным*.
- В системе $Fe - Fe_3C$ происходят три изотермических превращения:
 - перитектическое превращение на линии HJB ($1499^\circ C$)
 - эвтектическое превращение на линии ECF ($1147^\circ C$)
 - эвтектоидное превращение на линии PSK ($727^\circ C$)

- Процессы фазовых превращений, идущих в твердом состоянии сплавов, называют *перекристаллизацией*.
- Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом*,
- Эвтектоидная смесь феррита и цементита - *перлитом*.
- *Эвтектоид* - *перлит* (0,8 % C) и *эвтектику* - *ледебурит* (4,3 % C) рассматривают как самостоятельные структурные составляющие, оказывающие заметное влияние на свойства сплавов.
- При охлаждении ледебурита до температур ниже линии *PSK* входящий в него аустенит превращается в перлит, и при 20 - 25°C ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита (*превращенный ледебурит*).
- Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

- Железоуглеродистые сплавы подразделяют на две группы:
- стали, содержащие от 0,02 до 2,14 % С и
- чугуны, содержащие выше 2,14 % С.
- Различают *доэвтектоидные стали*, расположенные по составу левее точки *S* диаграммы, т. е. между точками *P* и *S*, и *заэвтектоидные стали*, находящиеся правее точки *S*, т. е. между точками *S* и *E* диаграммы.
- Сплав железо - углерод, отвечающей точке *S* , называется *эвтектоидной сталью*.
- Чугун может быть *доэвтекктическим*, расположенным по составу между точками *E* и *C* диаграммы, и *заэвтекктическим*, лежащим по составу между точками *C* и *F* диаграммы.
- На практике содержание углерода в заэвтекктических чугунах обычно не превышает 5 %.
- Чугун, состав которого отвечает составу точки *C*, называется *эвтекктическим*.
- Структура чугунов может формироваться как по метастабильной, так и по стабильной диаграмме железо - углерод, Чугуны, структура которых образуется по метастабильной диаграмме *Fe - C*, называют *белыми чугунами*, а чугуны, кристаллизующиеся по стабильному варианту диаграммы *Fe - C*, - *серыми чугунами*.
- Эти названия чугуны получили по виду излома. Излом белых чугунов блестящий, кристаллический, а у серых чугунов - матовый, что обусловлено наличием в их структуре графита.

- Есть небольшая подгруппа сплавов, не испытывающих эвтектоидного превращения.
- Это сплавы с содержанием углерода до 0,02 %, которые называют *техническим железом*.
- Перекристаллизация всех доэвтектоидных сталей (сплавов железа с углеродом, содержащих углерод от 0,02 до 0,8 % С) начинается с первой стадии - полиморфного превращения аустенита в феррит.
- Перекристаллизация всех заэвтектоидных сплавов (с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 % С) начинается с выделения из аустенита вторичного цементита вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при понижении температуры.
- Перекристаллизация в доэвтектоидных и в заэвтектоидных сплавах заканчивается одинаковой для всех этих сплавов второй стадией распада аустенита. Она заключается в эвтектоидном распаде последних порций аустенита, с концентрацией углерода в 0,8 % при постоянной температуре 727°С с образованием механической смеси двух фаз: феррита и цементита.

СПЛАВЫ С СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА ВЫШЕ 2,14 % С

- Белые чугуны находятся на диаграмме железо - цементит правее точки E , т. е. все они, в отличие от сталей, обязательно должны содержать эвтектику. Благодаря большому содержанию цементита эти чугуны имеют светлый излом и поэтому называются белыми.
- Белые чугуны подразделяются на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические.

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА И ПОСТОЯННЫХ ПРИМЕСЕЙ НА СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

- Углерод, концентрация которого в конструкционных сталях достигает 0,5 (0,6) %, оказывает определяющее влияние на их свойства. Степень его влияния зависит от структурного состояния стали, ее термической обработки.
- Углерод изменяет технологические свойства стали. При увеличении его содержания снижается способность сталей деформироваться в горячем, особенно в холодном состояниях, затрудняется свариваемость.
- Постоянные примеси в стали: Mn , Si , P , а также газы O_2 , N_2 , H_2 .

- После отжига углеродистые конструкционные стали имеют ферритно-перлитную структуру, состоящую из двух фаз - феррита и цементита. Количество цементита, который отличается высокой твердостью и хрупкостью, увеличивается пропорционально концентрации углерода. В связи с этим по мере повышения содержания углерода возрастают прочность и твердость, но снижаются пластичность и вязкость

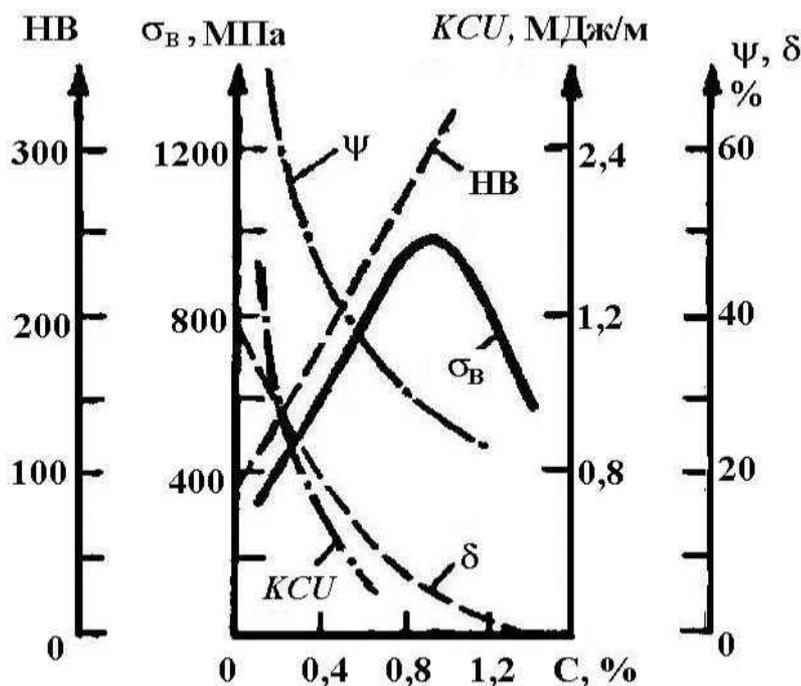


Рис. 70. Влияние углерода на механические свойства горячекатаных сталей

Влияние марганца и кремния

- *Марганец* - полезная примесь; вводится в сталь для раскисления и остается в ней в количестве 0,3 - 0,8 %. Марганец уменьшает вредное влияние серы и кислорода.
- Марганец предохраняет сталь от красноломкости, связывая серу в сульфид MnS , который исключает образование легкоплавкой эвтектики.

- *Кремний* - полезная примесь; вводится в сталь в качестве активного раскислителя и остается в ней в количестве до 0,4 %, оказывая упрочняющее действие.

Влияние серы

- *Сера* - вредная примесь, вызывающая красноломкость стали - хрупкость при горячей обработке давлением.
- В стали сера находится в виде сульфидов.
- Красноломкость связана с наличием сульфидов FeS , которые образуют с железом эвтектику, отличающуюся низкой температурой плавления ($988^{\circ}C$) и располагающуюся по границам зерен.
- При горячей деформации границы зерен оплавляются, и сталь хрупко разрушается.

- Устраняя красноломкость, сульфид MnS , так же как и другие неметаллические включения (оксиды, нитриды и т. п.), служат концентраторами напряжений, снижают пластичность и вязкость сталей. Содержание серы в стали строго ограничивают. Положительное влияние серы проявляется лишь в улучшении обрабатываемости резанием.

Влияние фосфора

- *Фосфор* - вредная примесь. Он растворяется в феррите, упрочняет его, но вызывает хладноломкость - снижение вязкости по мере понижения температуры.
- Сильное охрупчивающее действие фосфора выражается в повышении порога хладноломкости.
- Хрупкость стали, вызываемая фосфором, тем выше, чем больше в ней углерода.
- *Фосфор* - крайне нежелательная примесь в конструкционных сталях. Современные методы выплавки и переплавки не обеспечивают его полного удаления, поэтому основной путь его снижения - повышение качества шихты.

Влияние *кислорода, азота и водорода*

- *Кислород, азот и водород* - вредные скрытые примеси.
- Их влияние наиболее сильно проявляется в снижении пластичности и повышении склонности стали к хрупкому разрушению.
- Кислород и азот растворяются в феррите в ничтожно малом количестве и загрязняют сталь неметаллическими включениями (оксидами, нитридами).
- Кислородные включения способствуют красно- и хладноломкости, снижают прочность.
- Повышенное содержание азота вызывает деформационное старение.
- Атомы азота в холоднодеформированной стали скапливаются на дислокациях, образуя атмосферы Коттрелла, которые блокируют дислокации. Сталь упрочняется, становится малопластичной.

- Старение особенно нежелательно для листовой стали (< 0,1 % C), предназначенной для холодной штамповки.
- Последствия старения - разрывы при штамповке или образование на поверхности листов полос скольжения, затрудняющих их отделку.

- *Водород* находится в твердом растворе или скапливается в порах и на дислокациях.
- Хрупкость, обусловленная водородом, проявляется тем резче, чем выше прочность материала и меньше его растворимость в кристаллической решетке.
- Наиболее сильное охрупчивание наблюдается в закаленных сталях с мартенситной структурой и совсем отсутствует в аустенитных сталях.

- Повышенное содержание водорода при выплавке стали может приводить к флокенам.
- *Флокенами* называют внутренние надрывы, образующиеся в результате высоких давлений, которые развивает водород, выделяющийся при охлаждении в поры вследствие понижения растворимости.
- Флокены в изломе имеют вид белых пятен, а на поверхности - мелких трещин.
- Этот дефект обычно встречается в крупных поковках хромистых и хромоникелевых сталей. Для его предупреждения стали после горячей деформации медленно охлаждают или длительно выдерживают при 250°С. При этих условиях водород, имеющий большую скорость диффузии, не скапливается в порах, а удаляется из стали.
- Наводороживание и охрупчивание стали возможны при травлении в кислотах, нанесении гальванических покрытий и работе в водородсодержащих газовых средах.

- *Случайные примеси* - элементы, попадающие в сталь из вторичного сырья или руд отдельных месторождений.
- Из скрапа в стали попадает сурьма, олово и ряд других цветных металлов.
- Стали, выплавленные из уральских руд, содержат медь, из керченских - мышьяк.
- Случайные примеси в большинстве случаев оказывают отрицательное влияние на вязкость и пластичность сталей.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАВНОВЕСНУЮ СТРУКТУРУ СТАЛЕЙ

- В современной промышленности широкое применение находят стали, в которых помимо железа, углерода и постоянных примесей содержатся специально вводимые добавки других элементов, чаще всего металлов.
- Эти добавки принято называть *легирующими элементами*; а стали соответственно *легированными сталями*.

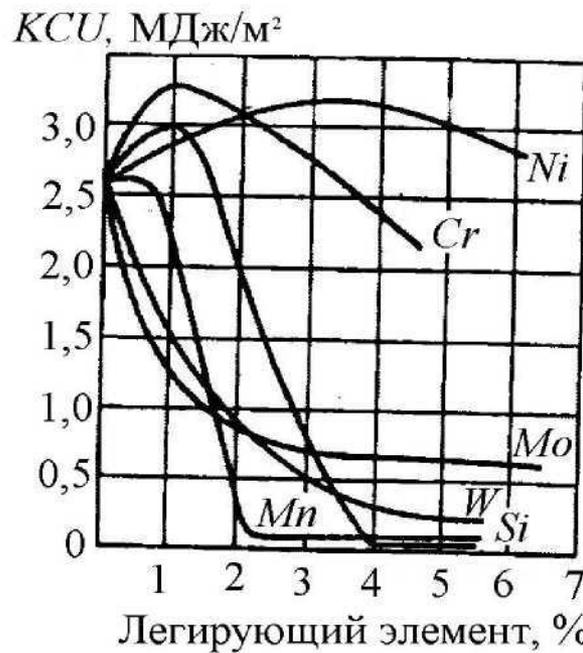
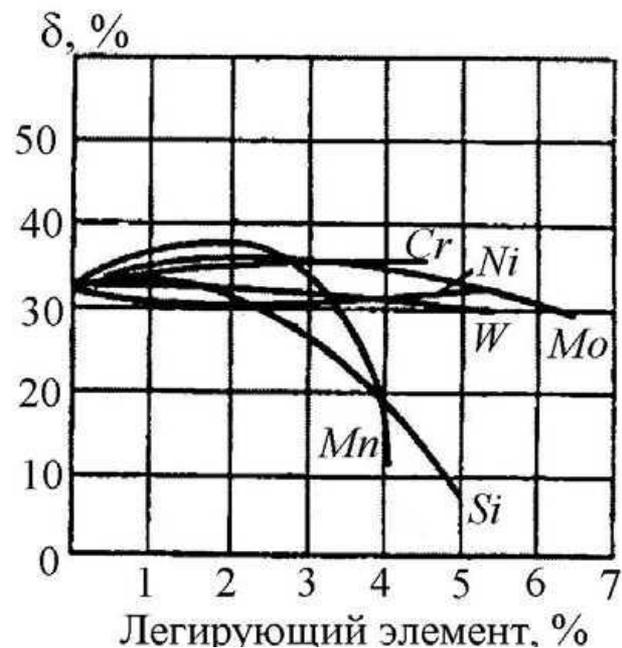
- В качестве легирующих элементов наиболее часто используют следующие: *Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Ti, Nb*.
- Реже используются *Co, Al, Cu, B* и некоторые другие.
- Почти все легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений железа, температуру эвтектоидной и эвтектической реакций и влияют на растворимость углерода в аустените.
- Некоторые легирующие элементы способны, как и железо, взаимодействовать с углеродом и азотом, а также между собой или с железом, образуя промежуточные фазы - *интерметаллиды*.

- Эвтектоидную температуру (линия PSK) обозначают A_1 температуру магнитного превращения (линия MO) - A_2 температуру линии GS - A_3 температуру полиморфного превращения $Fe_\gamma - Fe_s$ (линия NJ) - A_4 температуру линии SE - A_{cm} .
- Индексация: при нагреве - индекс c , при охлаждении - индекс R .

- Легирующие элементы при введении в сталь могут:
- образовывать с железом твердые растворы;
- растворяться в цементите, замещая атомы железа в решетке цементита, т. е. образовывать так называемый легированный цементит или самостоятельные специальные карбиды;
- образовывать (при высоком содержании) с железом интерметаллические соединения.

- Легирующие элементы, растворенные в феррите, повышают его предел прочности, не изменяя существенно относительного удлинения, за исключением марганца и кремния при содержании их $> 2,5 - 3,0 \%$.
- Наиболее сильно упрочняют феррит, кремний, марганец и никель. Остальные элементы сравнительно мало изменяют прочность феррита.
- Легирующие элементы при введении их в сталь в количестве $> 1 - 2 \%$ снижают ударную вязкость, а при более высоком содержании повышают порог хладноломкости. Исключение составляет никель, который, упрочняя феррит, одновременно увеличивает его ударную вязкость и понижает порог хладноломкости. Этим объясняются высокие вязкие свойства сталей, содержащих никель.
- Легирующие элементы, растворяясь в γ -железе, повышают прочность аустенита при нормальной и высоких температурах.

Влияние легирующих элементов на свойства феррита



Карбидная фаза в легированных сталях

- По отношению к углероду легирующие элементы следует распределить на три группы:
- графитизирующие элементы: кремний, никель, медь и алюминий (эти элементы находятся в твердом растворе);
- нейтральные: кобальт, который в стали не образует карбидов и не вызывает графитизации;
- карбидообразующие расположены в следующем порядке по возрастающей степени сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз: *Fe - Mn - Cr - Mo - W - V - Zr - Ti*.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

- *Конструкционными* называются стали, предназначенные для изготовления деталей машин (машиностроительные стали), конструкций и сооружений (строительные стали).
- Помимо высокой надежности и конструктивной прочности конструкционные материалы должны иметь высокие технологические свойства - хорошие литейные свойства, обрабатываемость давлением, резанием, хорошую свариваемость.

- Виды конструкционных сталей:
- 1) углеродистые, в том числе автоматные стали;
- 2) строительные;
- 3) цементуемые;
- 4) улучшаемые;
- 5) высокопрочные;
- 6) рессорно-пружинные;
- 7) подшипниковые;
- 8) износостойкие;
- 9) жаростойкие;
- 10) жаропрочные;
- 11) коррозионно-стойкие.

- Стали, в которых суммарное содержание легирующих элементов не превышает 2,5 %, относятся к *низколегированным*, содержащие 2,5 - 10 % - к *легированным*, и более 10 % - к *высоколегированным* (содержание железа более 45 %).
- Высокопрочными называют стали с временным сопротивлением более 1500 МПа.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

- По назначению инструментальные стали делятся на стали для режущего, штампового и измерительного инструментов.