

ФБГОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

Кафедра «Материаловедение, технологии материалов
и термическая обработка металлов»

Материаловедение

комплект демонстрационных материалов к курсу лекций
для студентов ИТС, ИПТМ, ИФХТиМ

Составитель:
доц. Костромин С.В.

2018

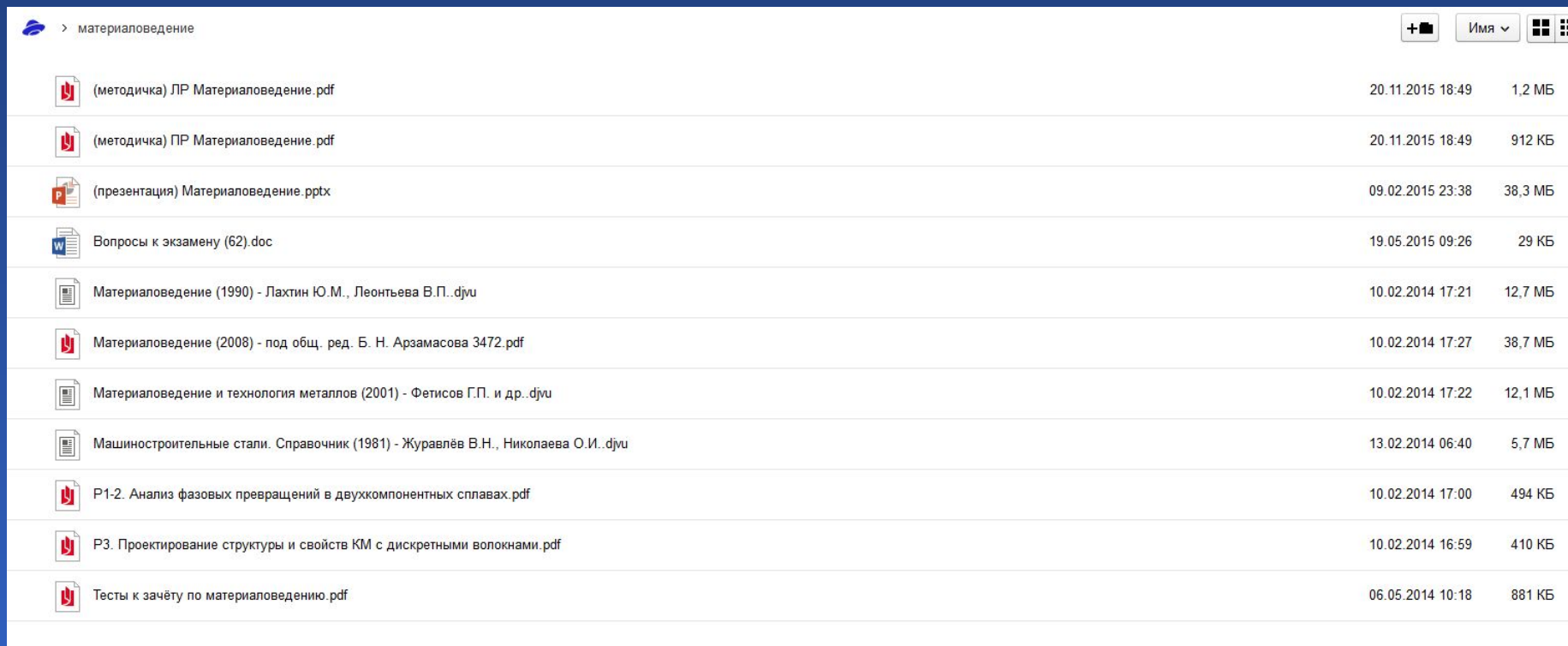
Литература

- Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Альянс, 2013.
- Фетисов Г. П., и др. Материаловедение и технология металлов // 7-е изд., пер. и доп. - М.: Юрайт, 2015. – 737 с.
- Материаловедение / Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008.
- Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2009.
- Стали и сплавы. Марочник: Справочное издание / Научн. ред. В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев. – М.: Интермет инжиниринг, 2001.

Методические материалы

Методические указания к лабораторным работам и практическим занятиям можно скачать по адресу:

<http://yadi.sk/d/35CJ5AL5He8ah>



Имя	Дата и время	Размер
(методичка) ЛР Материаловедение.pdf	20.11.2015 18:49	1,2 МБ
(методичка) ПР Материаловедение.pdf	20.11.2015 18:49	912 КБ
(презентация) Материаловедение.pptx	09.02.2015 23:38	38,3 МБ
Вопросы к экзамену (62).doc	19.05.2015 09:26	29 КБ
Материаловедение (1990) - Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П..djvu	10.02.2014 17:21	12,7 МБ
Материаловедение (2008) - под общ. ред. Б. Н. Арзамасова 3472.pdf	10.02.2014 17:27	38,7 МБ
Материаловедение и технология металлов (2001) - Фетисов Г.П. и др..djvu	10.02.2014 17:22	12,1 МБ
Машиностроительные стали. Справочник (1981) - Журавлёв В.Н., Николаева О.И..djvu	13.02.2014 06:40	5,7 МБ
P1-2. Анализ фазовых превращений в двухкомпонентных сплавах.pdf	10.02.2014 17:00	494 КБ
P3. Проектирование структуры и свойств КМ с дискретными волокнами.pdf	10.02.2014 16:59	410 КБ
Тесты к зачёту по материаловедению.pdf	06.05.2014 10:18	881 КБ

Материаловедение – наука, изучающая связь между химическим составом, структурой и свойствами материалов и изменение этих свойств при различных воздействиях на материал.



Классификация металлов

По агрегатному состоянию:

- Газообразные
- Жидкие
- Твёрдые

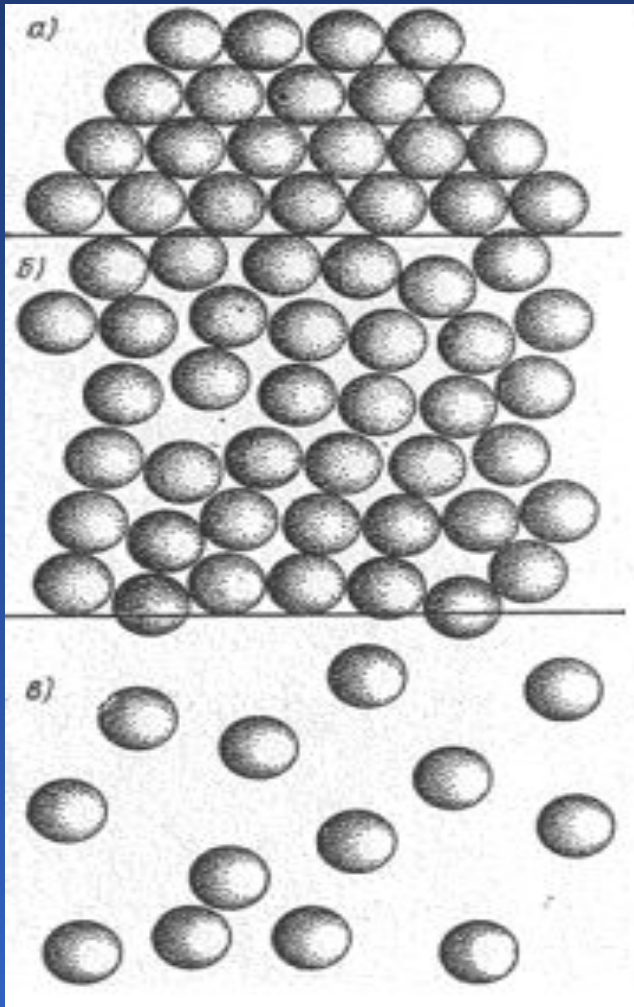
По внутреннему строению:

- Кристаллические
- Аморфные

По применению:

- Конструкционные
- Инструментальные
- С особыми свойствами

Модель расположения частиц в веществе

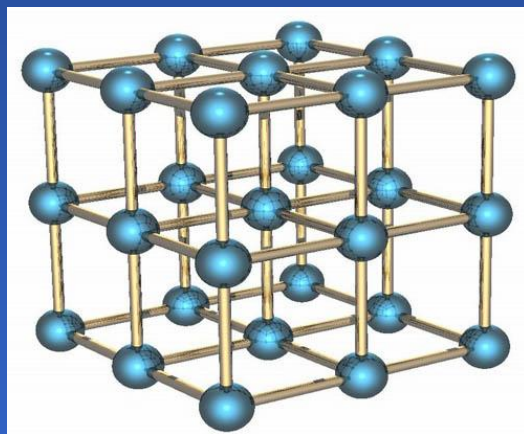
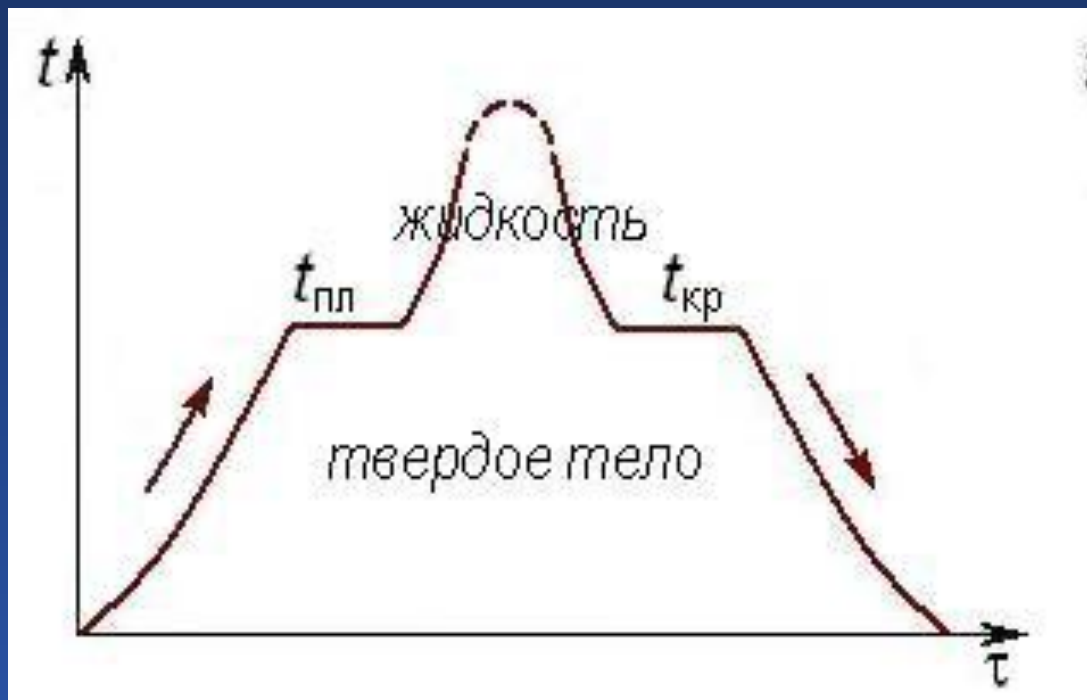


а) кристалл-характерен дальний порядок расположения атомов

б) жидкость – характерен ближний порядок Расположения атомов

в) газ – отсутствие порядка в расположении атомов

Поведение при нагреве кристаллического и аморфного вещества



Требования, предъявляемые к материалам:

- Эксплуатационные
- Технологические
- Экономические

Свойства материалов

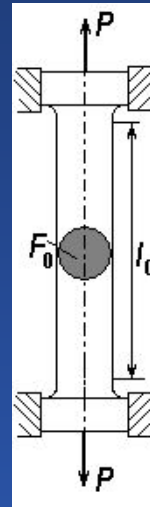
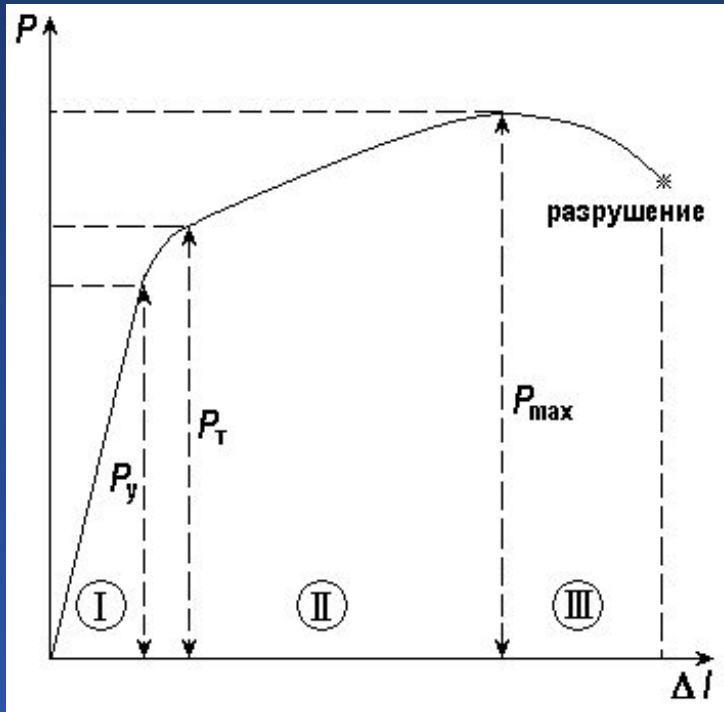
Механические – характеризуют поведение материала под действием приложенных механических нагрузок. Определяются при механических испытаниях на растяжение, изгиб, ударную вязкость, измерение твердости.

Физико-химические – характеризуют поведение материала при контакте с внешней средой.

Технологические – характеризуют поведение материала при его обработке.

Механические свойства

Прочность – способность материала сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних и внутренних напряжений.



предел упругости $\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}$ –

наибольшее напряжение, после которого образец возвращается к прежней форме и размерам;

предел текучести $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$ –

напряжение пластического течения металла без увеличения нагрузки;

предел прочности $\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}$ –

наибольшее напряжение, которое металл выдерживает, не разрушаясь

Истинный предел текучести σ_T определить трудно: не у всех металлов образуется «площадка текучести». Поэтому чаще всего определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ который вызывает остаточную деформацию 0,2 % $\sigma_T \sim \sigma_{0,2}$

Прочностные расчеты чаще ведут по пределу текучести, так как значительная пластическая деформация большинства деталей и конструкций недопустима. Но и предел прочности знать необходимо, так как он показывает, при каком напряжении начнется разрушение

Механические свойства

Пластичность – способность материала деформироваться без разрушения. Характеристики пластичности определяют из того же испытания на растяжение. Это

относительное удлинение

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

и относительное сужение

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} * 100\%$$

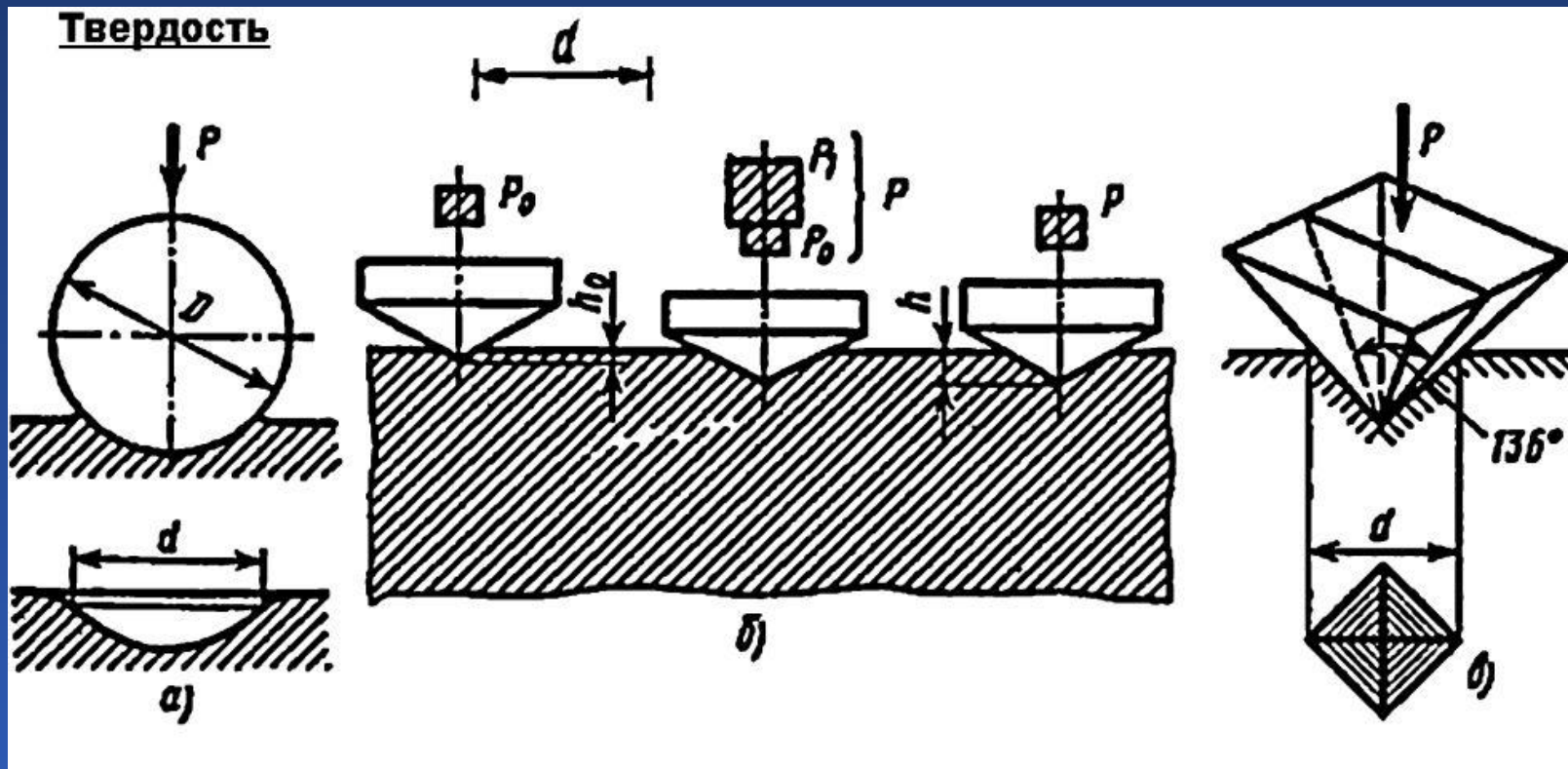
l_0 и l_k , мм – длина образца до и после испытания;

F_0 и F_k , мм² – начальная и конечная площадь поперечного сечения образца.

Относительное удлинение и относительное сужение являются одновременно и критериями **надежности**: материал, имеющий бóльшие значения δ и ψ , более надежен

Механические свойства

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела.



а) по Бринеллю - **HB**; б) по Роквеллу - **HRA, HRB, HRC**; в) по Виккерсу - **HV**

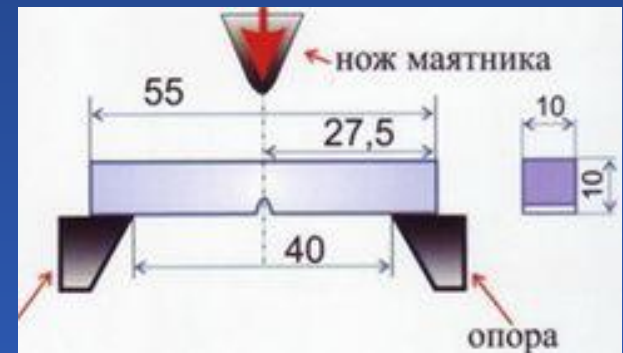
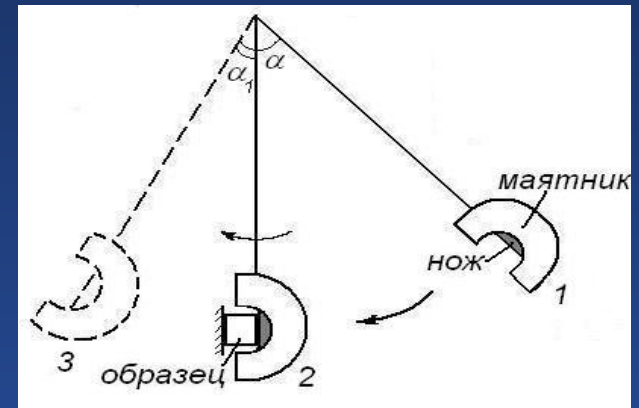
Механические свойства

Вязкость – способность материала сопротивляться разрушению при ударных, динамических нагрузках. Характеристика вязкости определяется при испытании на ударный изгиб, при котором нагрузка прилагается к образцу с очень большой скоростью, за тысячные доли секунды.

Испытание проводится на маятниковом копре. Тяжелый маятник, поднятый на определенный угол, отпускают. На пути движения маятника находится образец. Удар ножа маятника разрушает его.

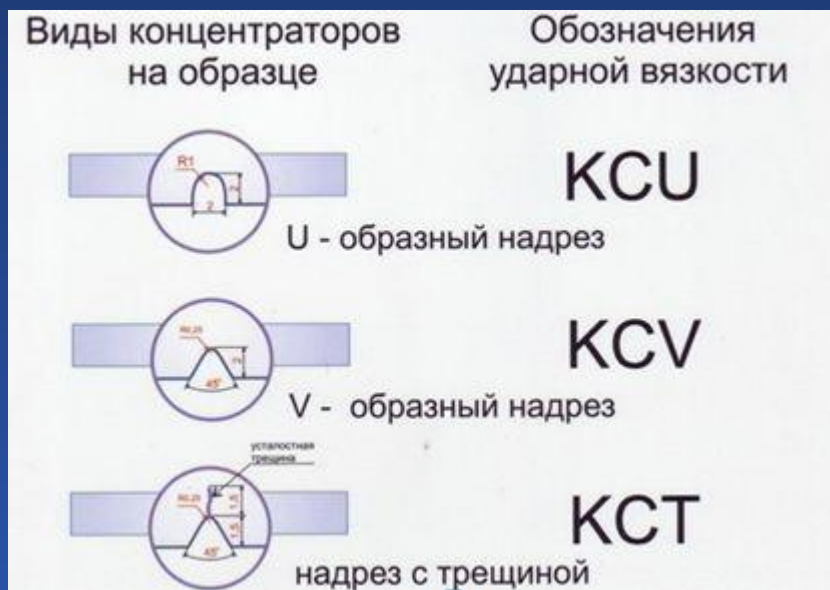
Произведенная при разрушении работа определяется как разность между потенциальной энергией маятника до и после испытания.

Ударная вязкость – это работа разрушения образца, отнесенная к площади поперечного сечения:



Механические свойства

Образец должен иметь надрез – концентратор напряжения. Обозначение ударной вязкости зависит от вида надреза



Для одного и того же материала $KCU > KCV > KCT$, т. е. чем острее надрез, тем легче разрушается материал.

Ударная вязкость тоже является критерием **надежности** материала, гарантией, что он не будет разрушаться хрупко, внезапно.

Свойство металла хрупко разрушаться, терять вязкость при понижении температуры называется **хладноломкостью**.

За характеристику хладноломкости принимают **температурный порог хладноломкости** t_{50} . Это температура, при которой величина ударной вязкости уменьшается вдвое. При этом излом имеет строение наполовину вязкое, наполовину хрупкое.

Механические свойства

Многие детали – валы, оси, шестерни – испытывают переменные по величине и направлению нагрузки. Под действием многократно повторяющихся знакопеременных нагрузок в металле накапливаются повреждения, дефекты. Это явление называется *усталостью*.

Напряжения, даже меньше σ_T , могут вызвать зарождение и рост *усталостной трещины*, возникающей на поверхности детали. Это постепенно приведет к разрушению.

Выносливость – это способность металла противостоять усталости, сопротивляться разрушению при знакопеременных нагрузках.

Пределом выносливости, или **пределом усталости** σ_{-1} называется наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения образца после заданного числа циклов нагружения.

При испытании сталей стандартное число циклов нагружения $N = 10^7$, при испытании цветных металлов и сплавов $N = 10^8$.

Физические свойства

Плотность (ρ , г/см³ или кг/м³) – масса, содержащаяся в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

где m – масса, кг (г); V – объем, м³ (см³).

Различают:

среднюю плотность, когда объем материала принимается в естественном состоянии, т.е. измеряется вместе с порами;

истинную плотность, когда объем материала принимается в абсолютно плотном состоянии, т.е. без учета пор и пустот. Истинная плотность материала – величина постоянная, которая не может быть изменена без изменения его химического состава или молекулярной структуры.

Плотность является необходимой характеристикой при определении массы изделий, расчете несущей способности конструкций, определении стоимости и способа перевозок, выборе подъемно-транспортного оборудования и т.п.

Физические свойства

Температура плавления – это температура, при которой нагреваемый металл полностью переходит из твердого состояния в жидкое при нормальном атмосферном давлении.

Чистые металлы плавятся при определенных температурах, а большинство сплавов – в интервале температур, т.е. имеют начало и конец плавления. При этом температура плавления сплава, как правило, ниже температуры плавления самого легкого его компонента, а температура затвердевания понижается с увеличением концентрации растворенного вещества.

Температура плавления имеет большое значение при выборе металлов для изготовления литых изделий, сварных и паяных соединений, термоэлектрических приборов и других изделий.

Физические свойства

Теплопроводность [Вт/(м·К)] – это способность материала передавать тепло от более нагретых к менее нагретым участкам с той или иной скоростью. Чем больше теплопроводность, тем быстрее тепло при нагревании распространяется по всему объему материала.

Учитывают теплопроводность при обработке материалов режущими инструментами, термообработке, газовой резке.

А также при изготовлении нагревательных приборов, различных тепловых агрегатов (котлов, теплосетей и т.п.), холодильников.

Физические свойства

Теплоемкость [кДж/(кг·К)] – свойство материала поглощать при нагревании определенное количество теплоты и отдавать его при охлаждении.

Характеризуется удельной теплоемкостью, т.е. количеством тепла (Дж), которое необходимо для повышения температуры 1 кг металла на 1 К.

Учитывается теплоемкость при расчете процессов нагрева или охлаждения металлов.

Физические свойства

Тепловое расширение – способность материалов изменять в процессе нагревания или охлаждения свои размеры при постоянном давлении. В основе теплового расширения лежит несимметричность тепловых колебаний атомов, поэтому при повышении температуры увеличиваются средние межатомные расстояния. Характеристиками теплового расширения являются температурные коэффициенты линейного или объемного расширения.

Тепловое расширение металлов необходимо учитывать при ковке, горячей объемной штамповке, сварке изделий, прокладке трубопроводов и рельсов железнодорожных путей, соединении мостовых ферм и других металлических конструкций.

Физические свойства

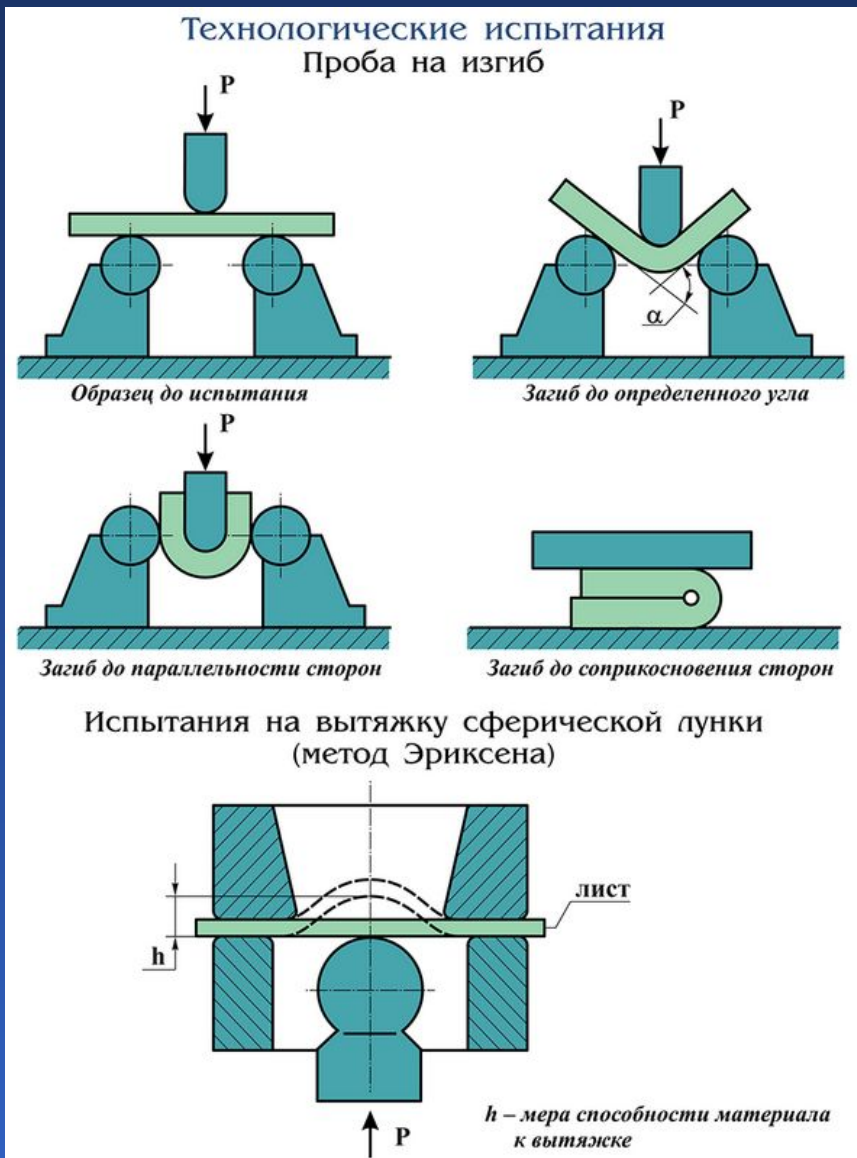
Электропроводность - способность металлов проводить электрический ток под действием внешнего электрического поля. Наибольшей электропроводностью обладают чистые металлы – Cu, Al, Fe. У сплавов электропроводность ниже.

Характеристикой противоположной электропроводности является **электросопротивление** – свойство материала проводника препятствовать прохождению через него электрического тока.

Характеризуется удельным электрическим сопротивлением [Ом·м], т.е. сопротивлением однородного отрезка проводника длиной 1 м и площадью токоведущего сечения 1 м². В технике применяется чаще всего в миллион раз меньшая производная единица – Ом·мм²/м

К металлам с высоким электрическим сопротивлением относят W, Cr, Ni. Из сплавов на их основе изготавливают электронагревательные элементы.

Технологические свойства



Технологические свойства характеризуют способность металлов подвергаться обработке в холодном и горячем состояниях. Технологические свойства определяют при технологических пробах, которые дают качественную оценку пригодности металлов к тем или иным способам обработки.

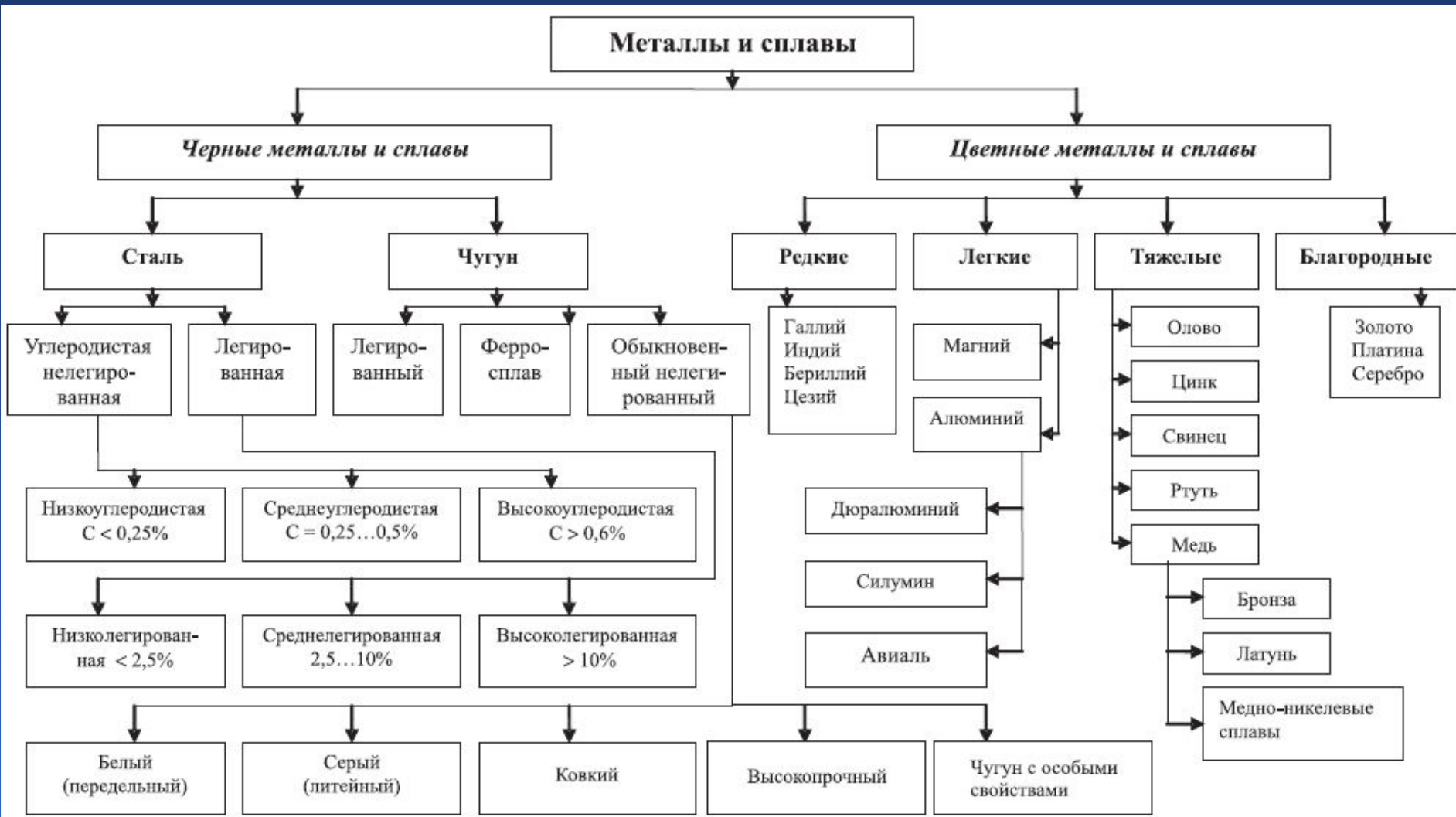
К основным технологическими свойствам относят:

обрабатываемость резанием,
свариваемость, ковкость,
литейные свойства.

Металлы и сплавы

Из 117 элементов периодической системы элементов $\frac{3}{4}$ обладают металлическими свойствами

Классификация металлов и сплавов



Общие свойства металлических материалов

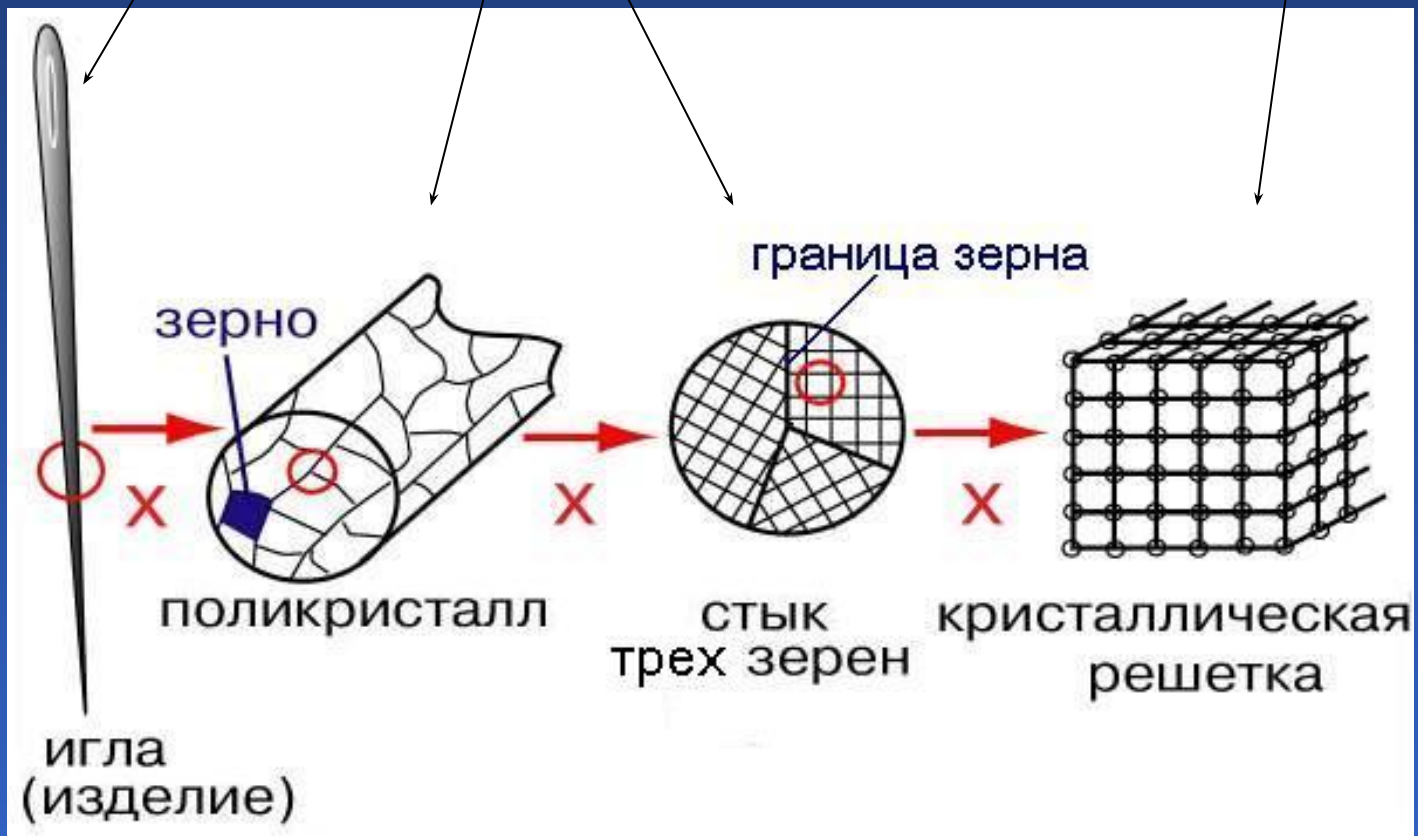
1. Металлические материалы, получаемые традиционным способом, являются кристаллическими веществами.
2. Для металлов характерен металлический тип связи между атомами в кристалле.
3. Металлы хорошо проводят тепло, электричество, имеют характерный блеск, способны к термоэлектронной эмиссии, имеют положительный температурный коэффициент электросопротивления.
4. Металлы способны к пластической деформации.

Методы исследования структуры материалов

макроанализ

микроанализ

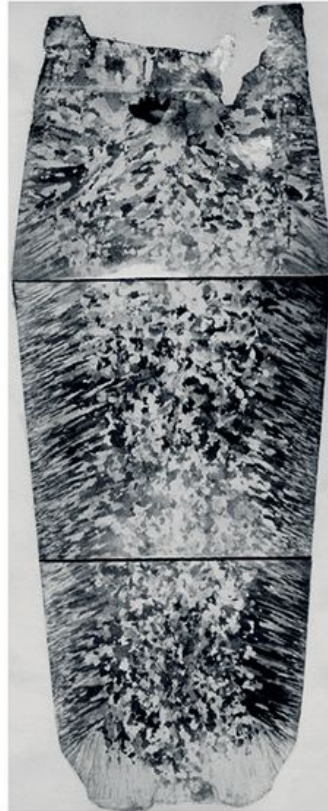
рентгеноструктурный
анализ



Макроструктура



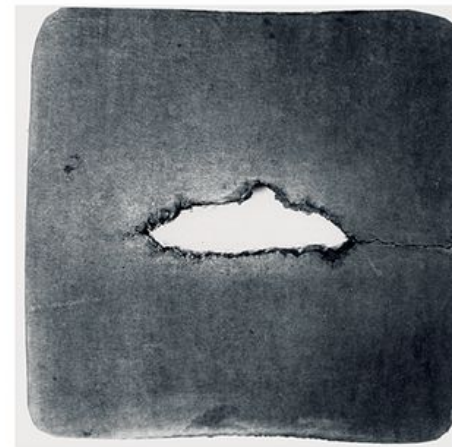
Волокнистая структура после горячей штамповки



Структура слитка



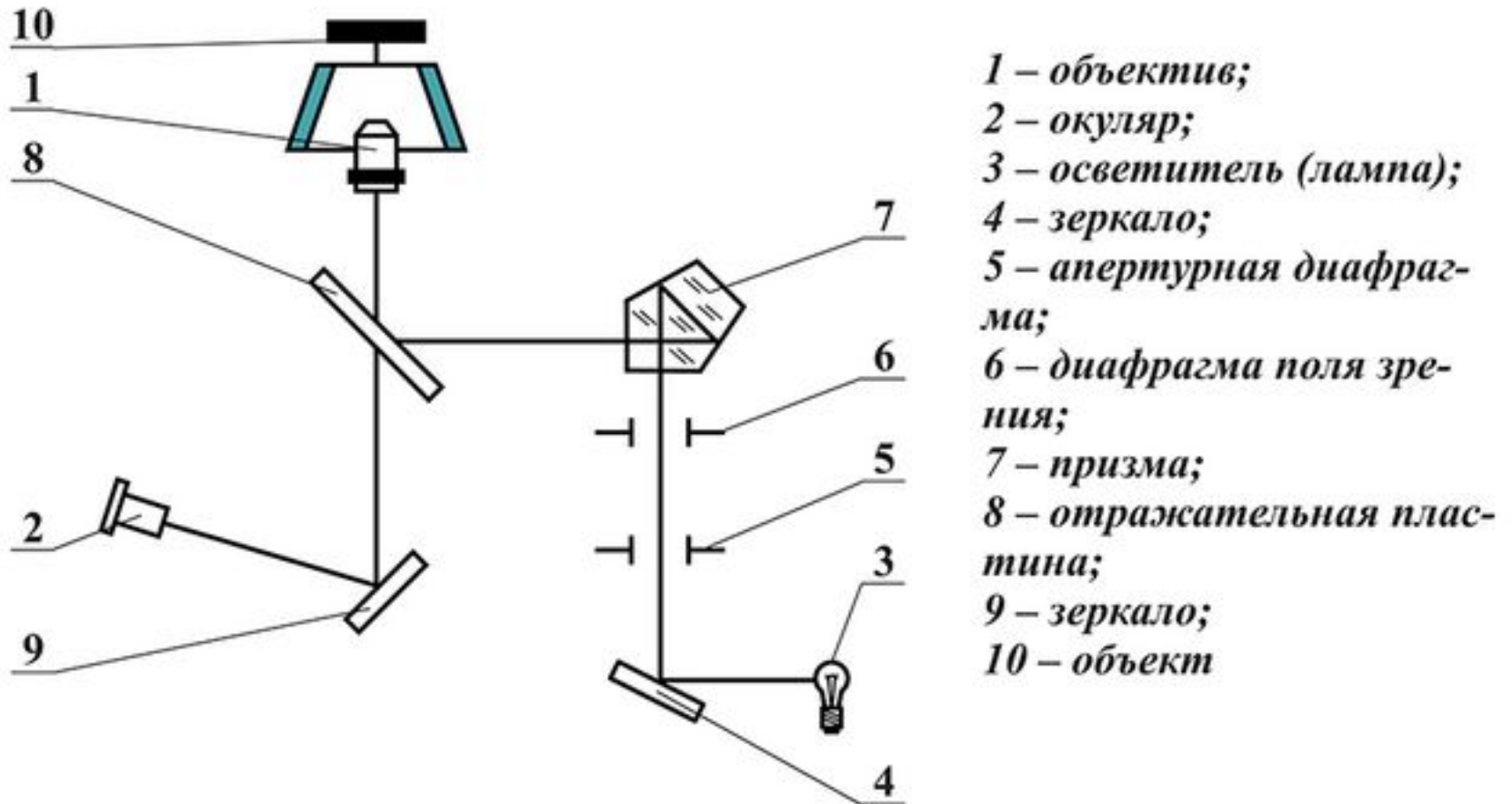
Газовые пузыри



Остатки усадочной раковины

Микроструктура

Схема металлографического микроскопа



Разрешающая способность микроскопа δ – это минимальная величина объекта, различаемая с его помощью.

Для оптического микроскопа

$$\delta = 0,2 \text{ мкм}$$

Микроструктура

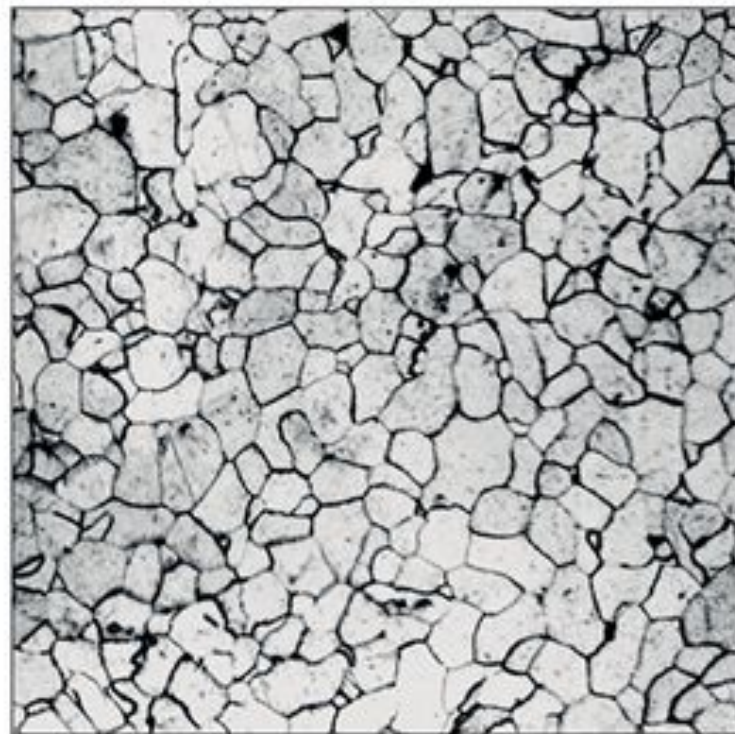
Нетравленный шлиф



Силикатное включение

x100

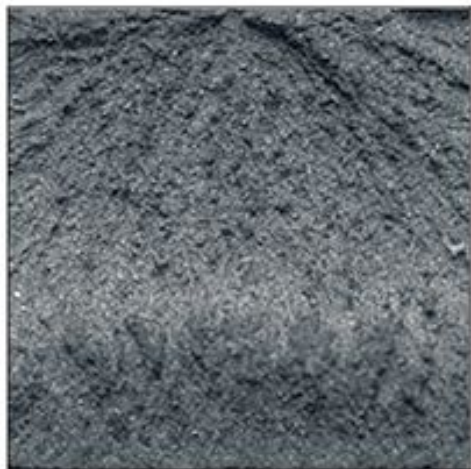
Травленный шлиф



Чистое железо

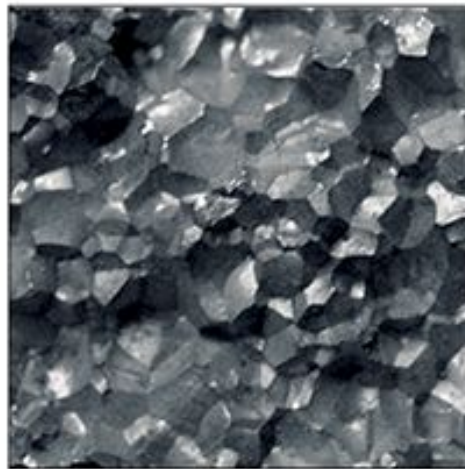
x150

Фрактография (исследование изломов)



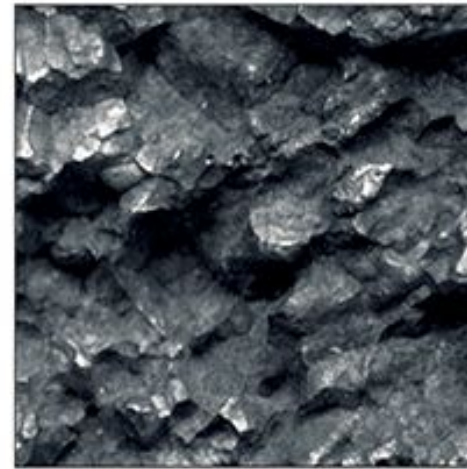
X5

Вязкий излом



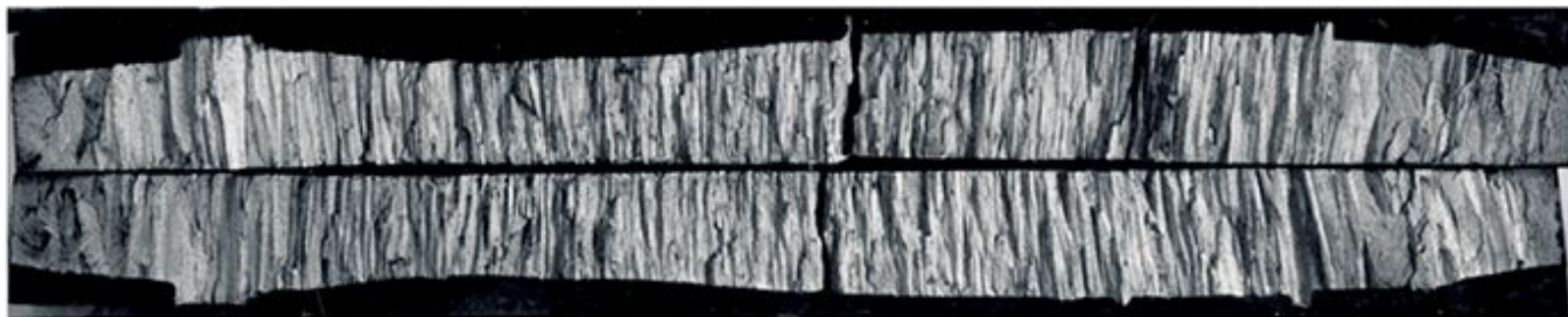
X5

Интеркристаллитный хрупкий излом



X5

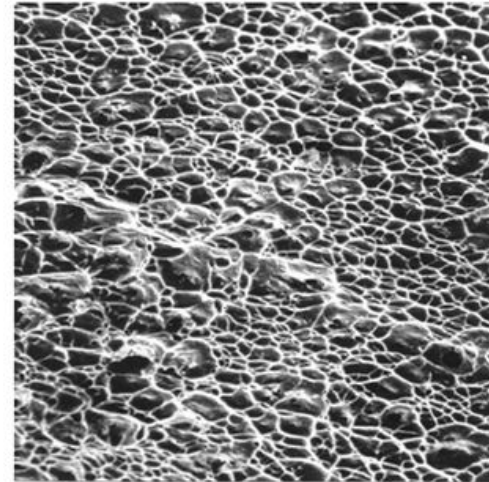
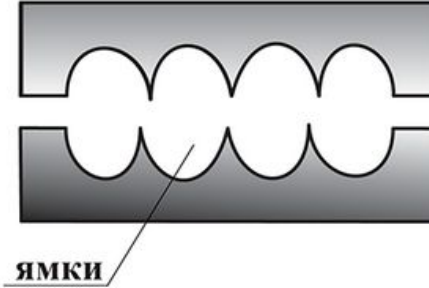
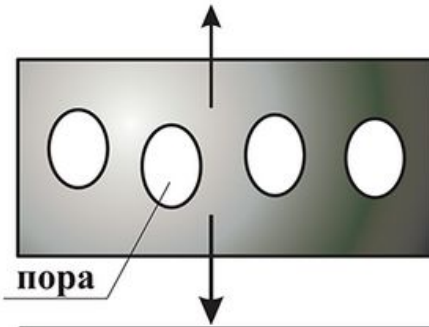
Транскристаллитный хрупкий излом



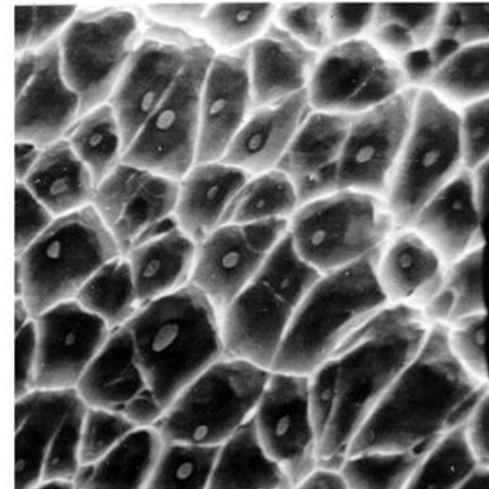
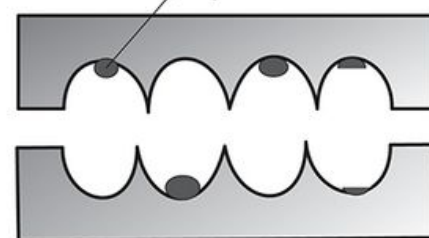
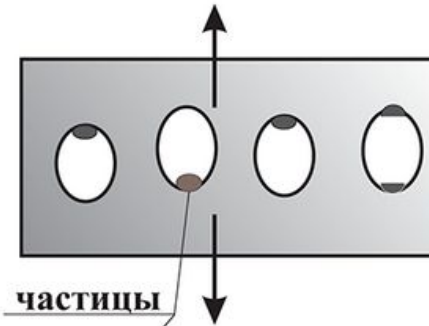
Слоистый излом

Фрактография (исследование изломов)

Вязкое транскристаллитное разрушение



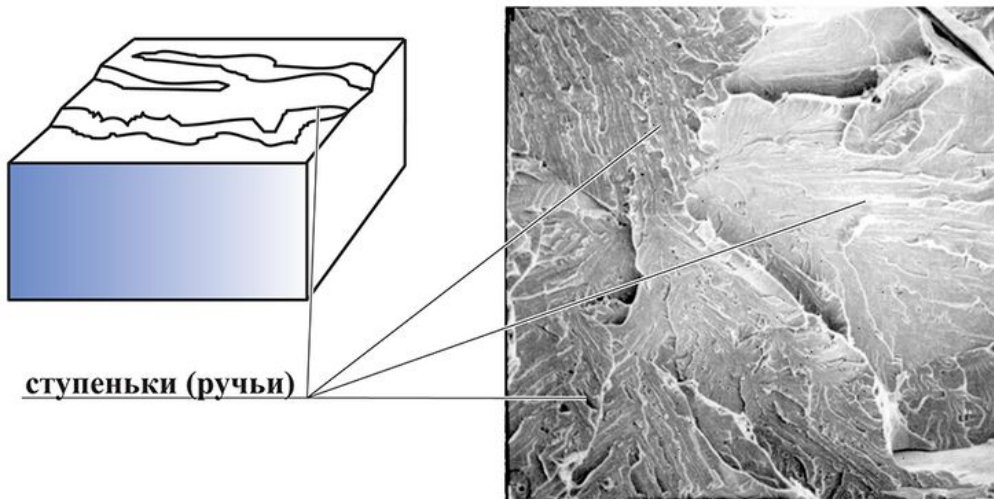
x 400



x 750

Фрактография (исследование изломов)

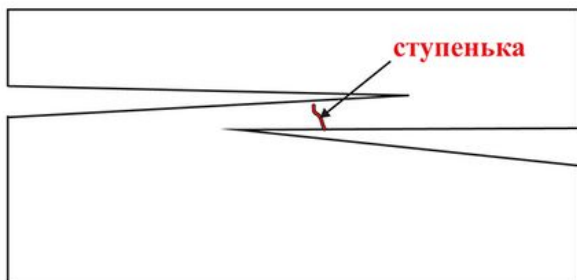
Хрупкое транскристаллитное разрушение (скол)



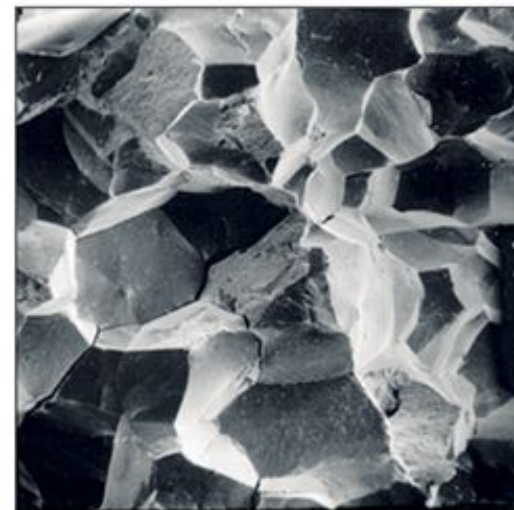
ступеньки (ручьи)

x 300

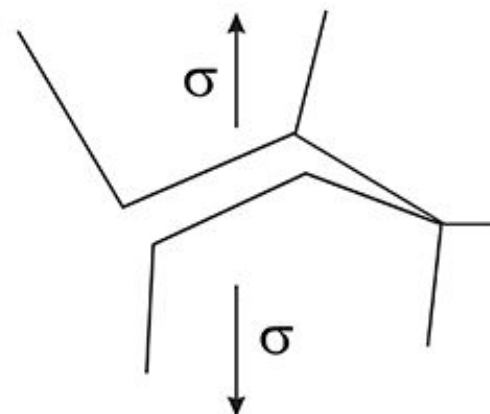
Образование ступенек



Хрупкое интеркристаллитное разрушение



x 300

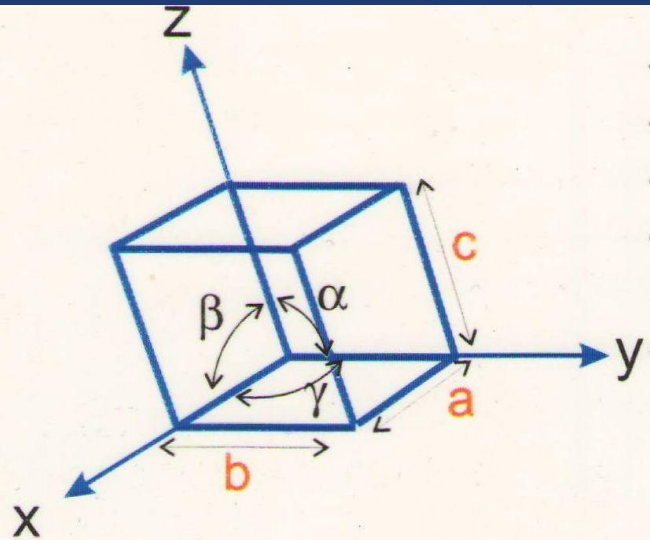


Уровни структуры металлических материалов

Уровень структуры	Метод исследования	Увеличение	Разрешающая способность d , нм	
Макроструктура	Макроанализ	до $\times 100$		
Микроструктура	Оптическая микроскопия	$\times 100-2000$	до 200	
	Электронная микроскопия	$\times 2000-50000$	200 - 0,5	
Тонкая структура	Дифракционные методы	более $\times 50000$	$\sim 0,1$	

Кристаллическая решётка

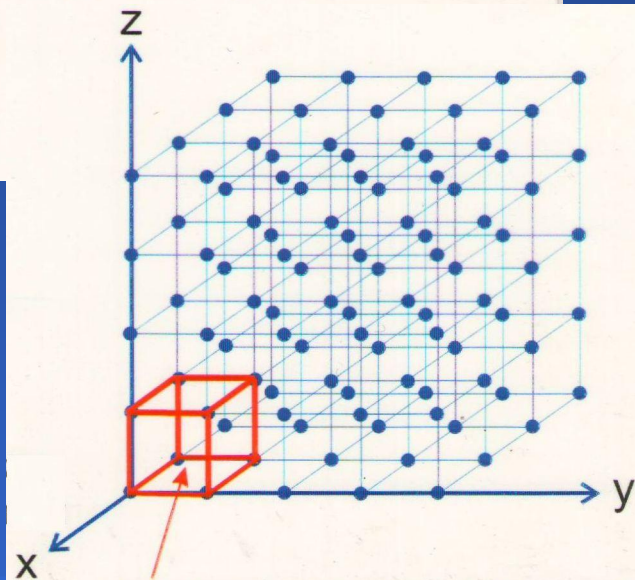
Это совокупность воображаемых линий и плоскостей, проходящих через центры наиболее вероятного расположения частиц вещества в пространстве.



- углы между осями α, β, γ ;
- периоды решетки a, b, c ;
- число атомов, приходящееся на ячейку n ;
- координационное число k , равное числу ближайших равноудаленных частиц;
- коэффициент компактности K , равный доле объема ячейки, занятой частицами:

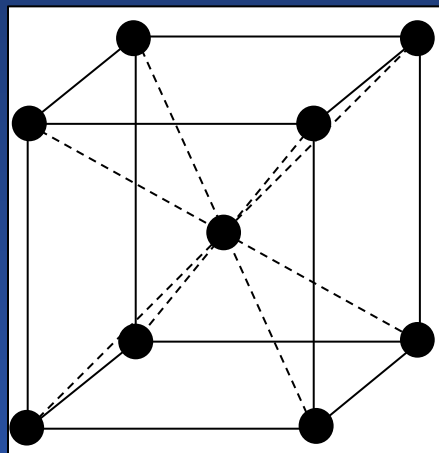
$$K = \frac{n \cdot 4/3 \pi R^3}{V_{\text{яч.}}}$$

Элементарная ячейка – наименьший объём, трансляцией которого можно построить весь кристалл целиком

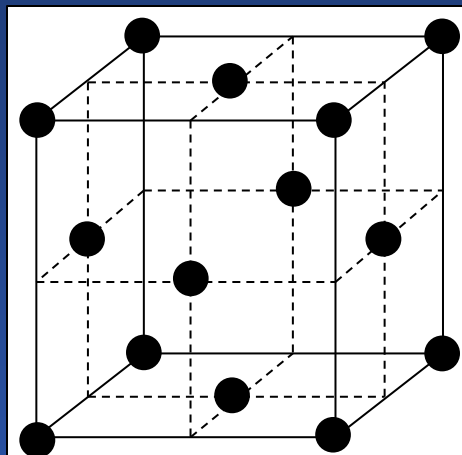


элементарная кристаллическая ячейка

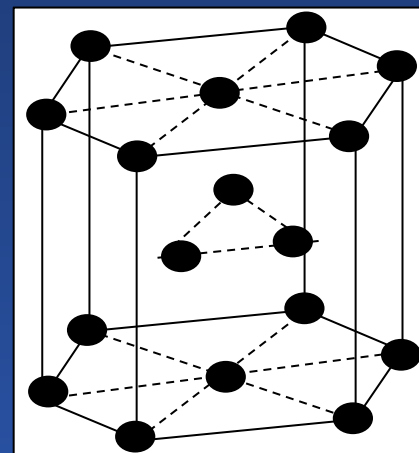
Атомно-кристаллическое строение металлов



ОЦК



ГЦК

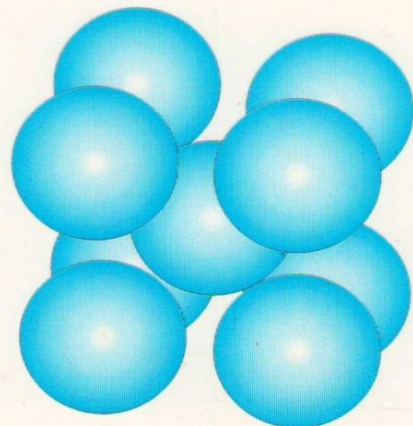
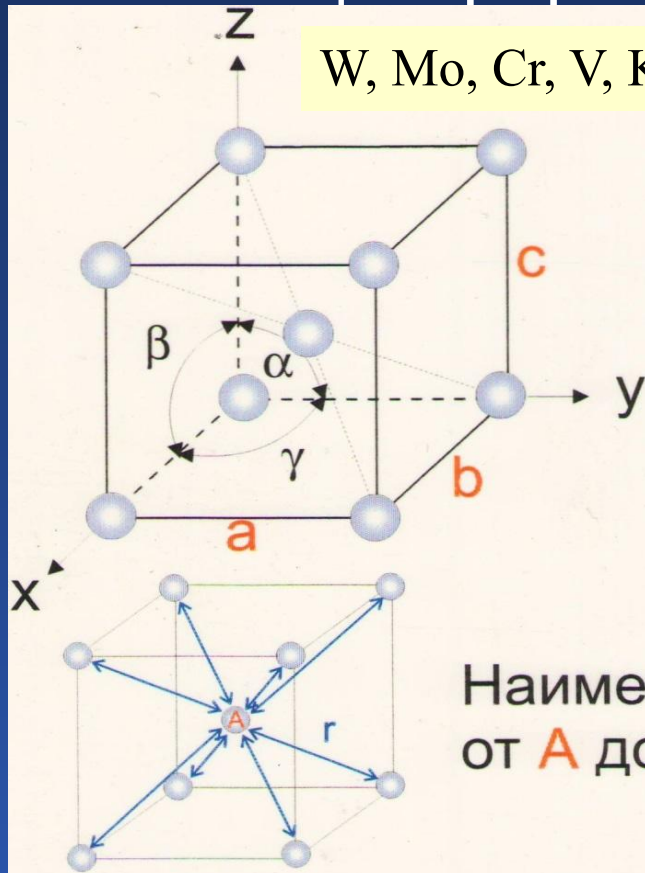


ГП

ОЦК – объемно-центрированная кубическая;
ГЦК – гранецентрированная кубическая;
ГП – гексагональная плотноупакованная;

Объёмноцентрированная кубическая решётка

W, Mo, Cr, V, K, Na, Li, β -Ti, α -Fe, Ta



Наименьшее расстояние r от **A** до соседних атомов.

Характеристики решетки ОЦК :

Углы между осями

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Период решетки

$$a = b = c$$

Число атомов на ячейку

$$n = 2$$

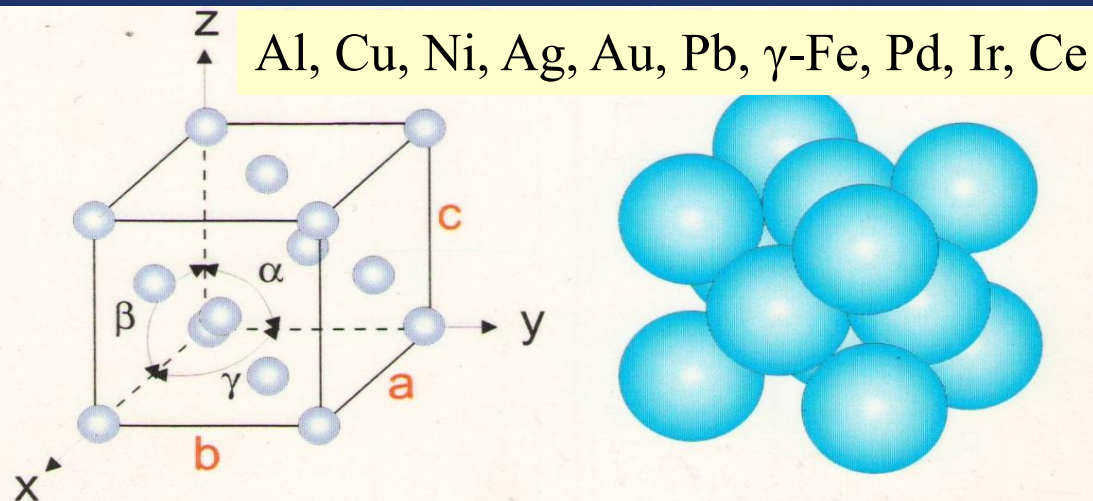
Координационное число

$$k = 8$$

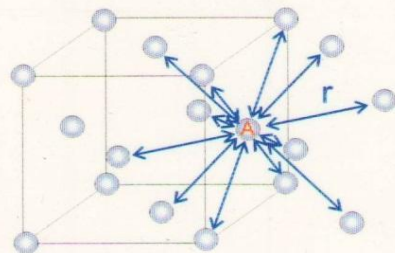
Коэффициент компактности

$$K = 0,68$$

Гранецентрированная кубическая решётка



Наименьшее расстояние r от **A** до соседних атомов



Характеристики решетки ГЦК :

Углы между осями

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Период решетки

$$a = b = c$$

Число атомов на ячейку

$$n = 4$$

Координационное число

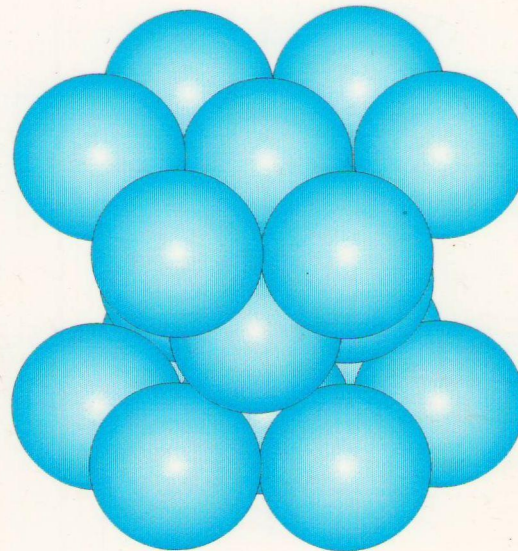
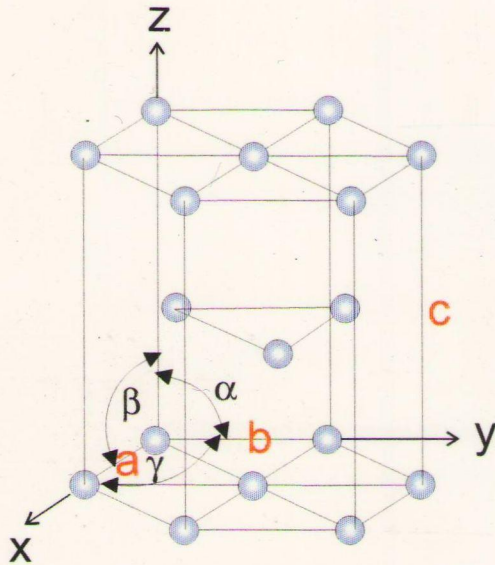
$$k = 12$$

Коэффициент компактности

$$K = 0,74$$

Гексагональная плотноупакованная решётка

Mg, Zn, α -Ti, Cd, Be, α -Zr, Os



Характеристики решетки ГП :

Углы между осями

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$

Период решетки

$$a = b \quad c/a = 1,633$$

Число атомов на ячейку

$$n = 6$$

Координационное число

$$k = 12$$

Коэффициент компактности

$$K = 0,74$$

Дефекты кристаллической решётки

Три причины отсутствия идеальных кристаллов:

- Атомы вещества находятся в непрерывном тепловом колебательном движении;
- Нет идеально чистых веществ;
- У монокристаллов имеется поверхность, у поликристаллов – границы зёрен.

Дефекты решётки классифицируют по размерному признаку:

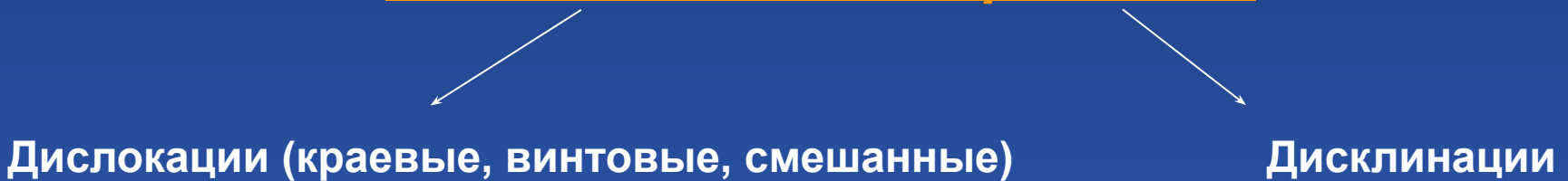
- Точечные (нульмерные);
- Линейные (одномерные);
- Поверхностные (двумерные).

Дефекты кристаллической решётки:

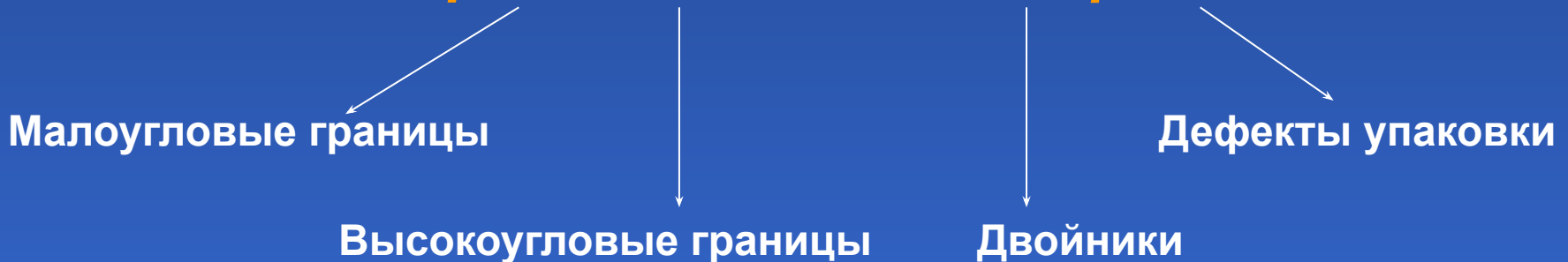
Точечные дефекты



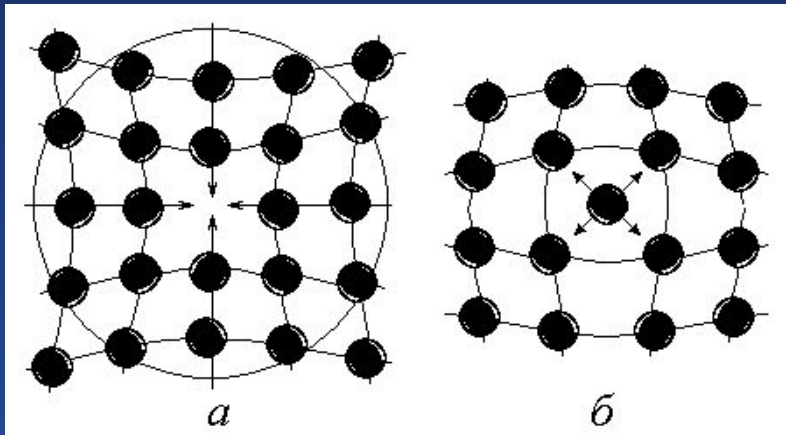
Линейные дефекты



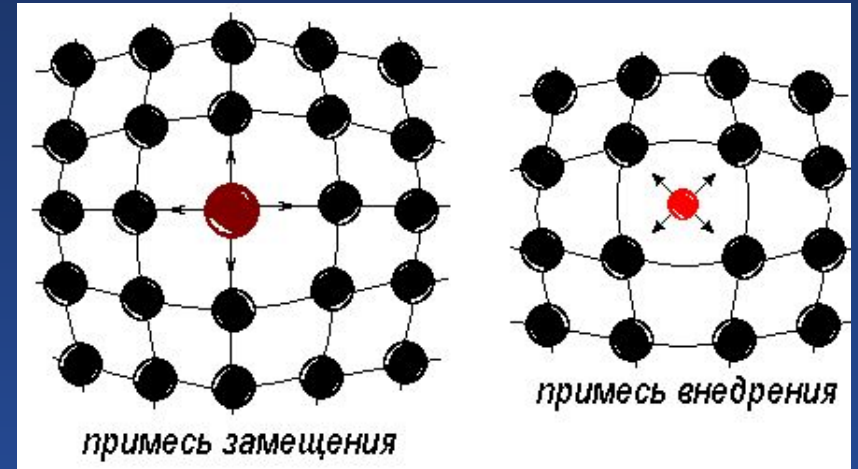
Поверхностные дефекты



Точечные дефекты



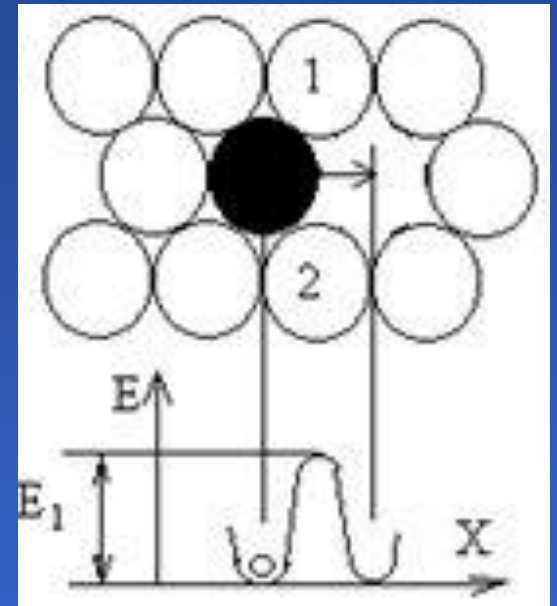
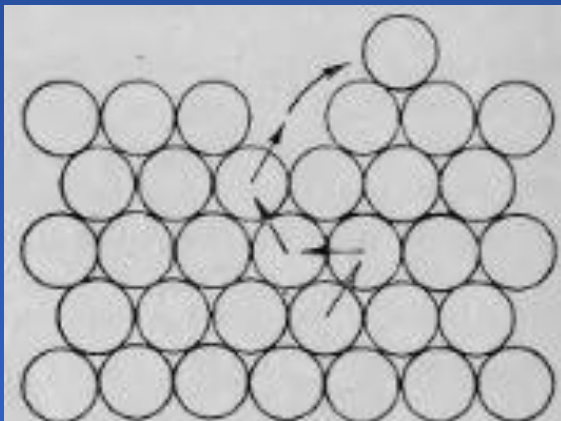
а) вакансия; б) межузельный атом



примесь замещения

примесь внедрения

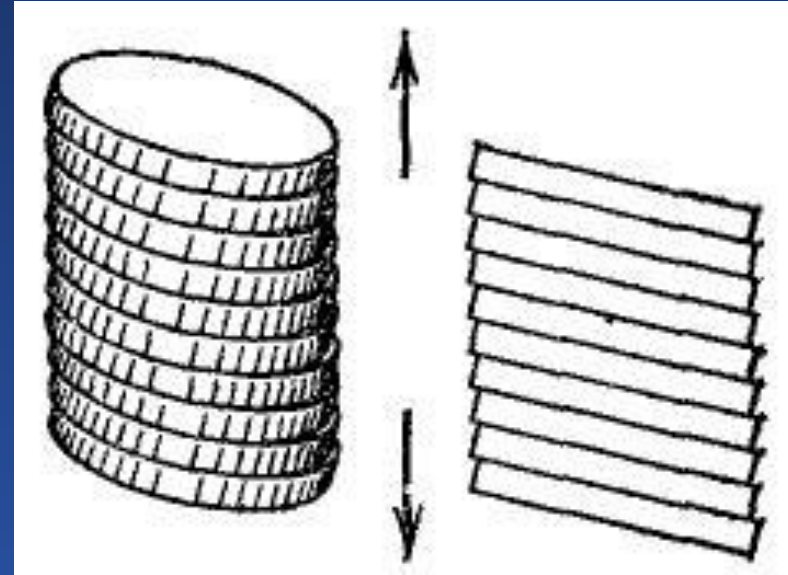
Вакансии по Шоттки



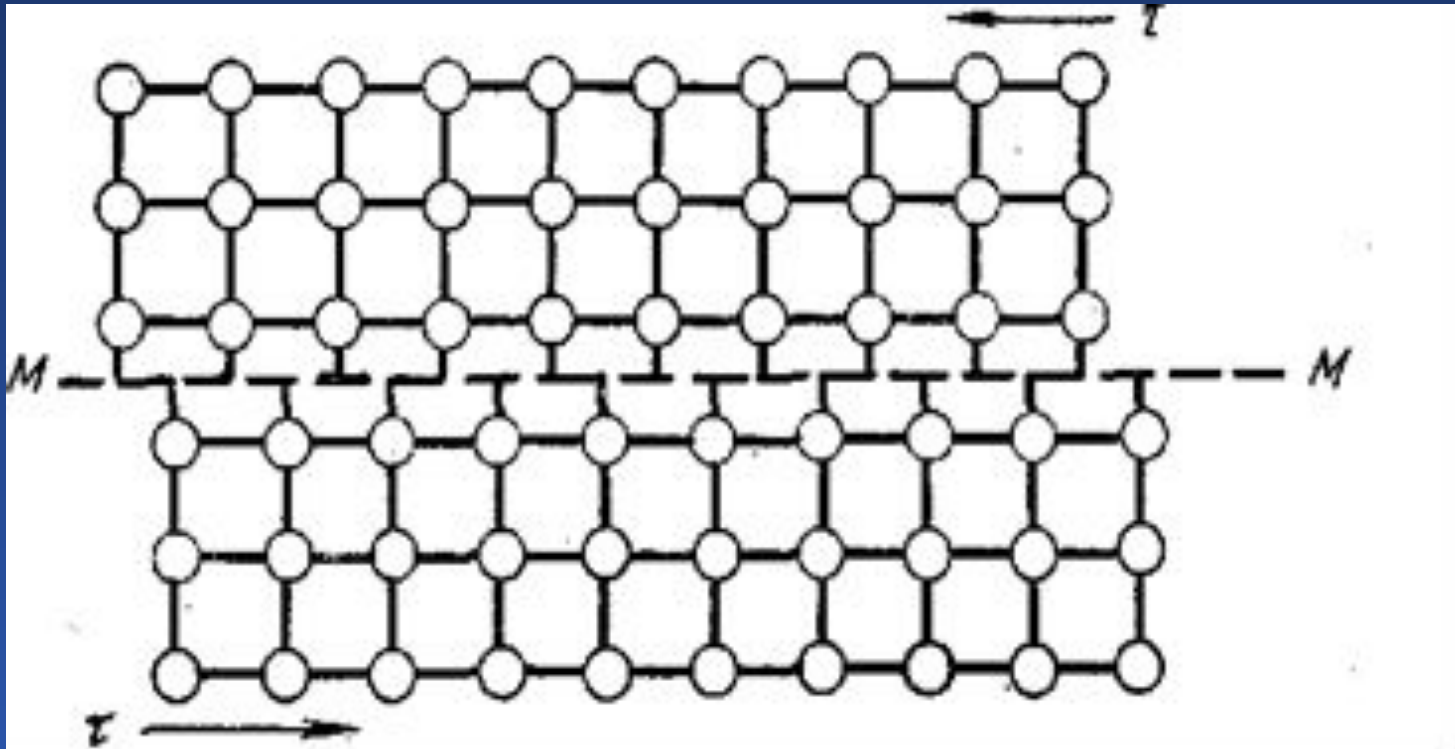
Линейные дефекты

Предпосылки:

1. Сохранение в процессе пластической деформации кристаллической решётки.
2. Деформация распространяется по определённым плоскостям.
3. Расхождение значение теоретической и реальной прочности кристаллов.

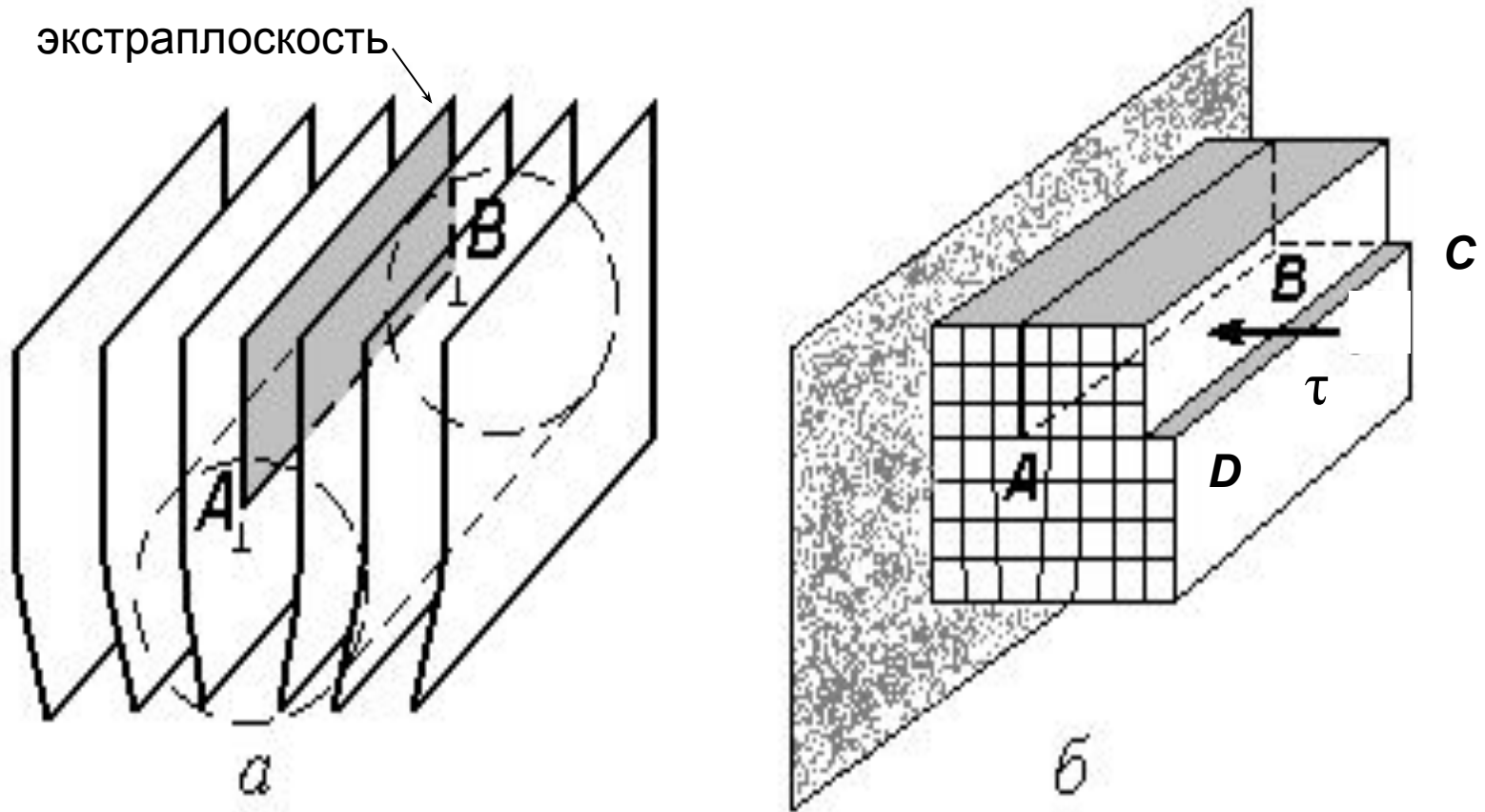


Модель трансляционного сдвига



$$\tau_{\text{кр}} \approx \frac{G}{2\pi}$$

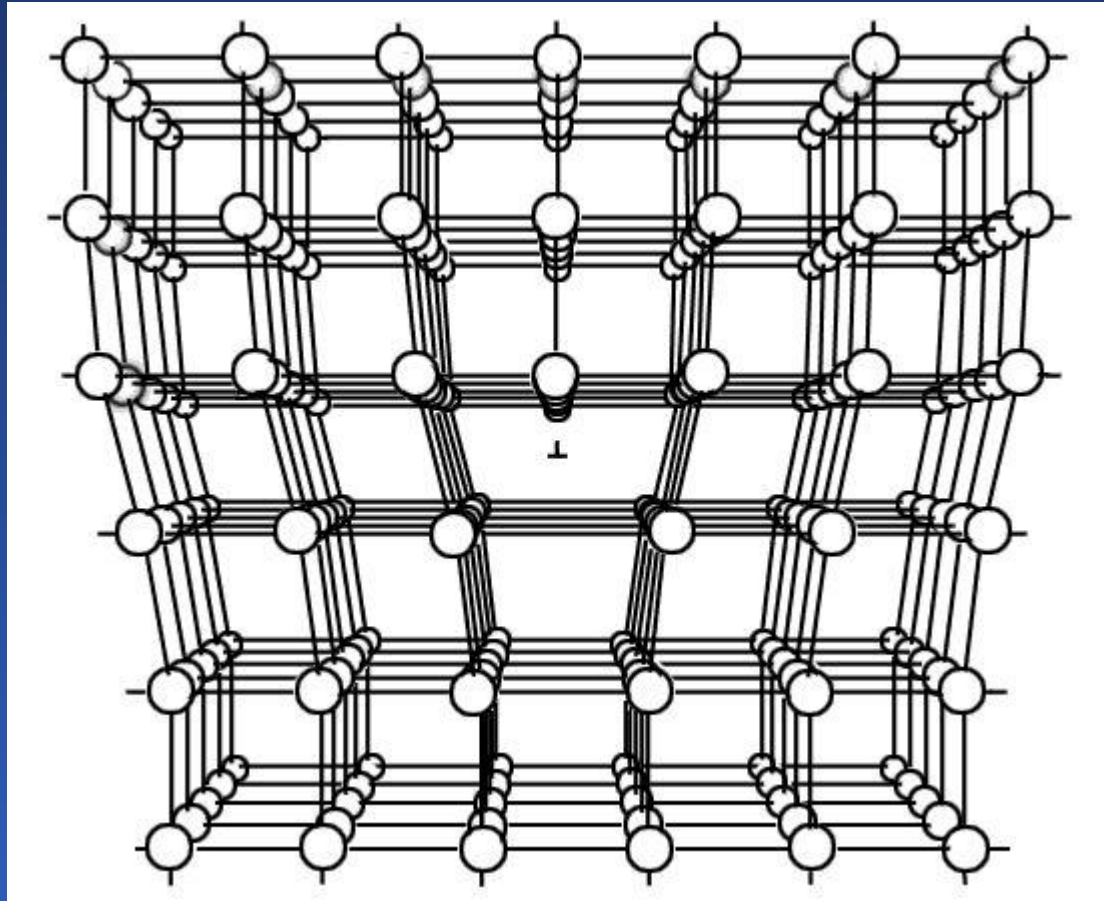
Краевая дислокация



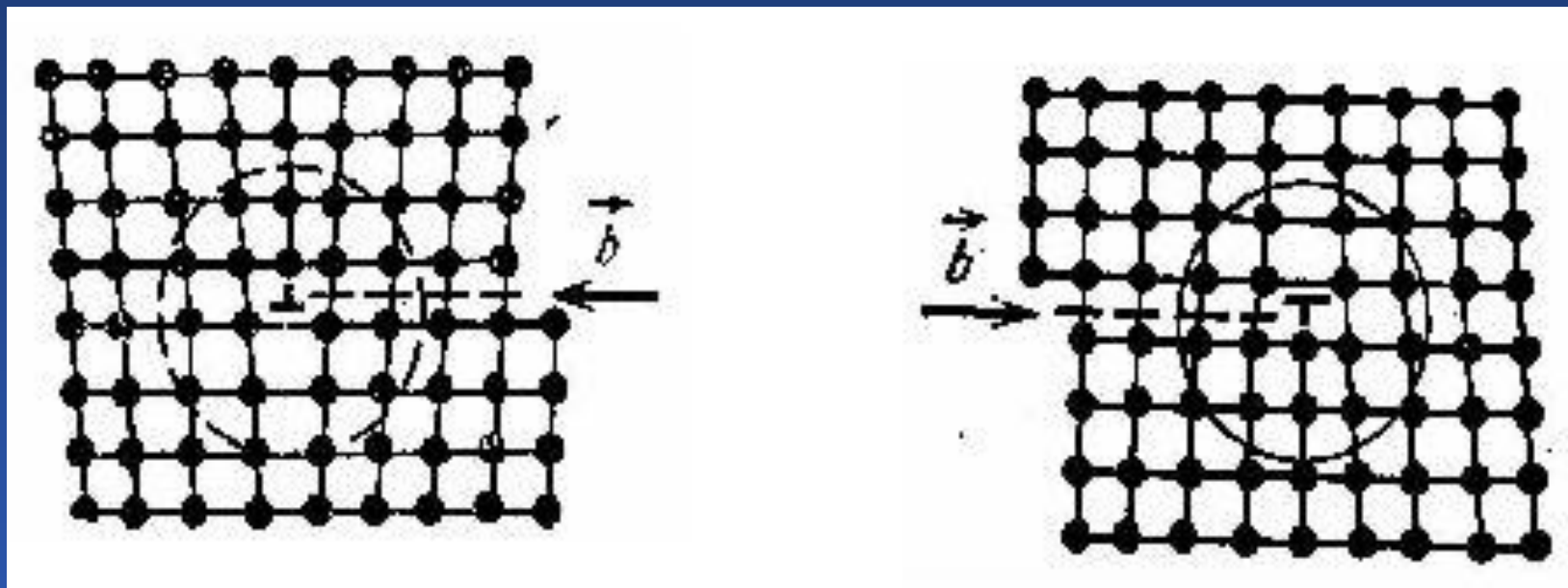
Краевая дислокация (а) и возникновение дислокации при сдвиге (б)

Краевая дислокация – область несовершенств вокруг края экстраплоскости

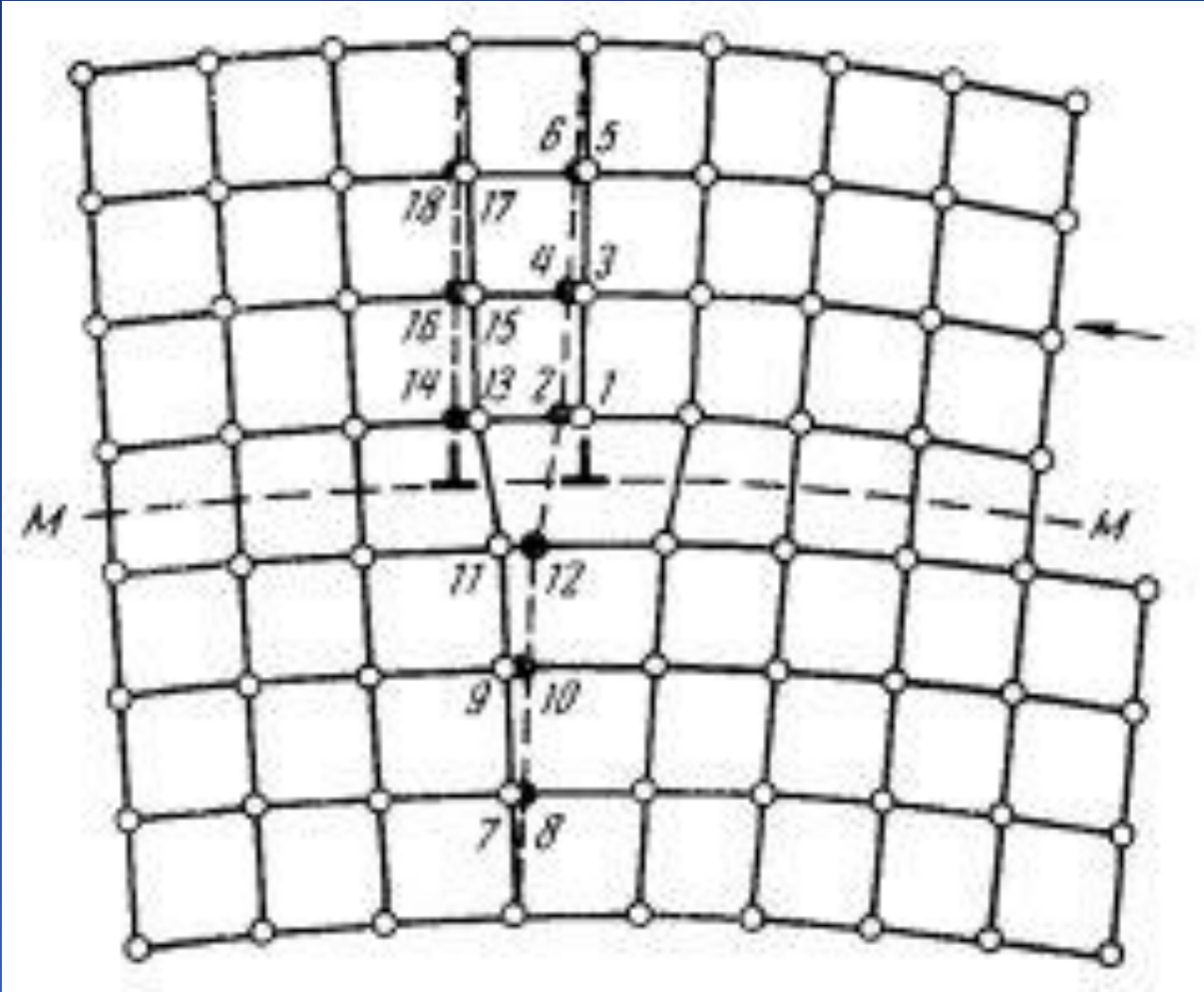
Краевая дислокация



Положительные и отрицательные дислокации



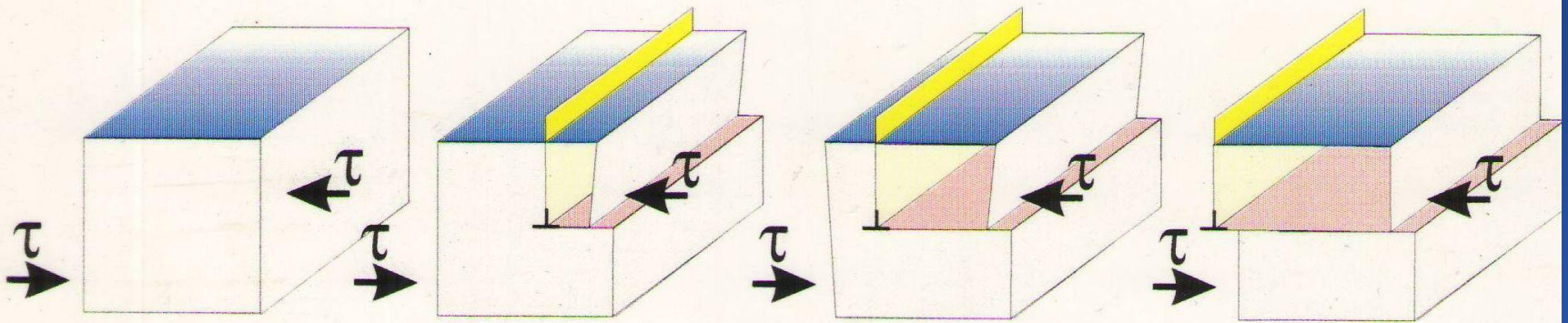
Модель скольжения краевой дислокации



Механизм пластической деформации

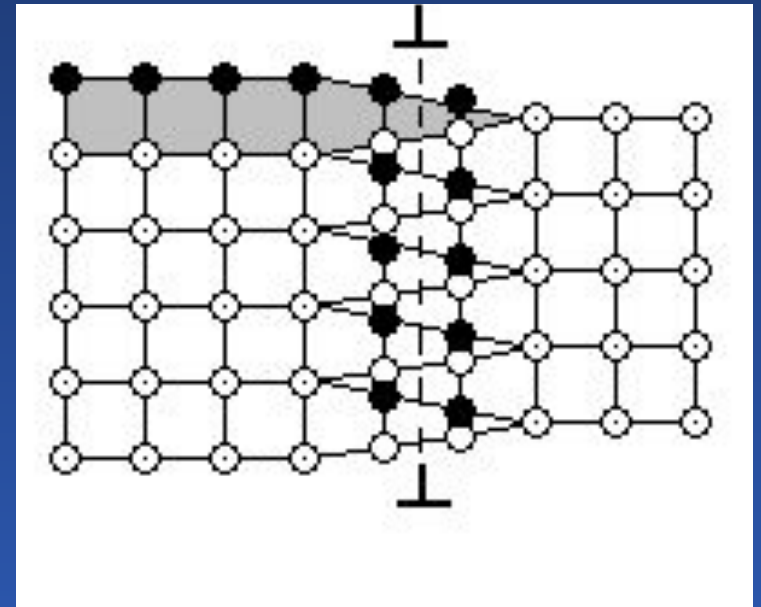
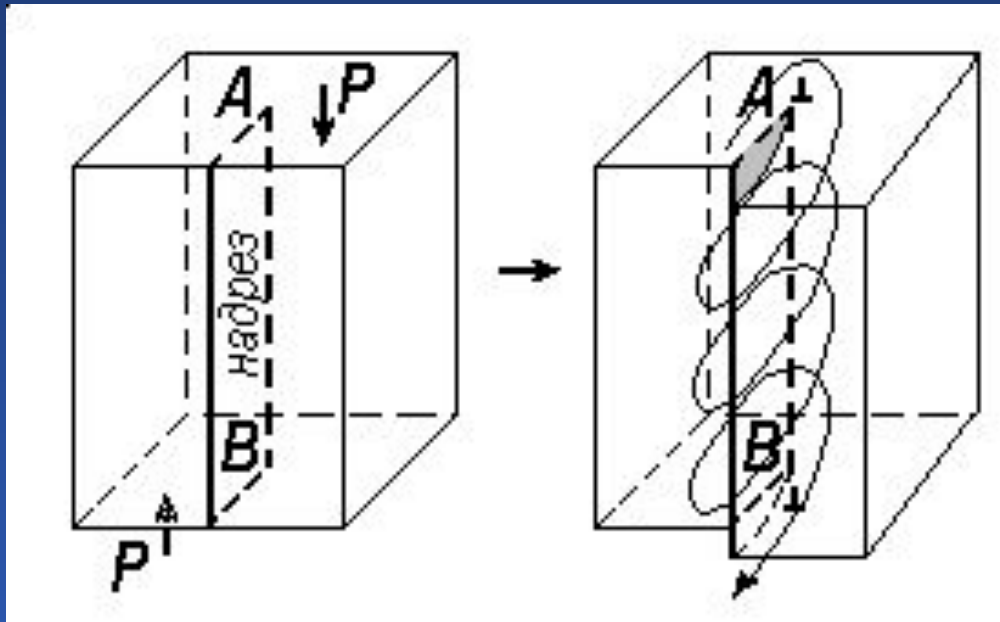
Основным механизмом пластической деформации является скольжение

Схема скольжения краевой дислокации

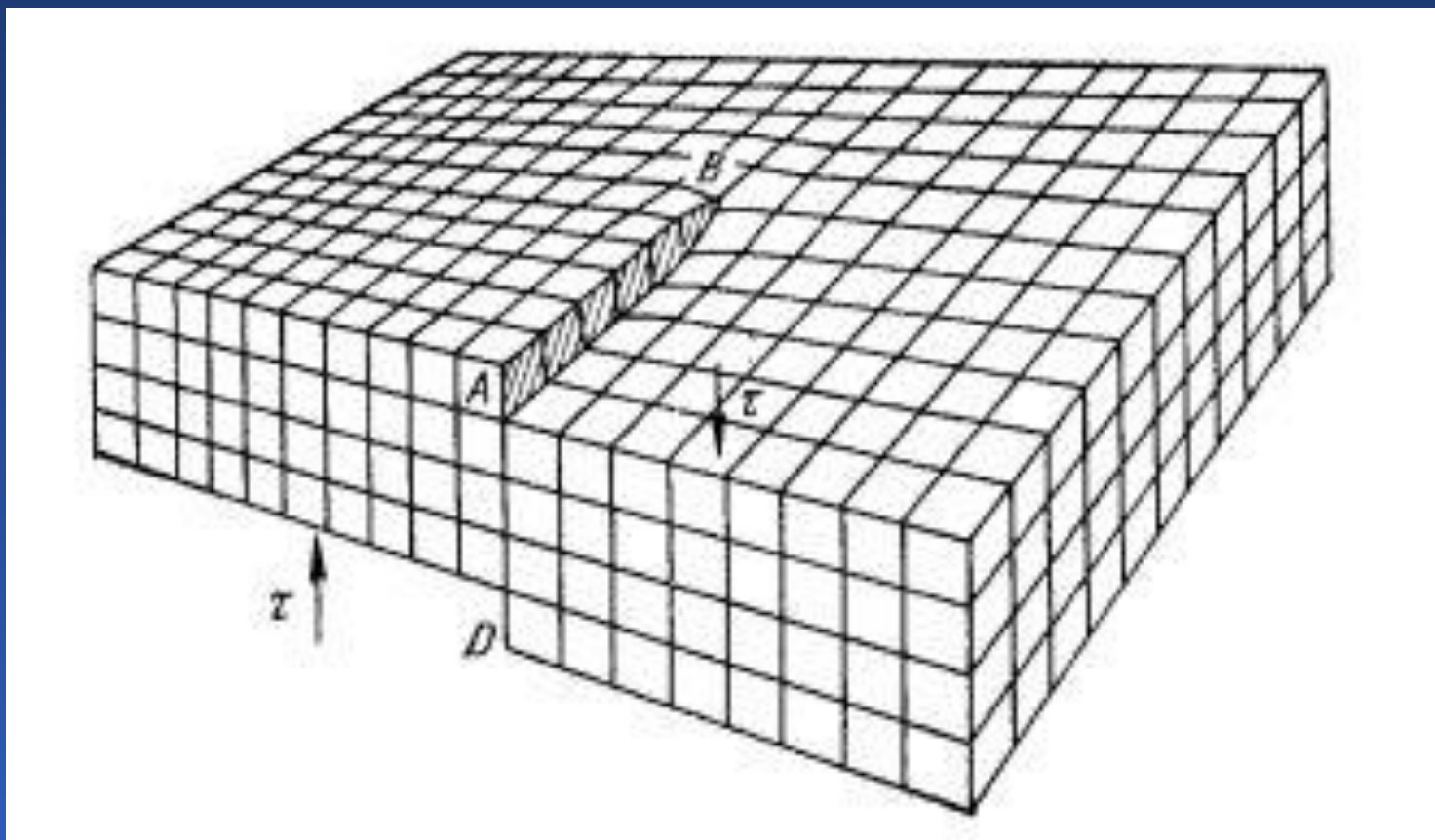


Винтовая дислокация

Винтовая дислокация была открыта в 1939г. Бюргерсом



Винтовая дислокация



Плотность дислокаций

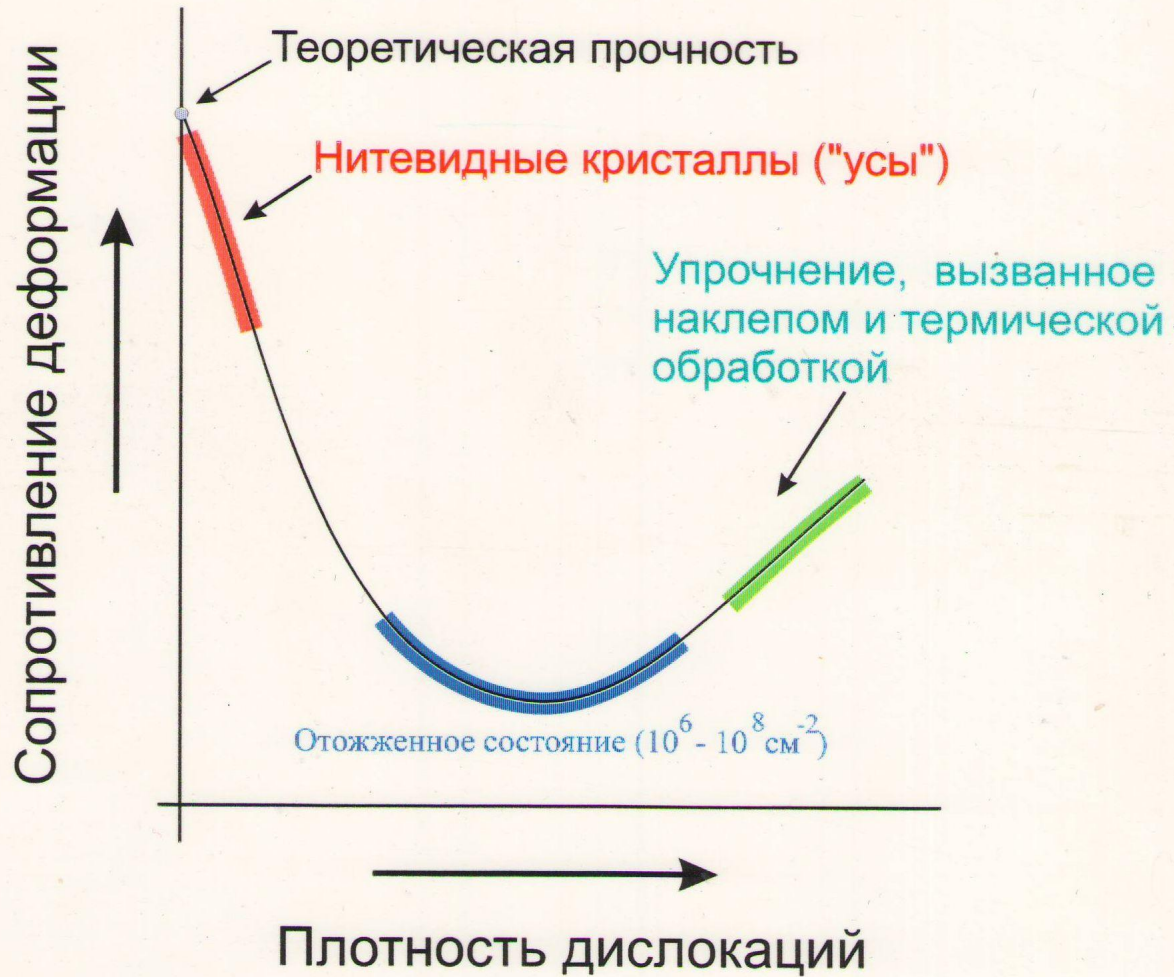
Количество дислокаций в кристалле оценивается их плотностью.

$$\rho = \frac{L}{V} [\text{см}^{-2}]$$

Выращенный массивный монокристалл высокой чистоты	$<10^3$
Отожженный обычный монокристалл	$10^4—10^6$
Отожженный поликристалл	$10^7—10^8$
Металл после сильной холодной деформации	$10^{11}—10^{12}$

В монокристаллических усах дислокации или совсем отсутствуют, или же в одном монокристалле находится только одна дислокация.

Пути повышения прочности металлов

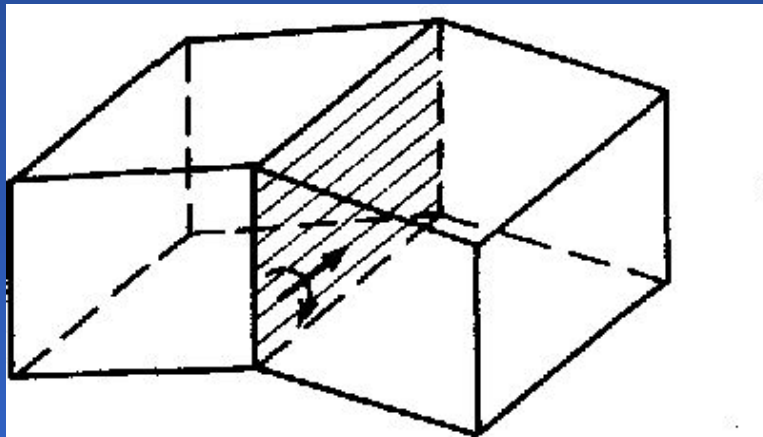


Границы зерен

Граница зерна – это не «стена» из чего-то между соседними зернами и не пустота между ними. Это область, где нарушается строго упорядоченное строение металла: атомные плоскости в одном зерне не имеют продолжения в соседнем, там атомные плоскости расположены в другом направлении.

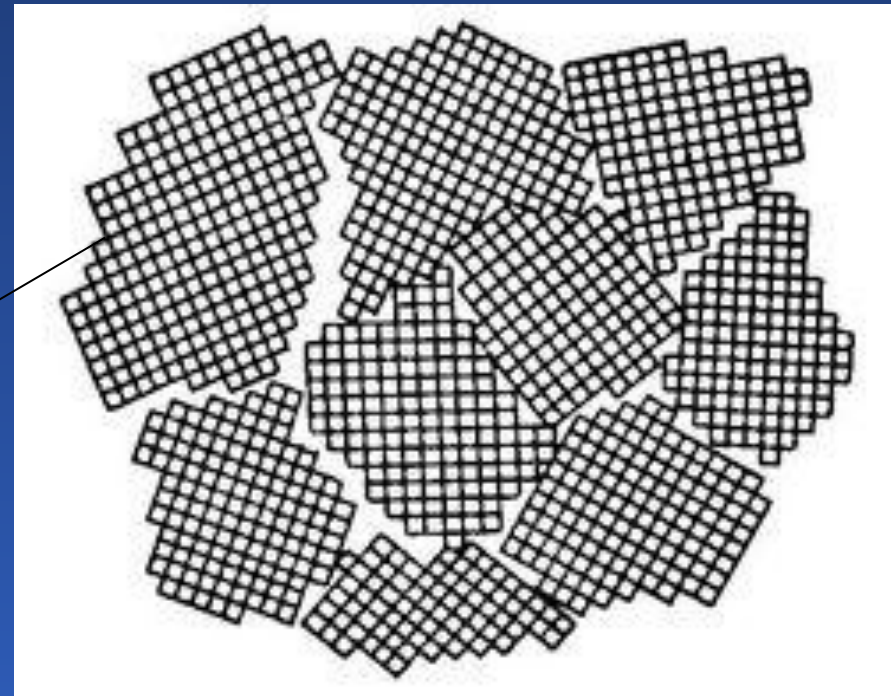
Границы зерен – не линии, хотя именно так мы видим их на отполированной и протравленной поверхности металла. Это поверхности раздела между зернами, представляющими собой неправильные многогранники. Каждое зерно как бы «завернуто» в свою границу.

Границей зерен называют поверхность, по обе стороны от которой кристаллические решетки различаются пространственной ориентацией. Эта поверхность является двумерным дефектом, имеющим макроскопические размеры в двух измерениях и атомные — в третьем измерении.

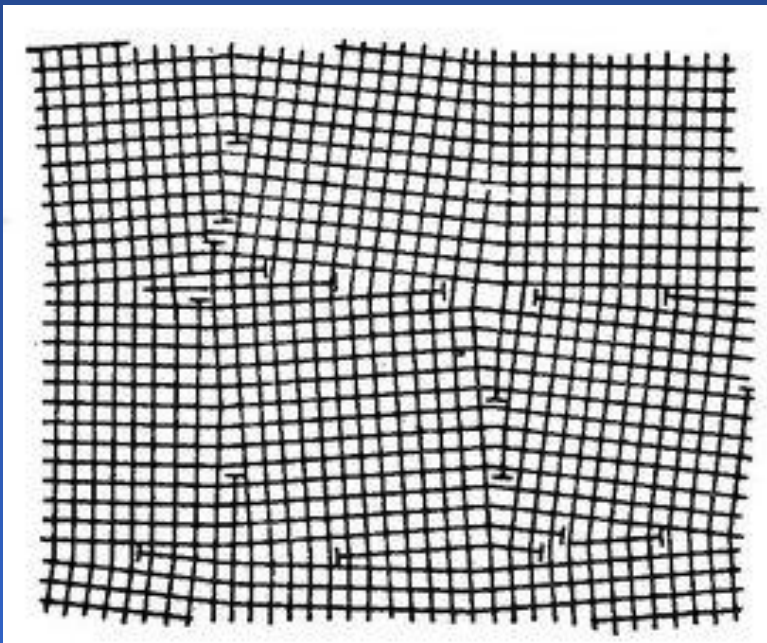


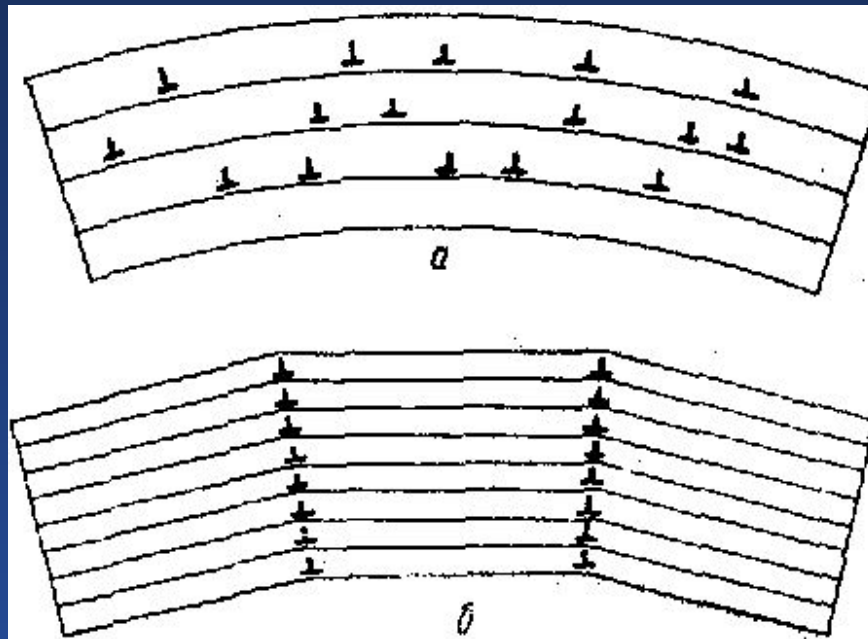
Границы с разориентацией соседних зерен менее $\sim 7^\circ$ относят к **малоугловым**, а с большей разориентацией – к **высокоугловым**.

Зёрна



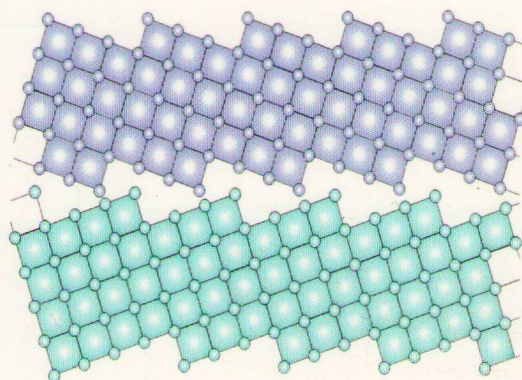
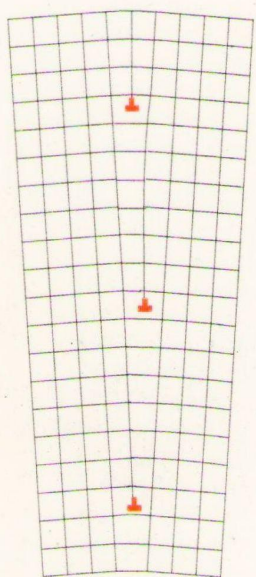
Блоки или субзёрна



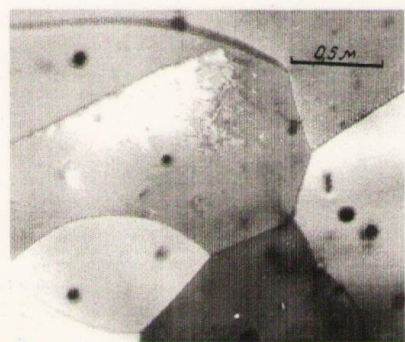


Малоугловые границы возникают при росте кристаллов из расплава, при пластической деформации и при дорекристаллизационном отжиге после холодной деформации. Образование стенок дислокаций, приводящее к подразделению кристалла на субзерна – полигоны (многоугольники), было названо **полигонизацией**

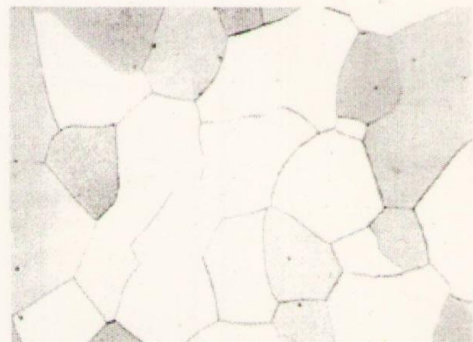
Малоугловые и высокоугловые границы



Границы зерен и субзерен являются препятствиями для развития деформации, а значит – упрочняют металл. Чем больше поверхность границ в единице объема, тем прочнее металл. Понятно, что в мелкозернистом металле площадь поверхности границ больше, чем в крупнозернистом. Поэтому мелкозернистый металл обладает более высокими механическими свойствами по сравнению с крупнозернистым.



x 20000

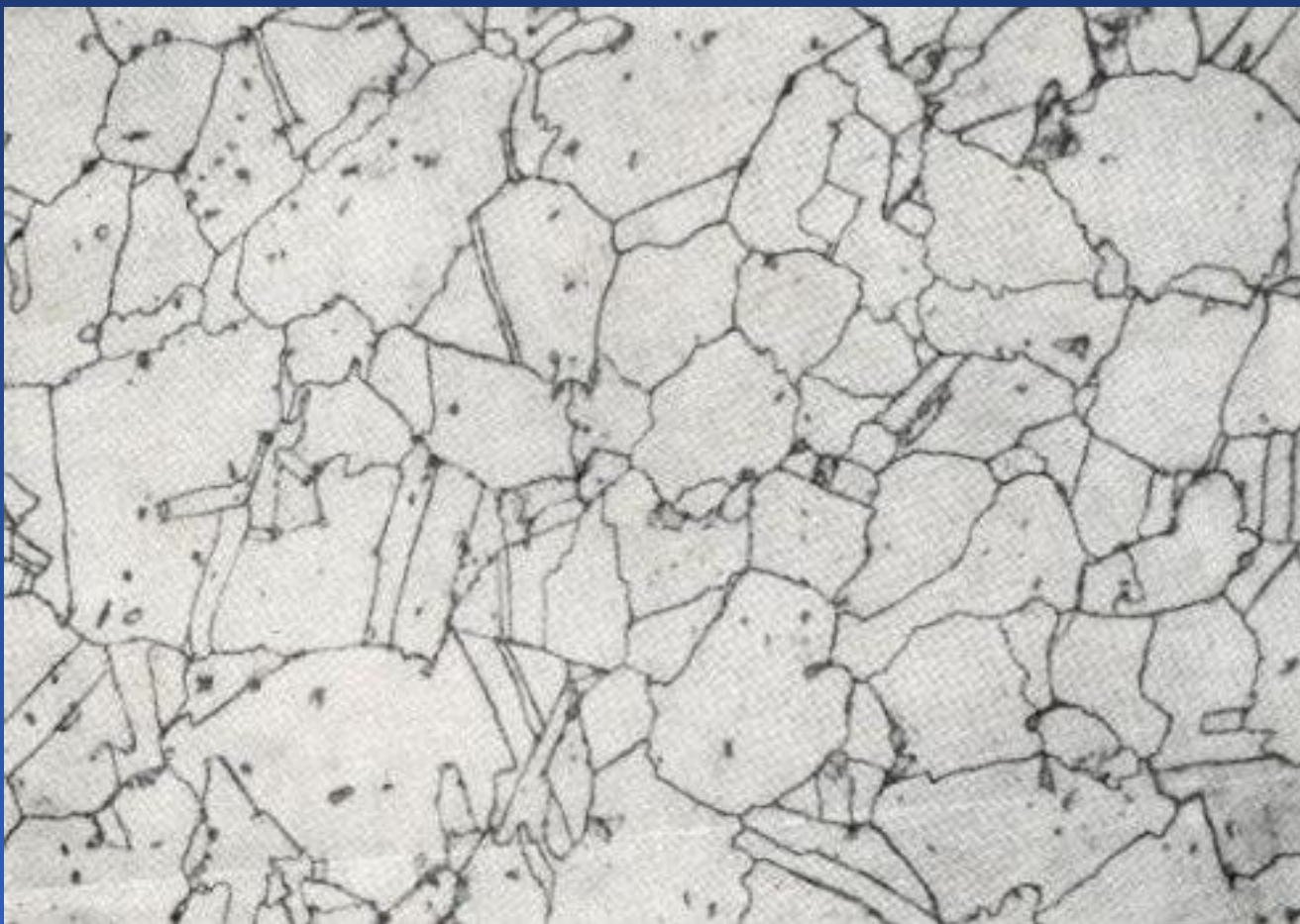


x 250

Малоугловые и большеугловые границы в Fe_{α}

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

Микроструктура аустенитных зёрен с двойниками



Кристаллизация

Кристаллизация – процесс образования кристаллов из жидкой фазы (затвердевание металлов и сплавов). Обратный процесс – плавление. Кристаллизация подчиняется общим закономерностям, присущим фазовым превращениям, в том числе протекающим в твёрдом состоянии.

Свободная энергия G – часть полной внутренней энергии вещества, которая может меняться при изменении внешних условий (температуре и давлении).

Самопроизвольно процессы идут только в сторону уменьшения свободной энергии.

Устойчивой при данных температуре и давлении будет фаза с меньшей свободной энергией.

Движущая сила процесса кристаллизации – разность свободных энергий ΔG , возникающая при переохлаждении сплава.

ΔT – степень переохлаждения.

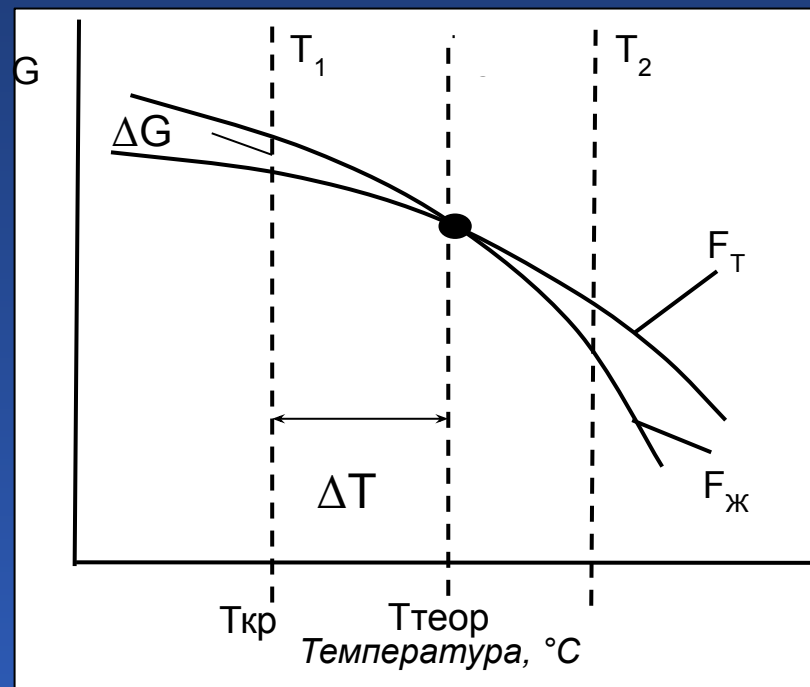
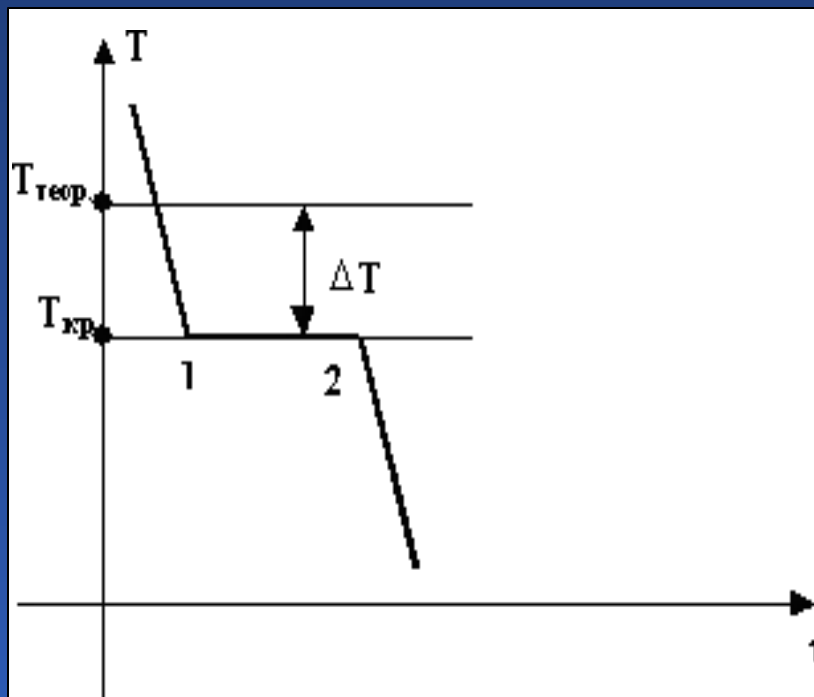
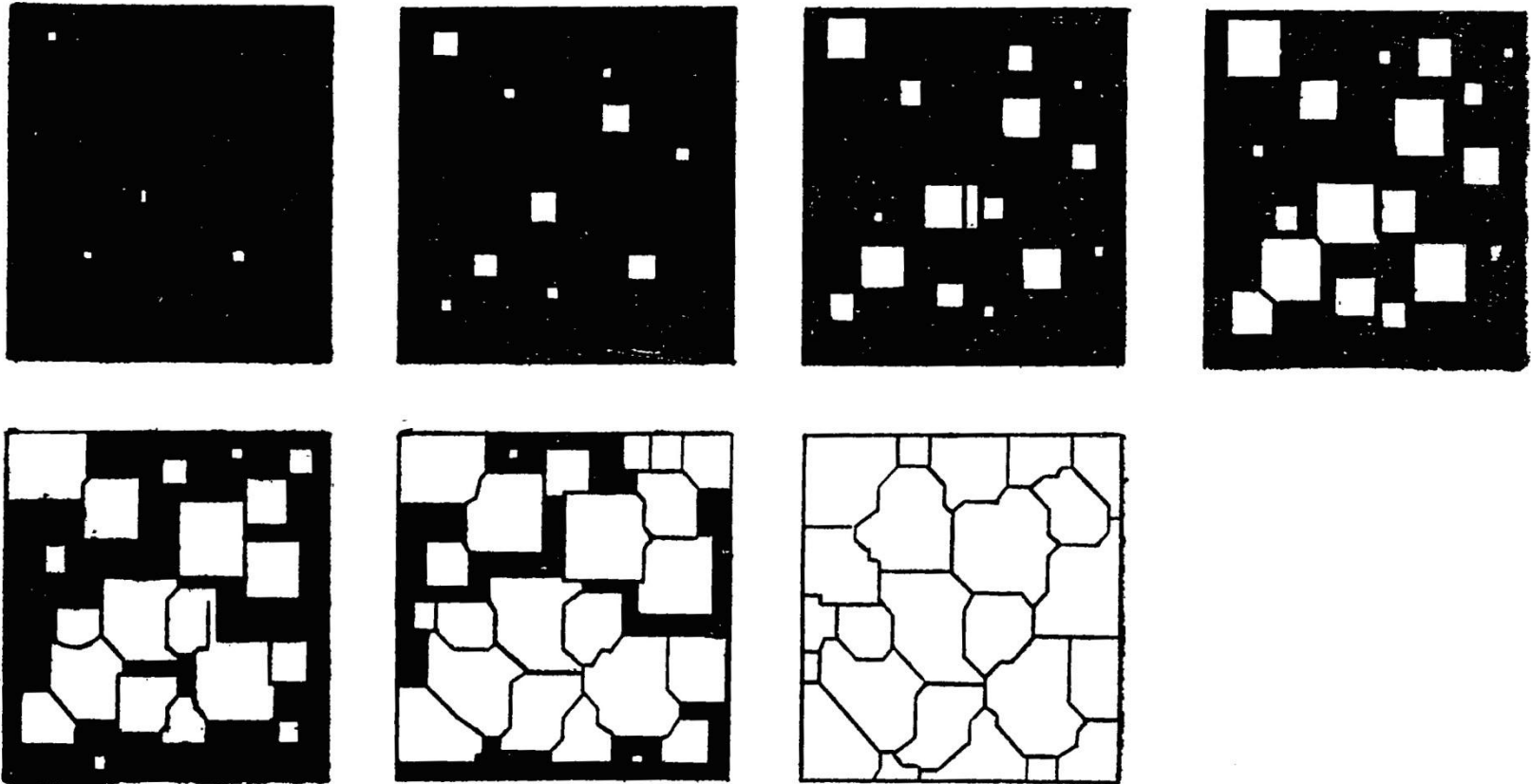
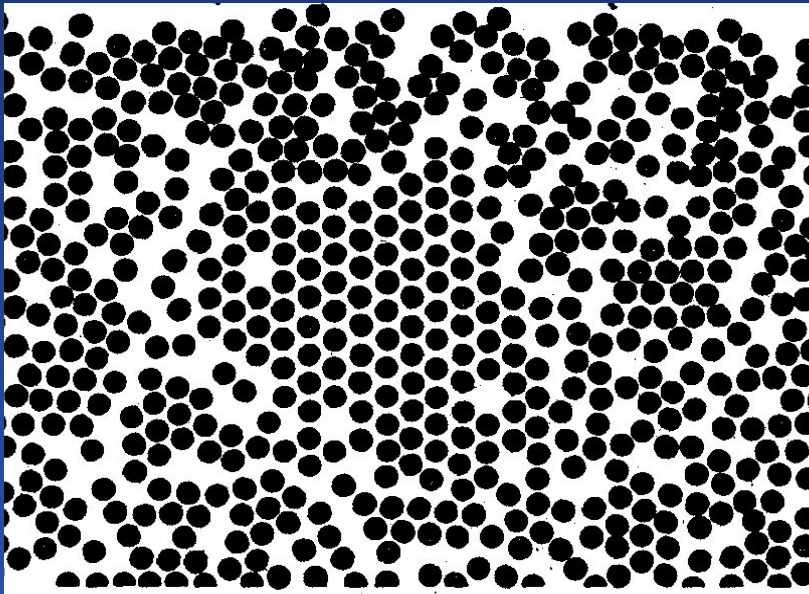


Схема кристаллизации металла

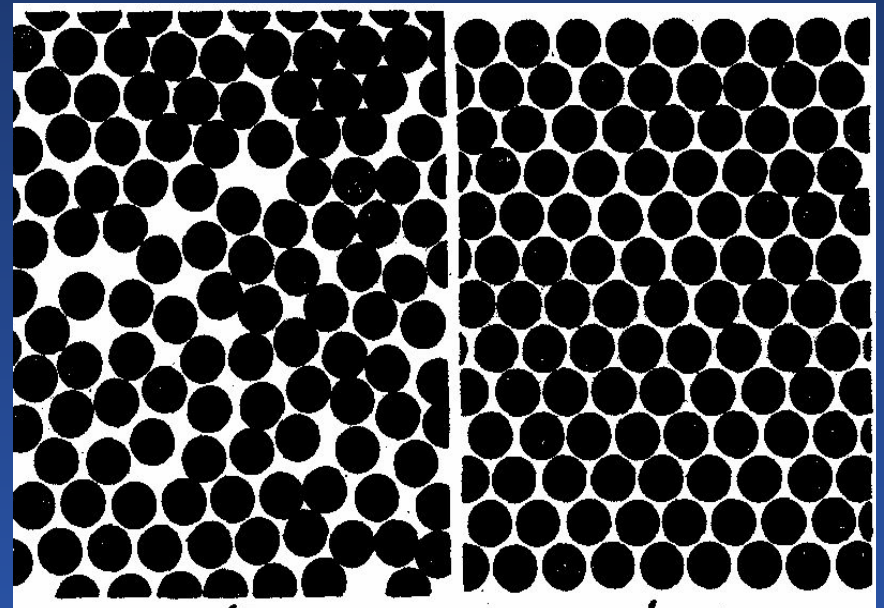
1. Образование центров кристаллизации
2. Рост кристаллов



Модели расположения атомов в фазах



a



б

в

a и *б* – жидкой; *в* – кристаллической

Кривые Таммана

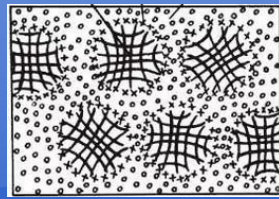
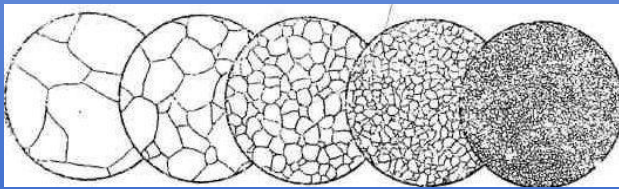
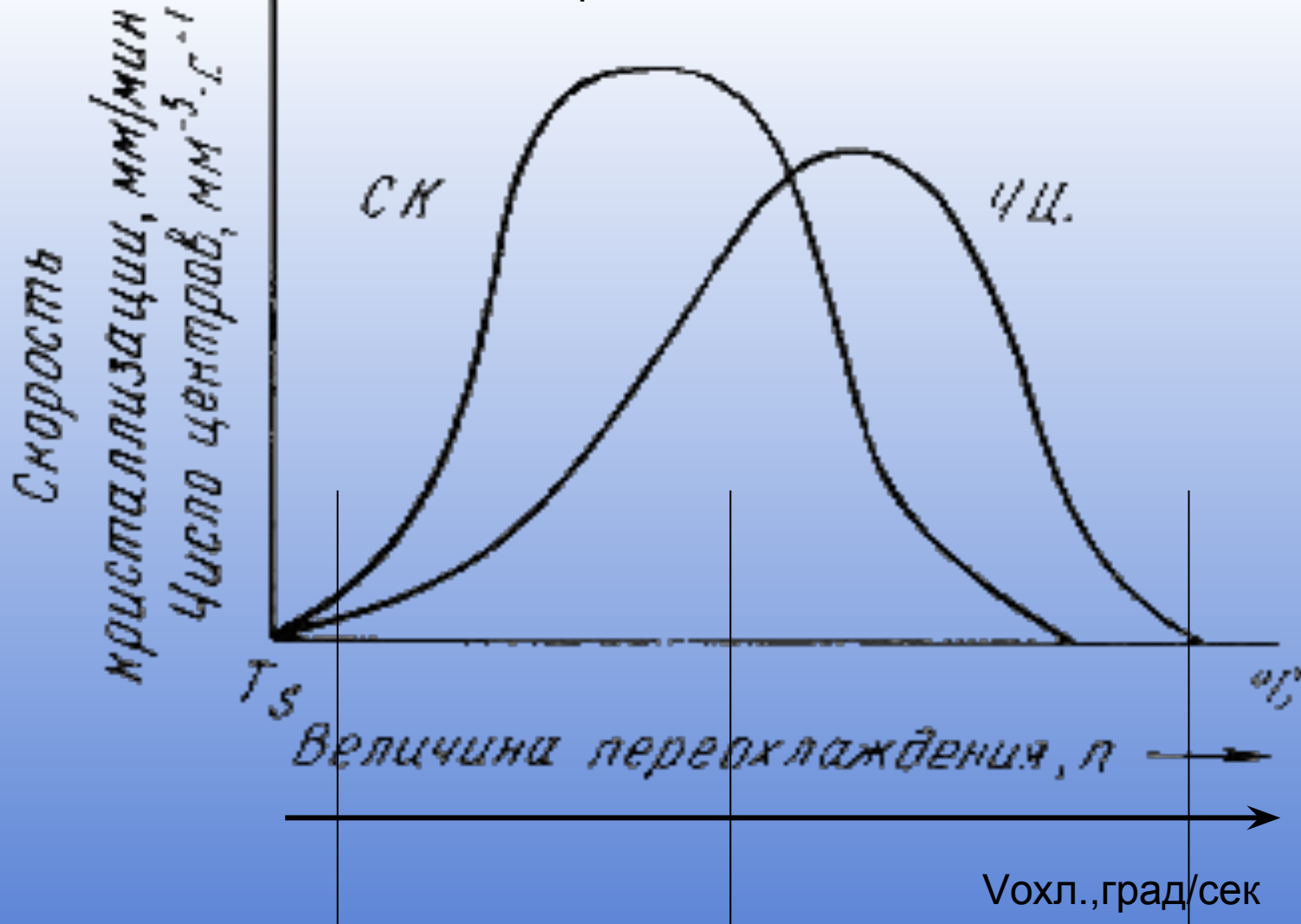
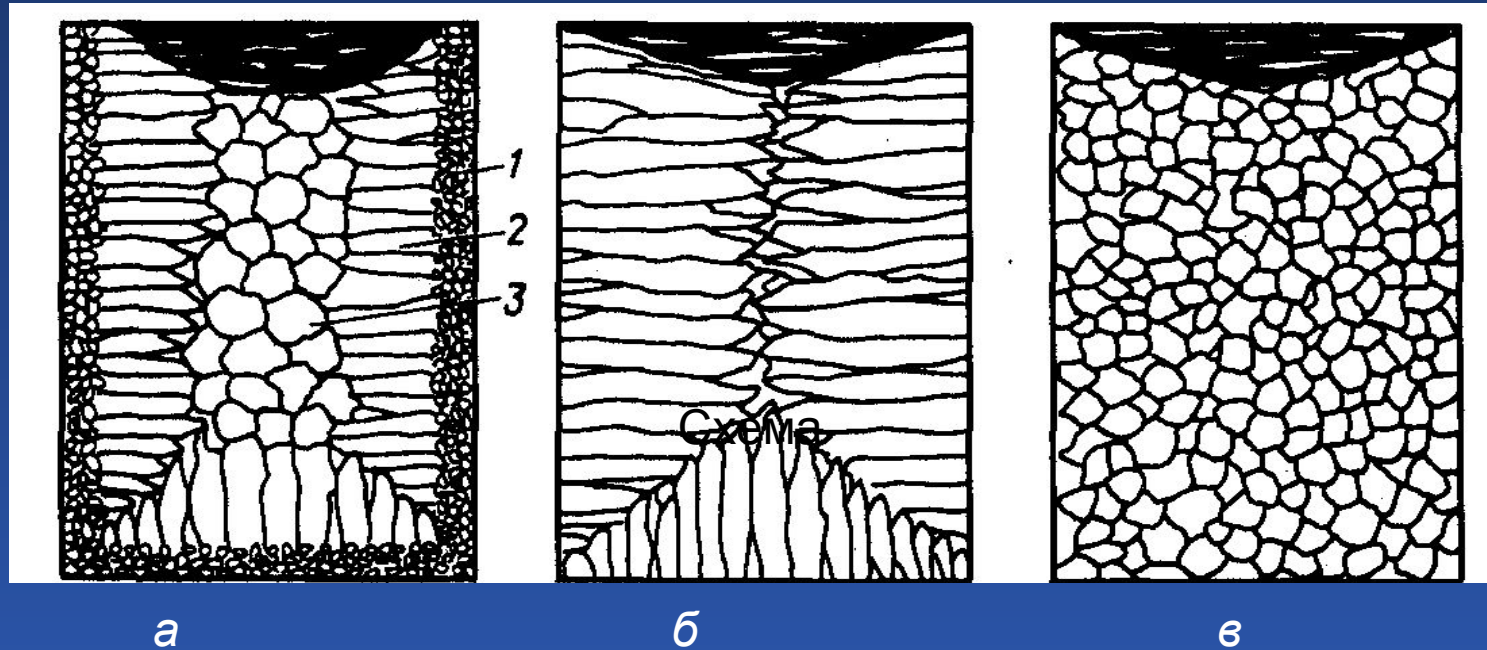


Схема макроструктур слитков



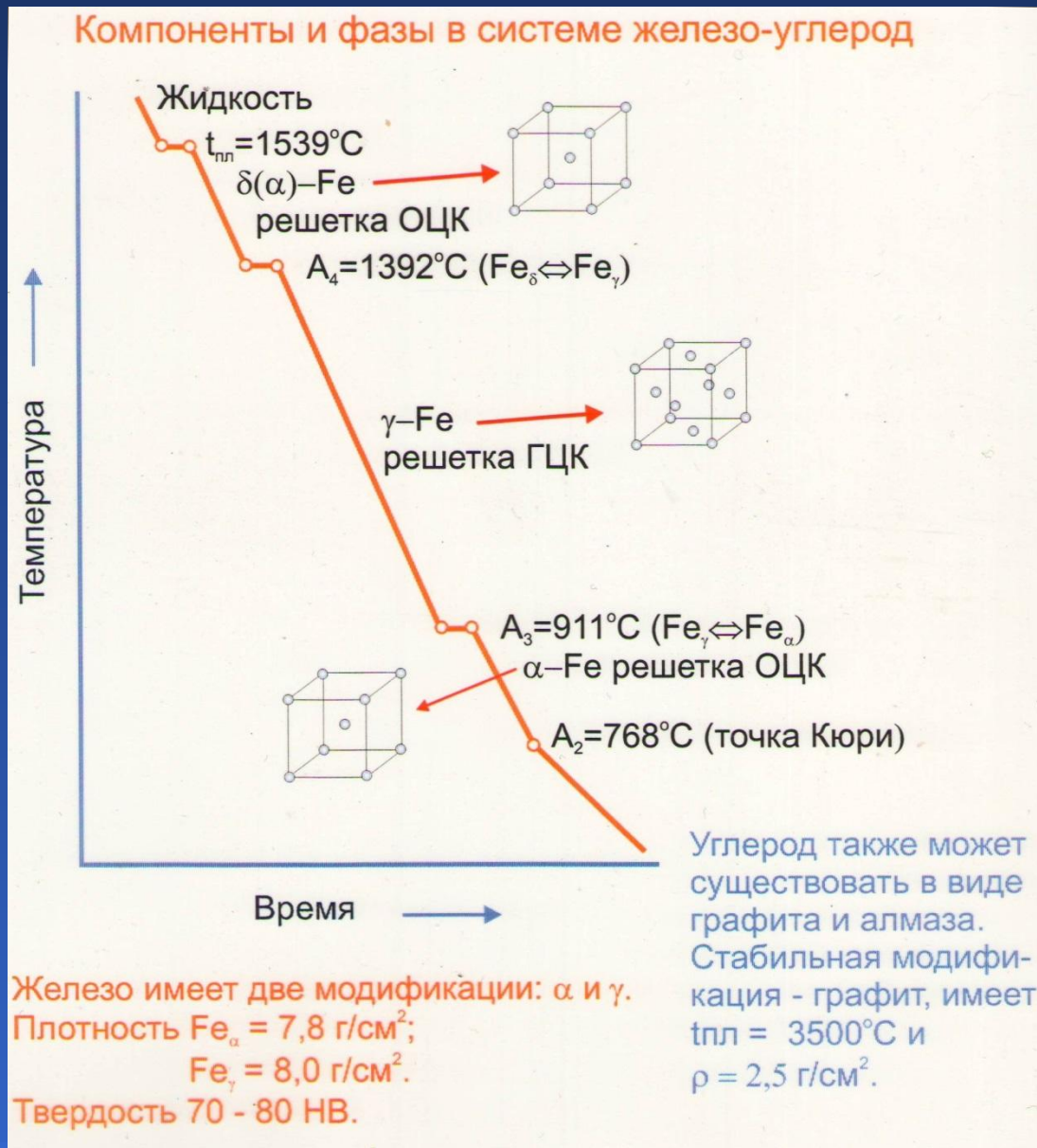
- а – три зоны кристаллов
(1 – мелкие равноосные; 2 – столбчатые; 3 – равноосные);
б – столбчатые кристаллы; в – равноосные кристаллы**

Полиморфизм железа

Полиморфизм – явление существования одного химического элемента в разных кристаллических модификациях.

Устойчивость той или иной кристаллической формы при данных внешних условиях определяется величиной свободной энергии модификации.

Полиморфизм обнаружен для 37 химических элементов.



Теория сплавов и диаграммы состояния

Компоненты – химические элементы, образующие сплав (иногда химические соединения).

Фаза – однородная составная часть сплава, имеющая одинаковый химический состав, кристаллическое строение и отделённая от других частей поверхностью раздела:

1. *Твёрдые растворы.* 2. *Промежуточные фазы.*

Структурная составляющая – внешний вид фазы или совокупности фаз:

1. *Однофазная.* 2. *Многофазная*

Сплав – термодинамическая система, представляющая собой совокупность фаз, находящихся в одном из трёх возможных энергетических состояний:

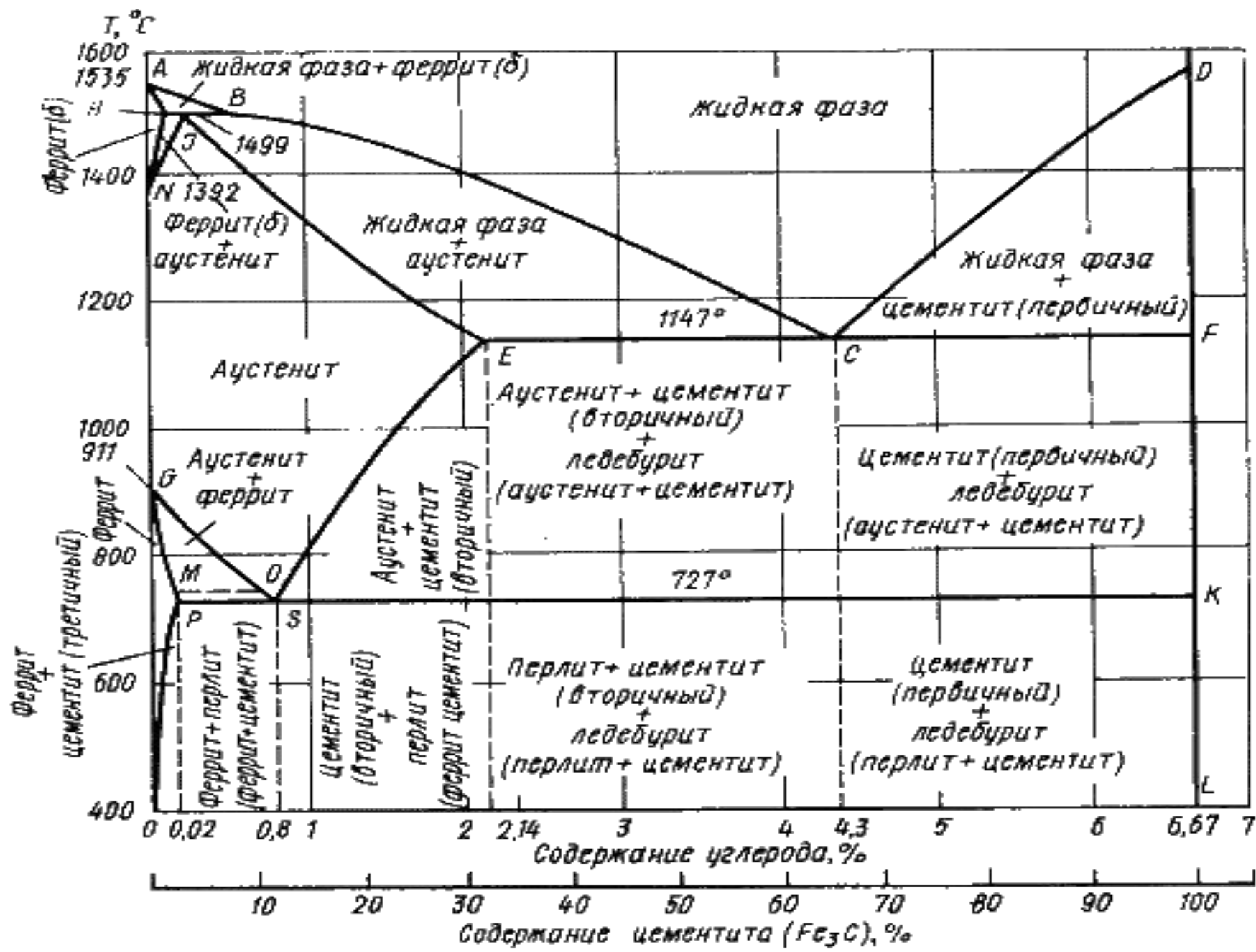
1. *Неравновесное.* 2. *Метастабильное.* 3. *Равновесное.*

Диаграмма состояния – наглядное графическое изображение совокупности фаз в зависимости от температуры и концентрации компонентов:

1. *Метастабильная.* 2. *Стабильная.*

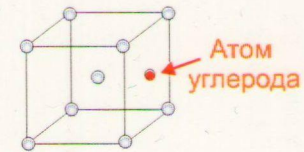
Правило фаз: $C = K - \Phi + 1$

C – число степеней свободы – число внешних и внутренних факторов, которое можно изменять без изменения числа фаз в системе.

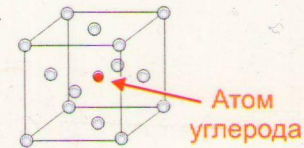


Компоненты и фазы в системе железо-углерод

Феррит - твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Предельная растворимость углерода в α -феррите - 0,02%, а в δ -феррите - 0,1%. Феррит - мягкая пластичная фаза с твердостью HB 80-100.



Аустенит - твердый раствор внедрения углерода в γ -железе. Предельная растворимость углерода в аустените - 2,14%. Аустенит пластичен с невысокой прочностью (твердость HB 160-180).



Цементит - карбид железа Fe_3C содержит 6,67% C. Он имеет сложную ромбическую решетку с 52 атомами. Температура плавления около 1600°C . Цементит слабо ферромагнитен (точка Кюри 210°C), обладает высокой твердостью (HB 800) и малопластичен.

Графит - углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Он образует слоистую гексагональную кристаллическую решетку, мягок и имеет низкую прочность.

Диаграмма состояния железо-цементит

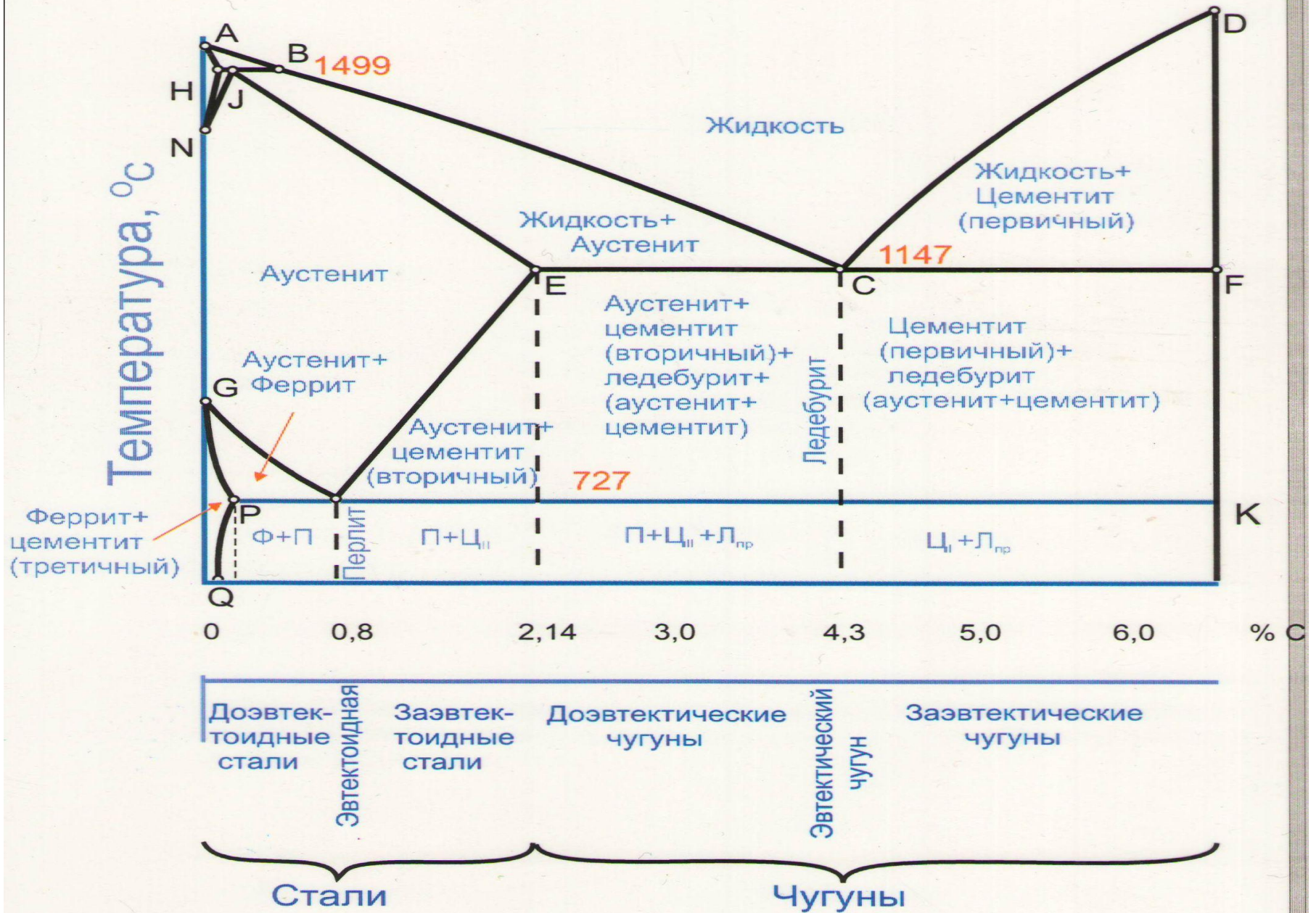
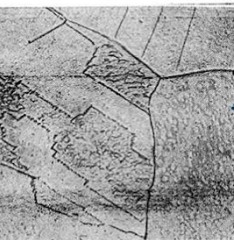
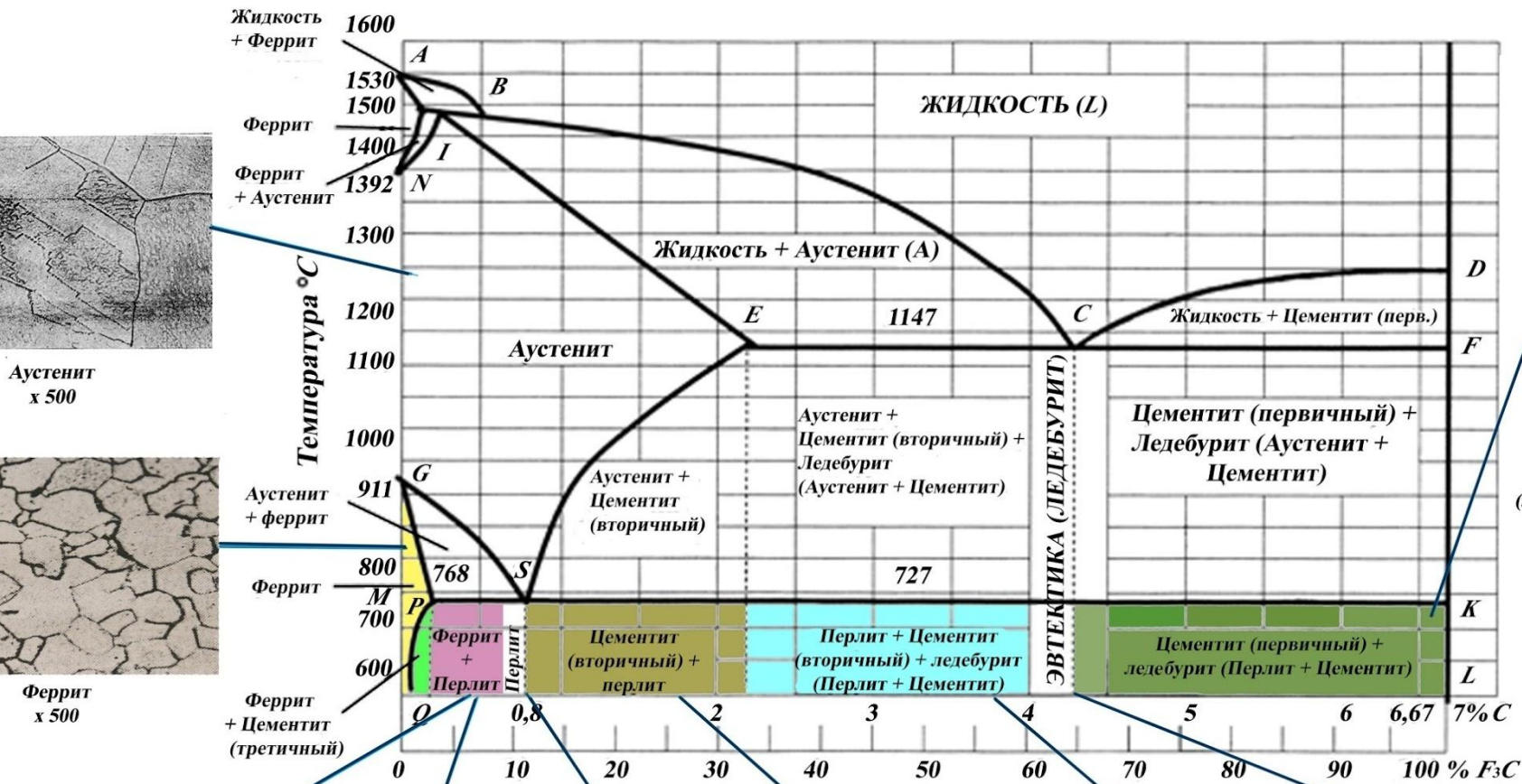


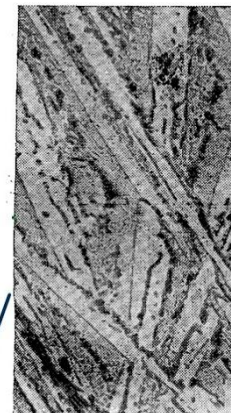
Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом



Аустенит
x 500



Феррит
x 500



Заэвтектический
(ледебурит + первичный
цементит)
x 450



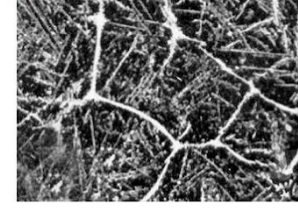
Гипоэвтектоидной стали
0,4% C
(феррит + перлит)
x 150



Допреэвтектоидная сталь
0,8% C
(феррит + перлит)
x 250



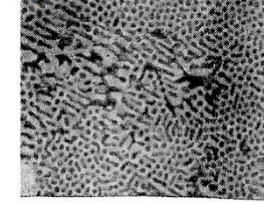
Эвтектоидная сталь
0,8% C
(перлит пластинчатый)
x 250



Заэвтектоидная сталь
1,18% C
(перлит + цементит)
x 150



Допреэвтектический чугун
(ледебурит + перлит)
x 450




Эвтектический чугун
(ледебурит)
x 450

Углеродистая сталь

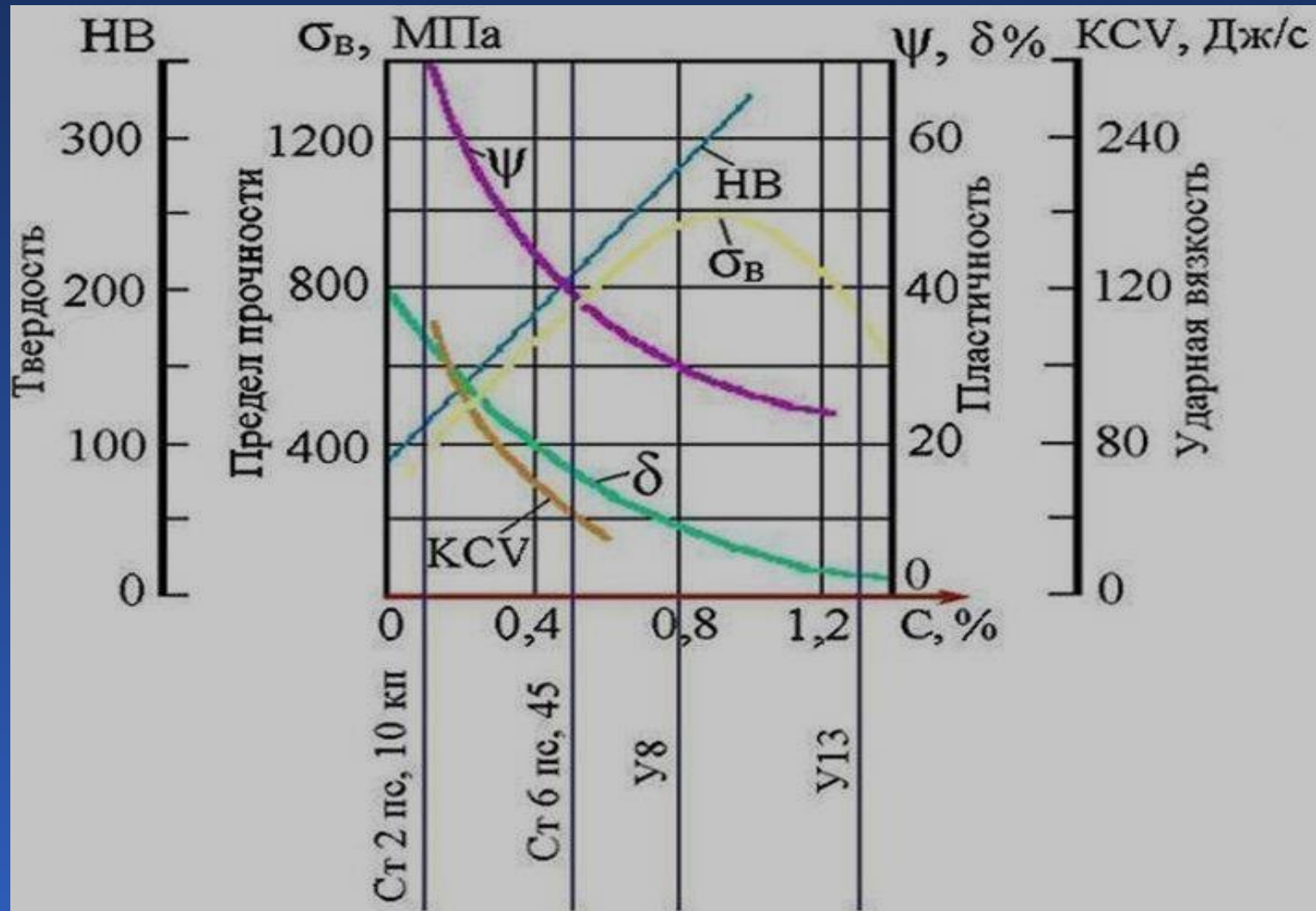
Сплав железа с углеродом (до 2,14%С), в состав которого входят постоянные примеси – $Si < 0,37\%$, $Mn < 0,8\%$, $S < 0,06\%$, $P < 0,045\%$ и атмосферные газы (N, O, H).

Элемент	+	-
Кремний	↑ упругость	
Марганец	↑ прочность, ↓ красноломкость	
Сера	↑ обрабатываемость резанием	↑ красноломкость
Фосфор	↑ жидкотекучесть	↑ хладноломкость
Кислород, Азот	Упрочняющая фаза	Неметаллические включения
Водород		↑ флокены

Массовая доля серы и фосфора в углеродистых сталях, %, не более

Категория качества стали	Фосфор	Сера	Стоимость
Обыкновенного качества	0,04	0,05	
Качественная	0,035	0,04	
Высококачественная	0,025	0,025	
Особовысококачественная (легированная)	0,025	0,015	

Влияние углерода на свойства стали



Классификация углеродистых сталей

По содержанию углерода:

- низкоуглеродистые (до 0,25 % C);
- среднеуглеродистые (0,3–0,5 % C);
- высокоуглеродистые (> 0,50 % C).

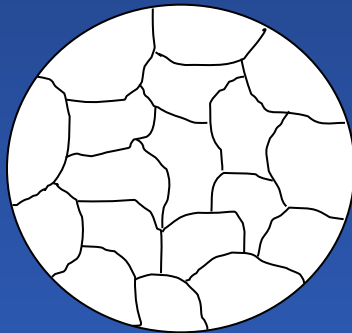
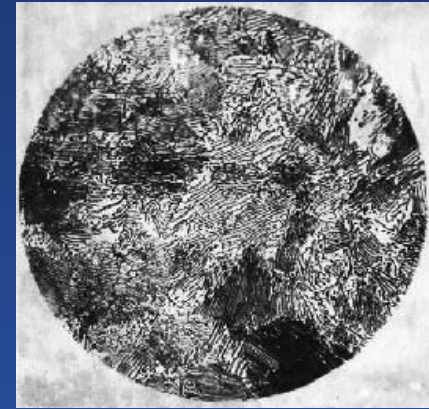
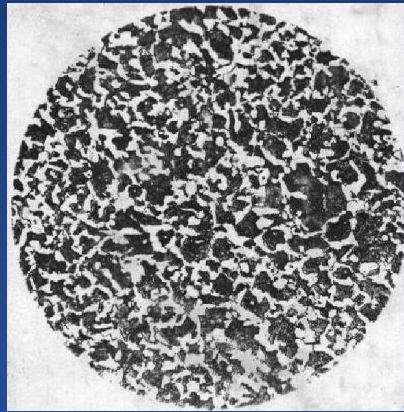
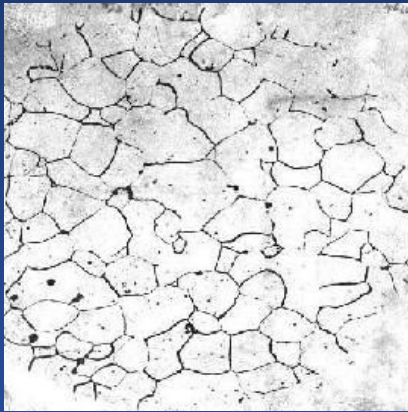
По структуре:

- доэвтектоидные (от 0,02 до 0,8 % C);
- эвтектоидные (0,8 % C);
- заэвтектоидные (от 0,8 до 2,14%С).

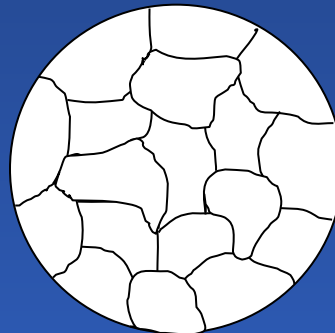
По назначению:

- конструкционные
обыкновенного качества и качественные
- инструментальные
качественные и высококачественные

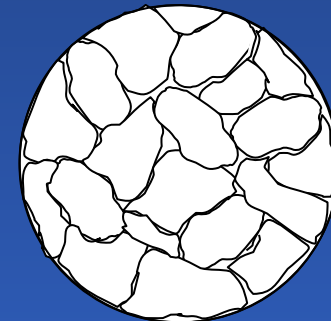
Микроструктуры углеродистых доэвтектоидных сталей и схемы их зарисовки



а



б

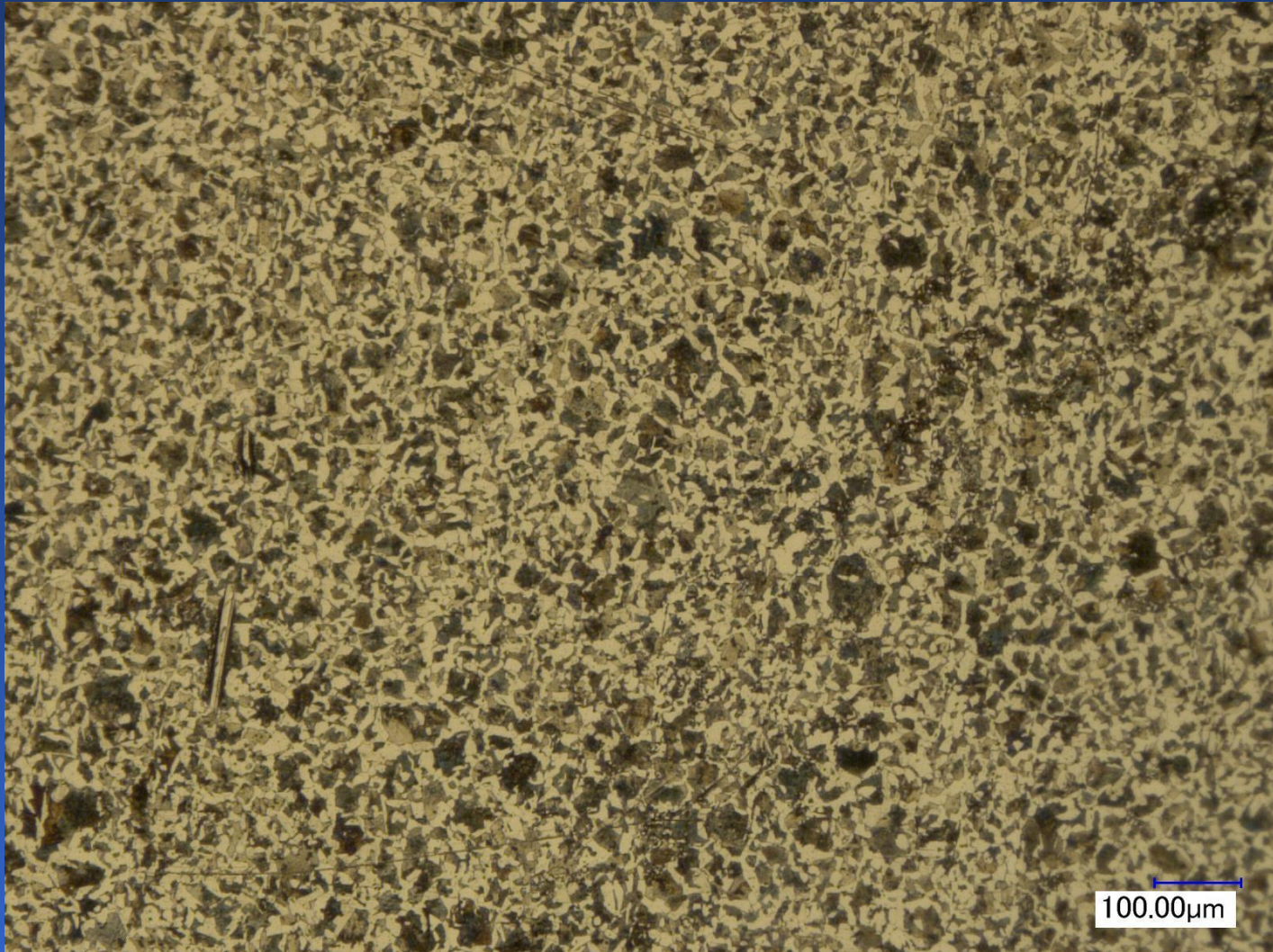


в

а – техническое железо; *б* – сталь 45; *в* – сталь У8

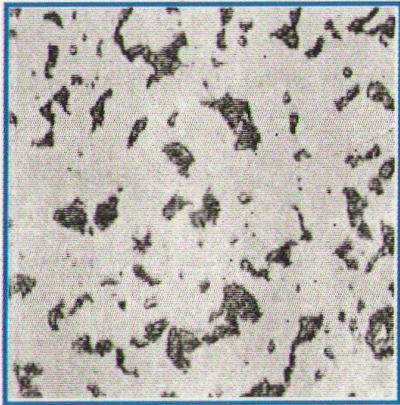
Сталь 40

(0,4%C, структура – Ф+П)



МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ

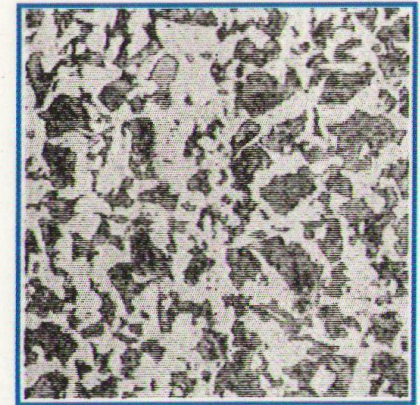
Светлые зерна – ферритные, темные зерна пластинчатый перлит



Сталь 10



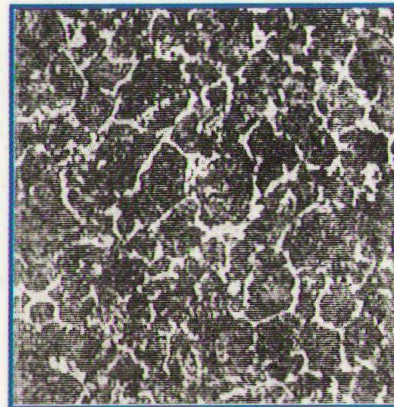
Сталь 20



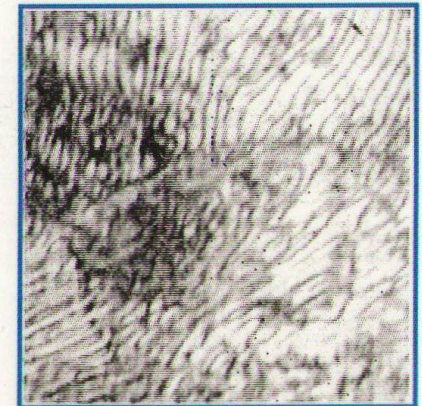
Сталь 30



Сталь 40



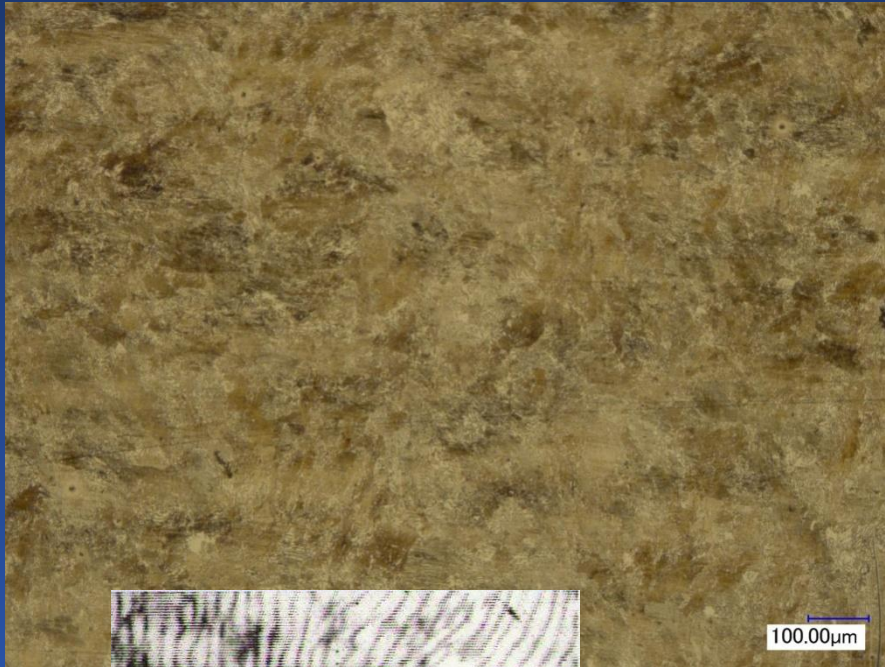
Сталь 60



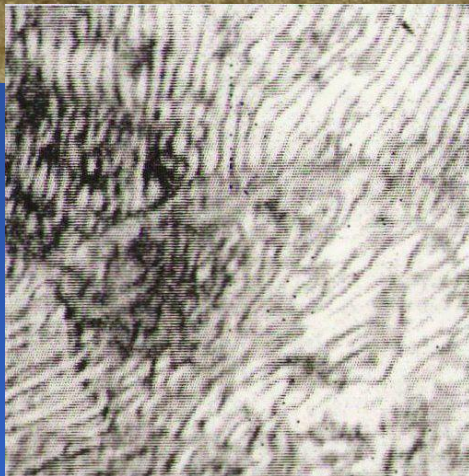
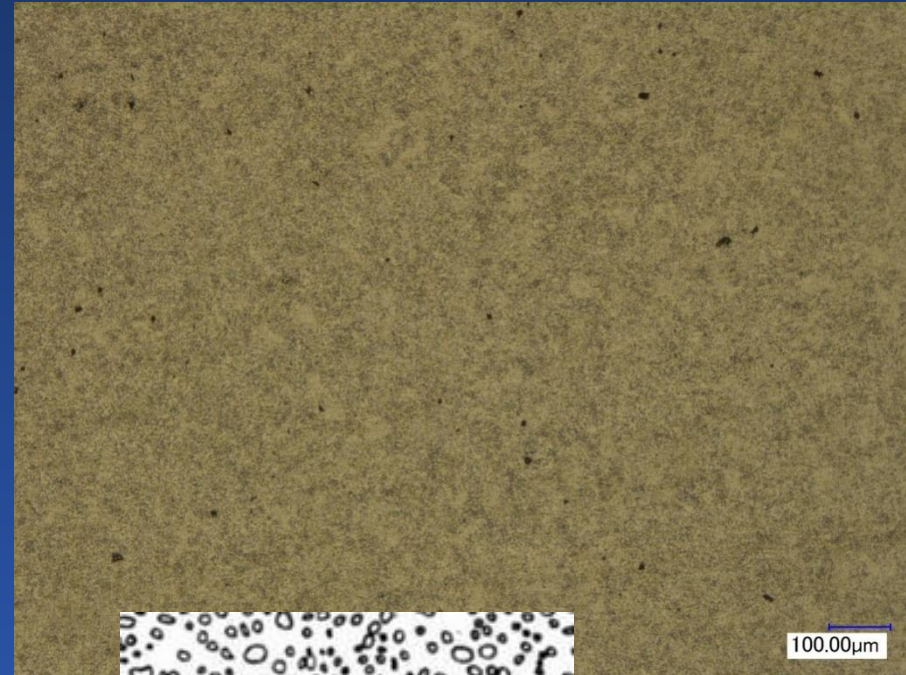
Сталь У8

Сталь У8 (0,8%С)

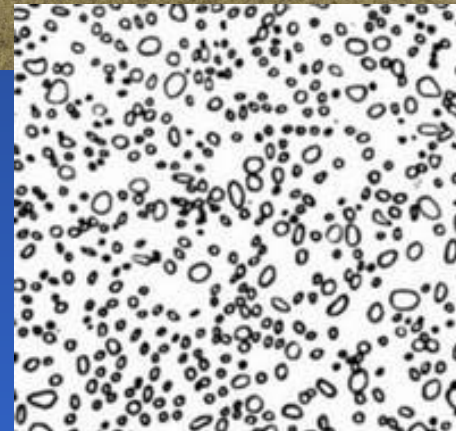
П пл. х150



П зерн. х150

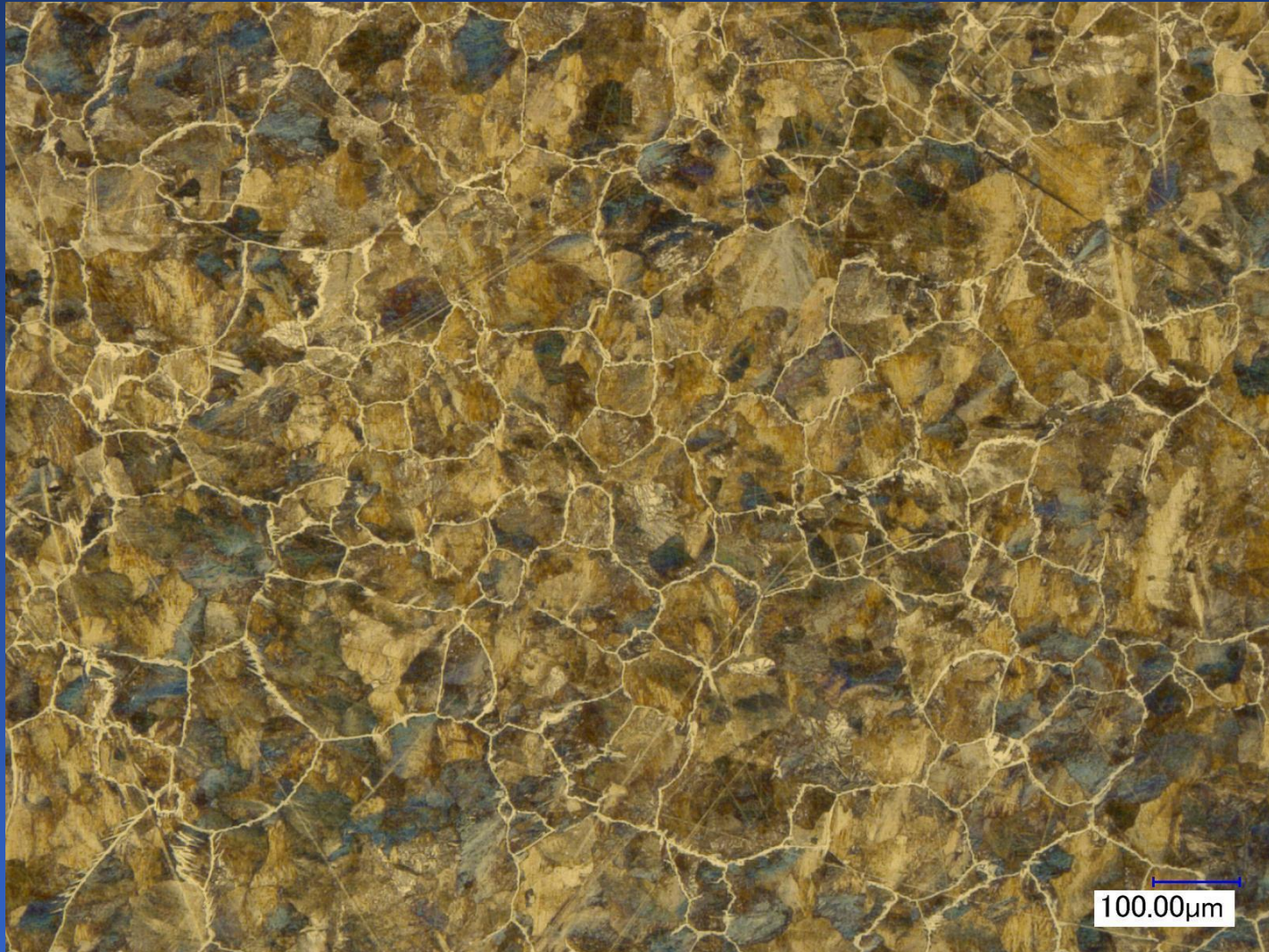


х600



Сталь У10

(1,0%С, структура – П+Ц)



Требования к конструкционным сталям

Конструкционные стали должны обладать высокой конструкционной прочностью, обеспечивать длительную и надежную работу конструкций в условиях эксплуатации.

Материалы должны быть вязкими и хорошо сопротивляться ударным нагрузкам.

При знакопеременных нагрузках должны обладать высоким сопротивлением усталости, а при трении – сопротивлением износу.

Конструкционные материалы должны иметь высокие технологические свойства:

- хорошие литейные свойства;
- обрабатываемость давлением;
- резанием;
- хорошую свариваемость.

Химический состав углеродистых конструкционных сталей обыкновенного качества, ГОСТ 380–94

Марка стали	Массовая доля элементов, %		
	Углерод	Марганец	Кремний
Ст1кп	0,06–0,12	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст1пс	0,06–0,12	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст1сп	0,06–0,12	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст2кп	0,09–0,15	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст2пс	0,09–0,15	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст2сп	0,09–0,15	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст3кп	0,014–0,22	0,30–0,60	Не более 0,05
Ст3пс	0,014–0,22	0,40–0,65	0,05–0,15
Ст3сп	0,014–0,22	0,40–0,65	0,15–0,30
Ст6пс	0,38–0,49	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст6сп	0,38–0,49	0,50–0,80	0,15–0,30

Механические свойства проката из конструкционных качественных сталей толщиной до 80 мм

Марка стали	Предел текучести, σ_T , Н/мм ²	Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
Не менее				
08	196	320	33	60
20	245	410	25	55
30	295	490	21	50
45	355	600	16	40
60	400	680	12	35

Требования к инструментальным сталям

По назначению делятся на стали режущего, измерительного и штампового инструмента.

Режущий инструмент работает в условиях длительного контакта и трения с обрабатываемым металлом (высокая твердость HRC 60–62 и износостойкость, высокая теплостойкость).

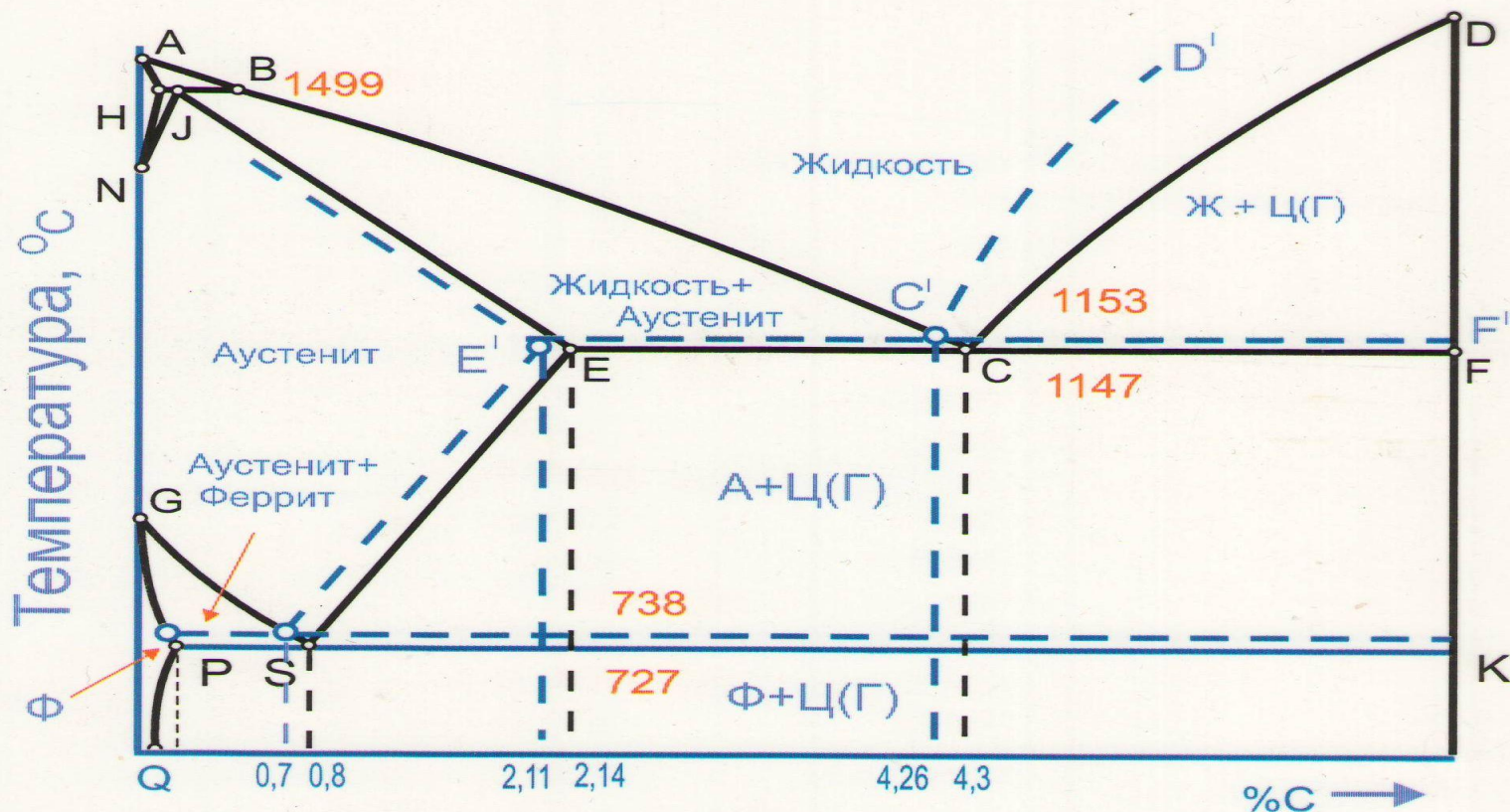
Штамповые стали применяют для изготовления штампов холодного и горячего деформирования, пуансонов, матриц, пресс-форм для литья под давлением.

В зависимости от температурных условий эксплуатации различают штамповые стали для деформирования в холодном (высокая твердость, износостойкость, прочность, удовлетворительная вязкость) и горячем состоянии (высокая прочность, ударная вязкость, высокая окалиностойкость, высокое сопротивление термической усталости).

Механические свойства инструментальной нелегированной термически обработанной металлопродукции из стали

Марка стали	Твердость, НВ, не менее	Временное сопротивление, Н/мм ²
У7, У7А, У8, У8Г	187	650
У11, У11А, У12, У12А	212	750

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО - ГРАФИТ



Классификация чугунов

Белые - углерод связан в цементит Fe_3C

Серые - углерод находится в виде графита

Серые чугуны подразделяются :

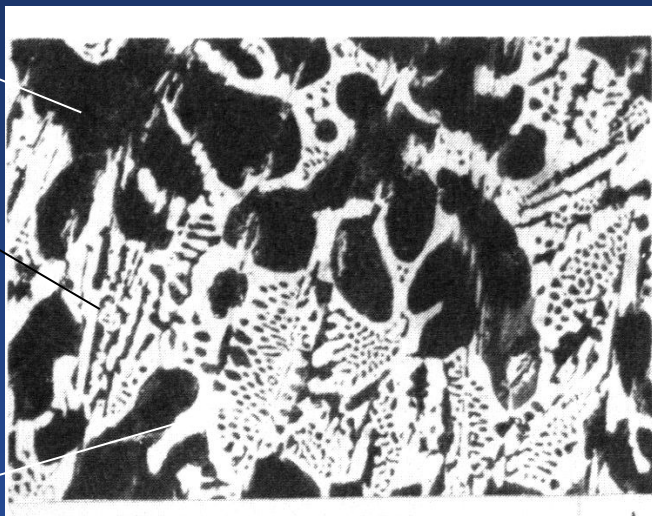
- форме включений графита на серые, ковкие и высокопрочные, а по структуре металлической основы на перлитные ($C_{связ} = 0,8\%$), феррито-перлитные ($C_{связ} < 0,8\%$) и ферритные ($C_{связ} = 0\%$).

Структуры белых чугунов

перлит

ледебурит

цементит



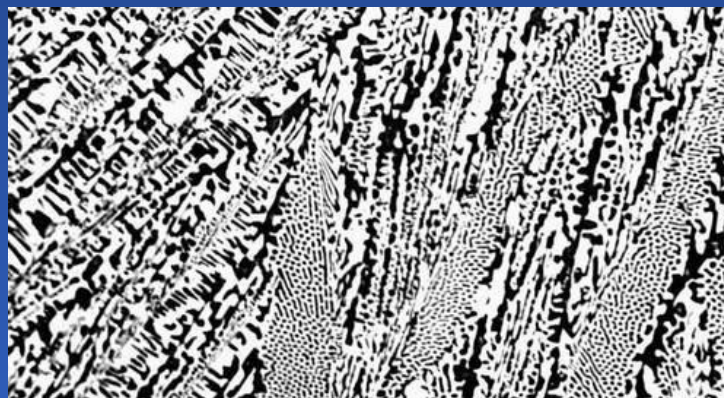
доэвтектический, ×300



ледебурит

цементит

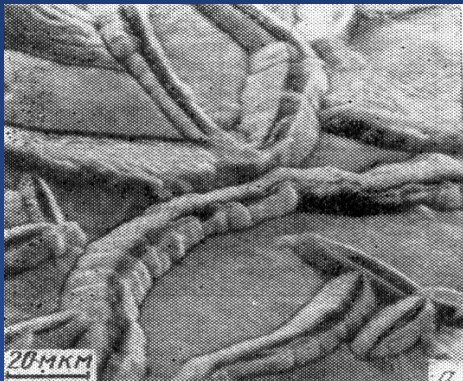
заэвтектический, ×300



ледебурит 100%

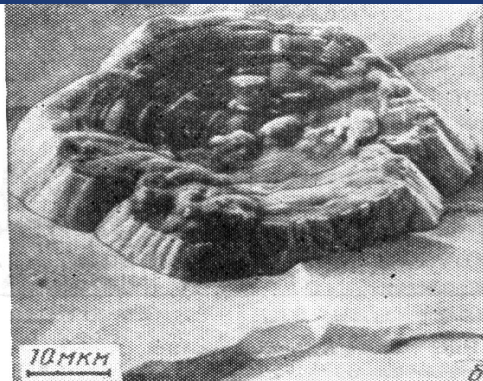
эвтектический, ×300

Внешний вид графитных включений и схемы их зарисовки



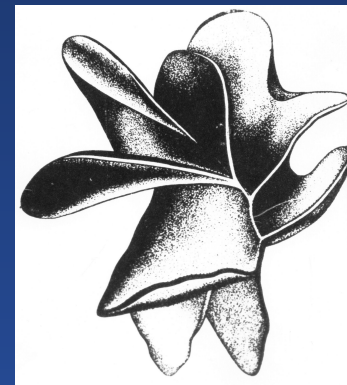
а

а – пластинчатый;



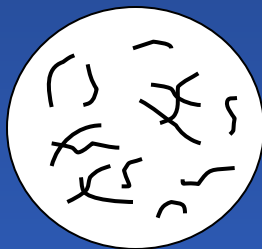
б

б – шаровидный



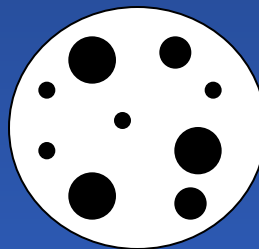
в

в – хлопьевидный



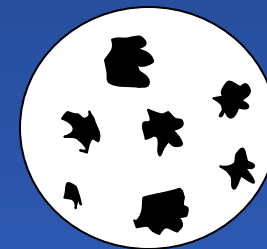
а

а – пластинчатый;



б

б – шаровидный



в

в – хлопьевидный

СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

Включения графита имеют форму пластин



Получению серого чугуна способствует:

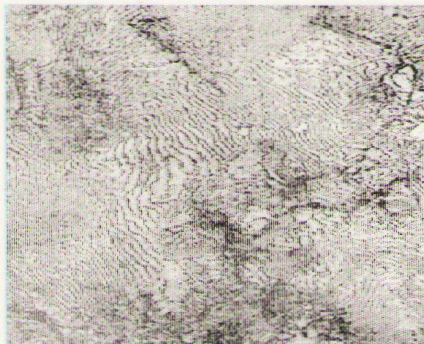
- повышение содержания кремния
- медленное охлаждение.

Химический состав:

2,9-3,5% C, 1,7-2,6%Si, 0,5-1,0%Mn

Нетравленный шлиф

Серый перлитный



Серый феррито-перлитный



Серый ферритный



СЧ-20

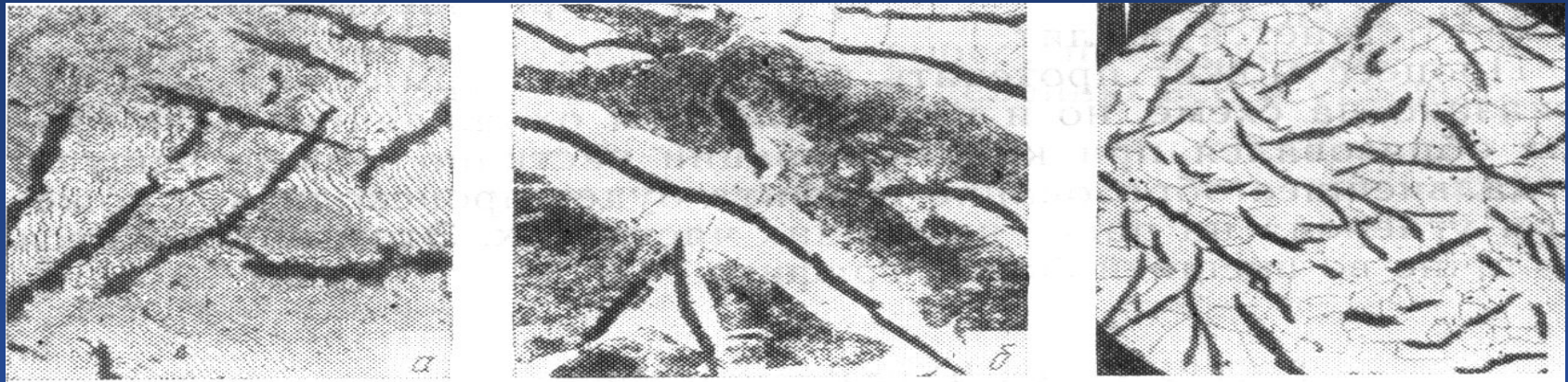


Маркировка серых чугунов

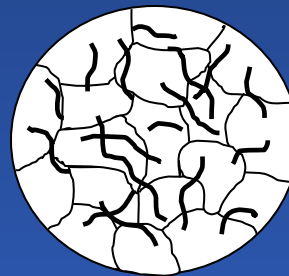
Предель прочности на разрыв (200МПа)

Серый чугун

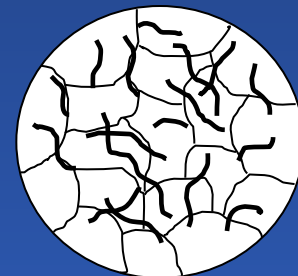
Структура серых чугунов и схемы их зарисовки



a



б



в

a – перлитный чугун, $\times 200$; *б* – ферритно-перлитный чугун, $\times 100$,
в – ферритный чугун, $\times 100$

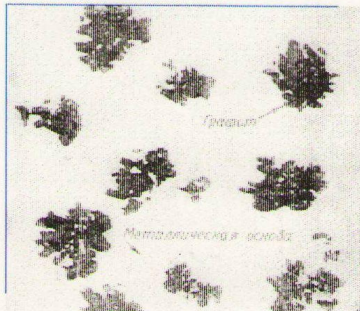
Механические свойства некоторых серых чугунов (ГОСТ 1412-85)

Чугун	σ_B , МПа	δ , %	НВ	Структура металлической основы
СЧ15	150	-	163-229	Ф
СЧ25	250	-	180-250	Ф+П
СЧ40	400	-	207-285	П
СЧ45	450	-	229-2890	П

КОВКИЕ ЧУГУНЫ

Включения графита имеют хлопьевидную форму

Ковкий чугун получают путем отжига белого чугуна

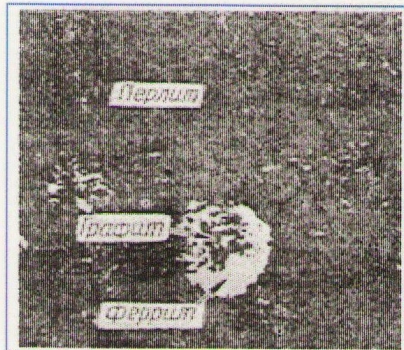


Химический состав:

2,9-3,5% С, 1,7-2,6%Si, 0,5-1,0%Mn

Нетравленный шлиф

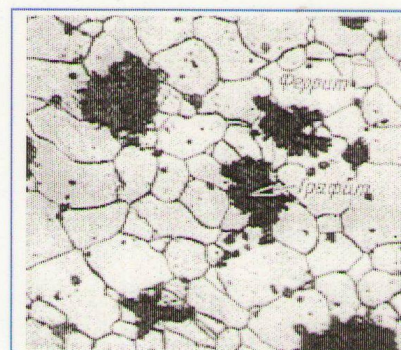
Ковкий перлитный



Ковкий феррито-перлитный



Ковкий ферритный

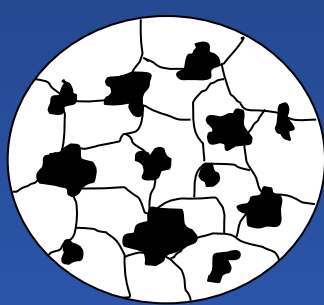
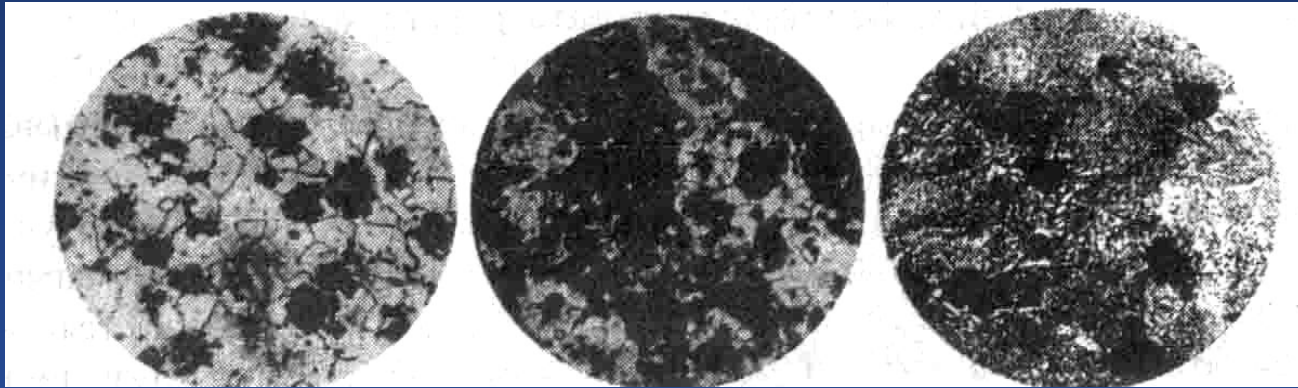


Маркировка ковких чугунов

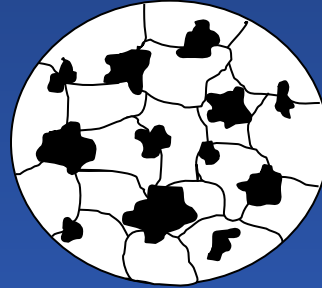
КЧ-50-5 ← Относительное удлинение, % (5%)

↑ ← Предел прочности на разрыв (500МПа)
↑ ← Ковкий чугун

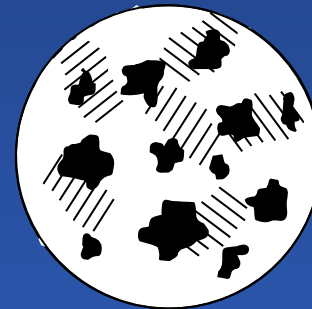
Структуры ковких чугунов и схемы их зарисовки



a



б



в

a – ферритный ковкий чугун, $\times 200$;

б – ферритно-перлитный ковкий чугун, $\times 200$;

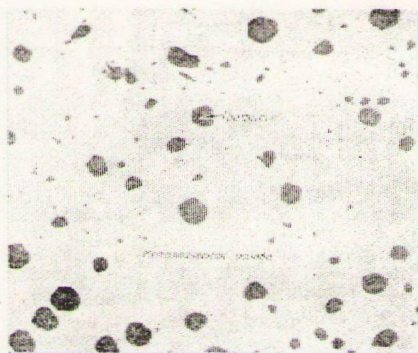
в – перлитный ковкий чугун, $\times 200$

Механические свойства ковкого чугуна (ГОСТ 1215–79)

Марка чугуна	σ_B , МПа (кгс/мм ²), не менее	δ , %, не менее	Твердость, НВ
КЧ 30-6	294(30)	6	100–163
КЧ 37-12	362(37)	12	110–163
КЧ45-7	441(45)	7	150–207
КЧ 60-3	588(60)	3	200–269
КЧ 80-1,5	784(80)	1,5	270–320

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ

Включения графита имеют шаровидную форму



Высокопрочный чугун получают путем модифицирования серого чугуна магнием или церием.

Химический состав:

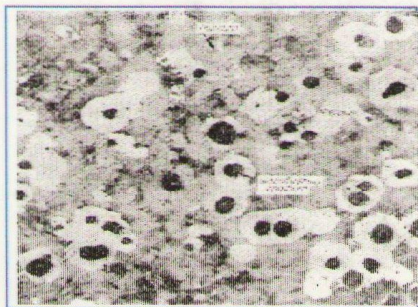
($<0,02\%S, <0,1\%P$)

3,0-4,0% C, 2,5-3,8%Si, 0,2-0,7%Mn

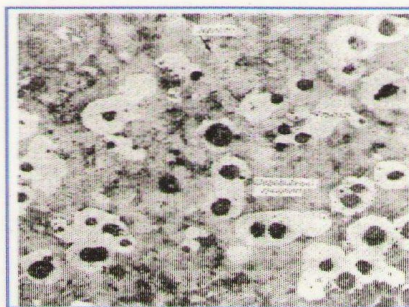
+0,02-0,08%Mg

Нетравленный шлиф

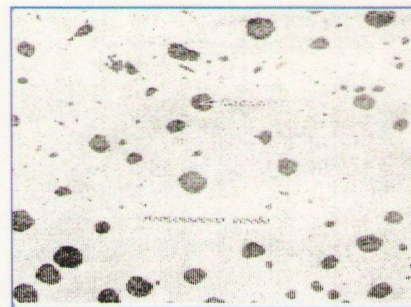
Высокопрочный перлитный чугун



Высокопрочный феррито-перлитный



Высокопрочный ферритный



Маркировка высокопрочных чугунов

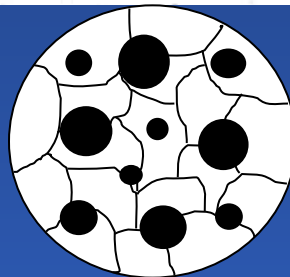
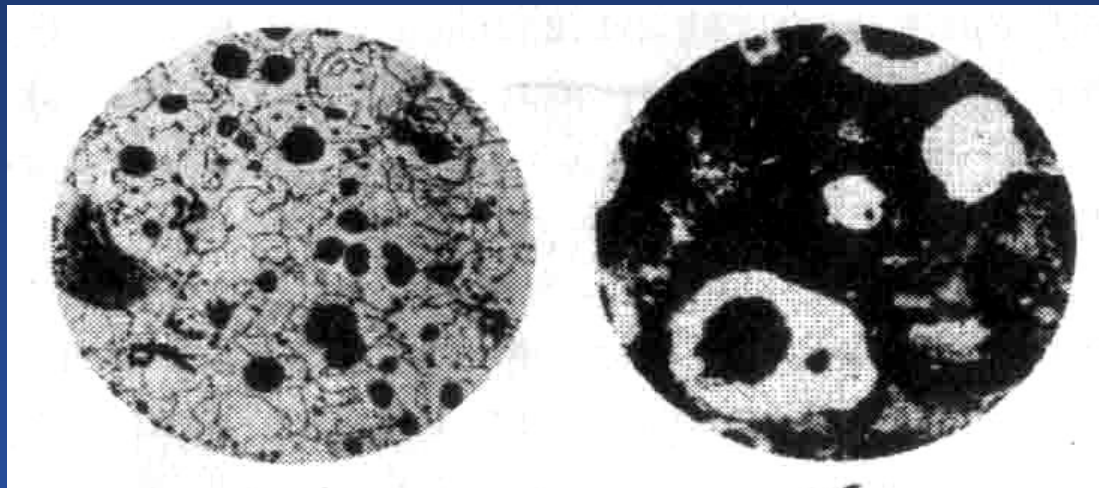
ВЧ-45



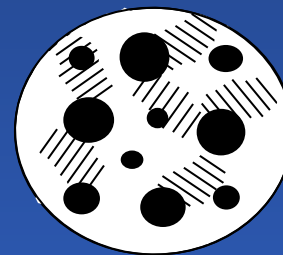
↑ Предель прочности на разрыв (200МПа)

↑ Высокопрочный чугун

Структуры высокопрочных чугунов и схемы их зарисовки



a




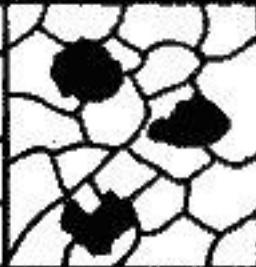
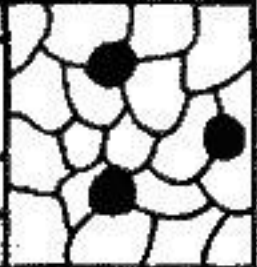






б

a – высокопрочный чугун на ферритной основе;
б – высокопрочный чугун на ферритно-перлитной основе

Механические свойства чугуна с шаровидным графитом для отливок (ГОСТ 7293–85)

Марка чугуна	Структура металлической основы	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	δ , %	Твердость, НВ
ВЧ35	Ф	350(35)	220(22)	22	140–170
ВЧ45	Ф+П	450(45)	310(31)	10	140–225
ВЧ60	П	600(60)	370(37)	3	192–277
ВЧ80	П	800(80)	480(48)	2	218–351
ВЧ100	Бейнит	1000(100)	700(70)	2	270–360

Твёрдость чугунов не зависит от формы графита, а определяется типом металлической основы

Металлическая основа	Класс чугуна		
	Серый А	Ковкий Б	Высокопрочный В
Феррит			
Феррит + Перлит			
Перлит			



Рост твёрдости

Литейное производство



Отливки из чугунов



Фазовые превращения в сплавах Fe-C в твёрдом состоянии

Фазовые превращения в сталях и чугунах вызываются тем, что из-за изменившихся условий (например, T) старое состояние оказывается менее устойчивым, чем новое, с меньшей свободной энергией. Изменение состояния стали происходит при переходе через её *критические точки*.

Обозначения критических точек:

Равновесная точка	Линия диаграммы	При нагреве		При охлаждении
A_1	PSK	A_{c_1}	>	A_{r_1}
A_2	MO	A_{c_2}	>	A_{r_2}
A_3	GS	A_{c_3}	>	A_{r_3}
A_m	SE	A_{c_m}	>	A_{r_m}
A_4	NJ	A_{c_4}	>	A_{r_4}

Основные превращения в сталях

$\text{П} \rightarrow \text{А}$	выше A_1
$\text{А} \rightarrow \text{П}$	ниже A_1
$\text{А} \rightarrow \text{М}$	при охлаждении со скоростью больше $V_{\text{кр}}$
$\text{А} \rightarrow \text{Б}$	изотермически при охлаждении в некотором интервале температур
$\text{М} \rightarrow \text{Ф}+\text{К}$	при нагреве в определённом интервале температур

Превращение перлита в аустенит

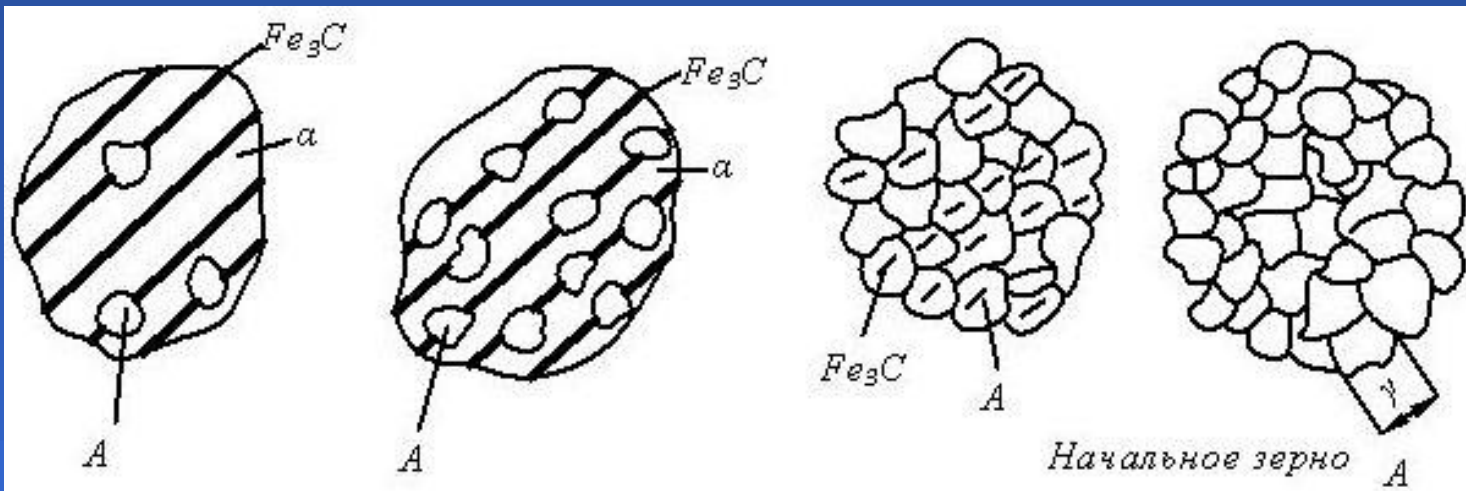


Превращение состоит из двух параллельно идущих процессов:

- полиморфного $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$ превращения;
- растворения цементита (Fe_3C) в аустените $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$

Стадии процесса:

- Образование зародышей аустенита в перлите на границе феррита и цементита.
- Рост аустенитного зерна за счёт полного растворения остатков цементита.
- Гомогенизация аустенита.



Рост аустенитного зерна при нагреве

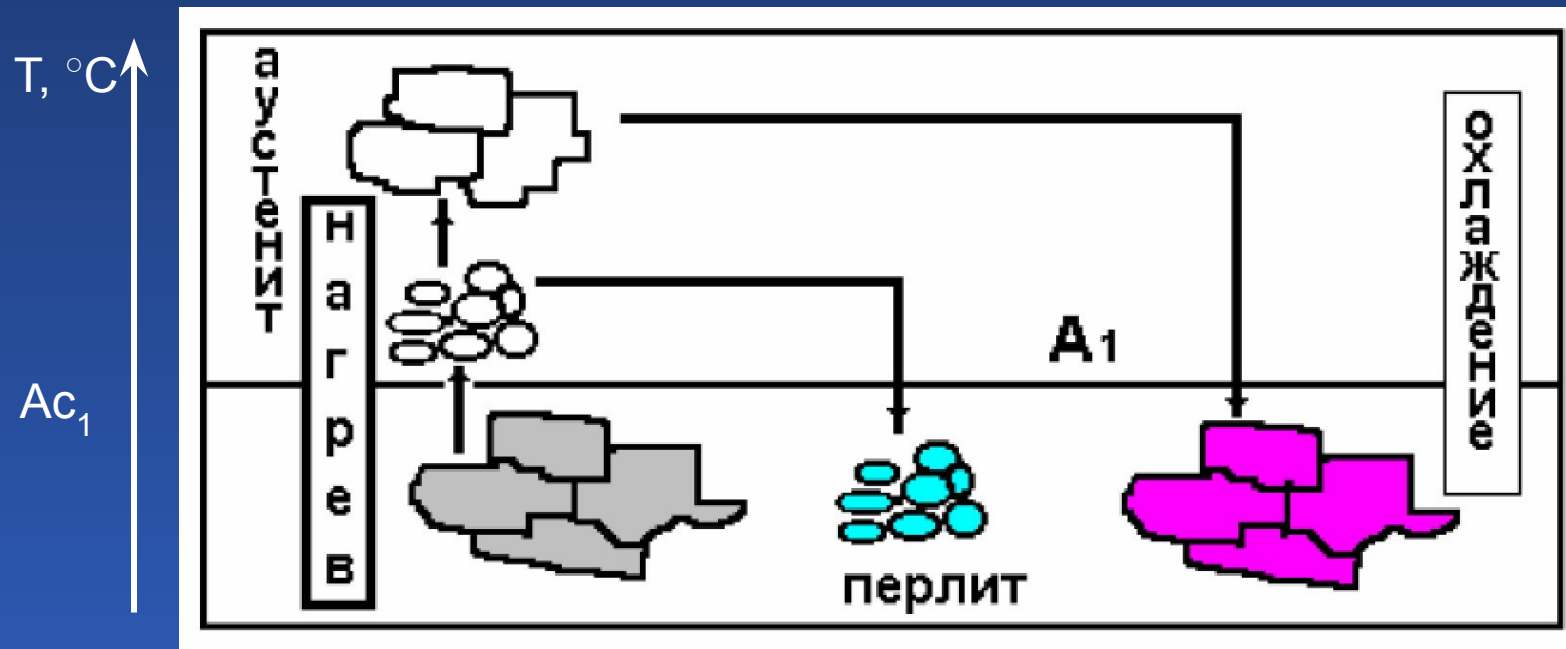
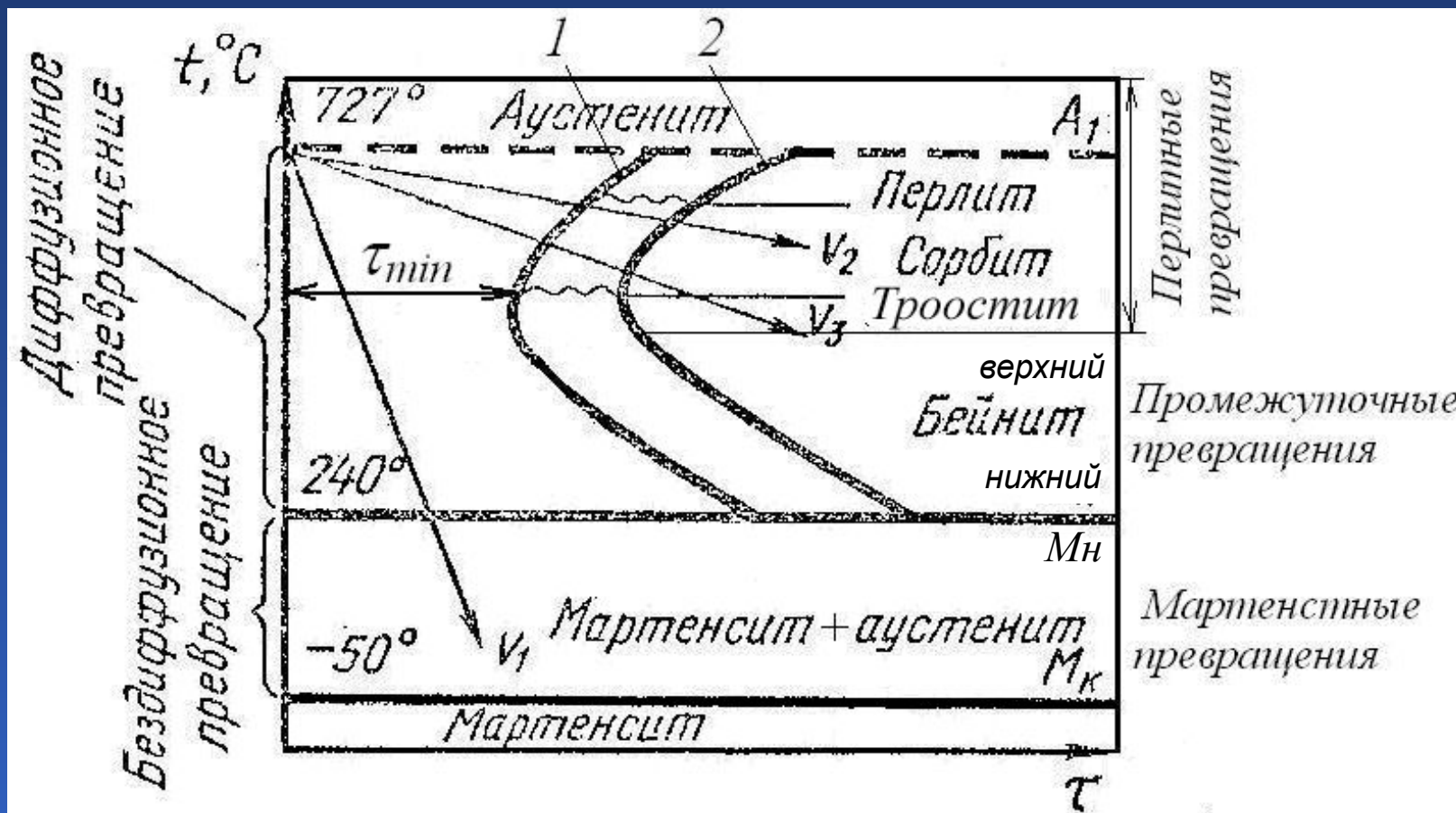
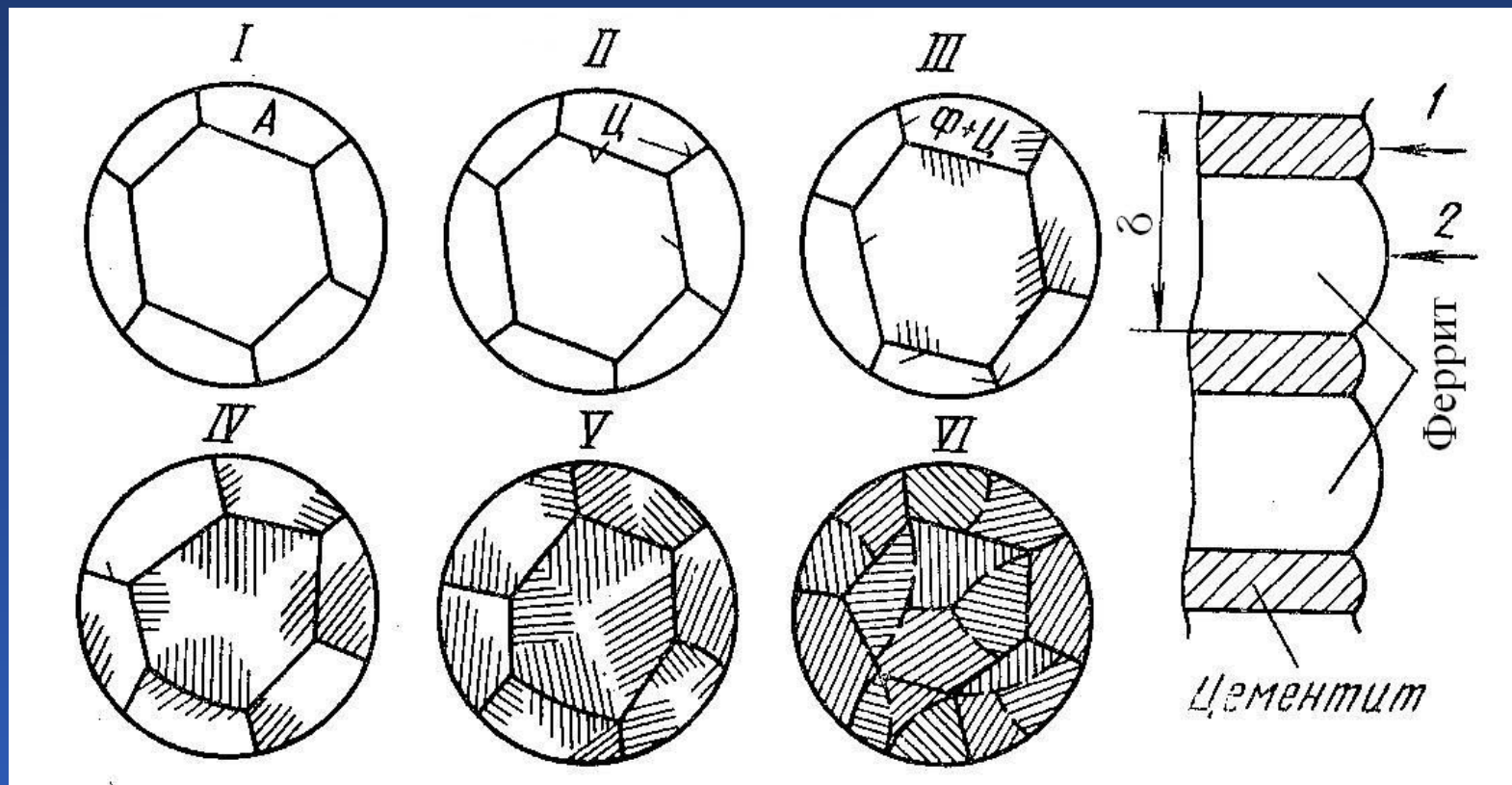


Диаграмма изотермического превращения аустенита для эвтектоидной стали



Превращение аустенита при охлаждении



Продукты перлитного превращения



Перлит

Сорбит

Троостит

x750

δ , МКМ	600	250	100
НВ	180	250	400

Мартенситное превращение



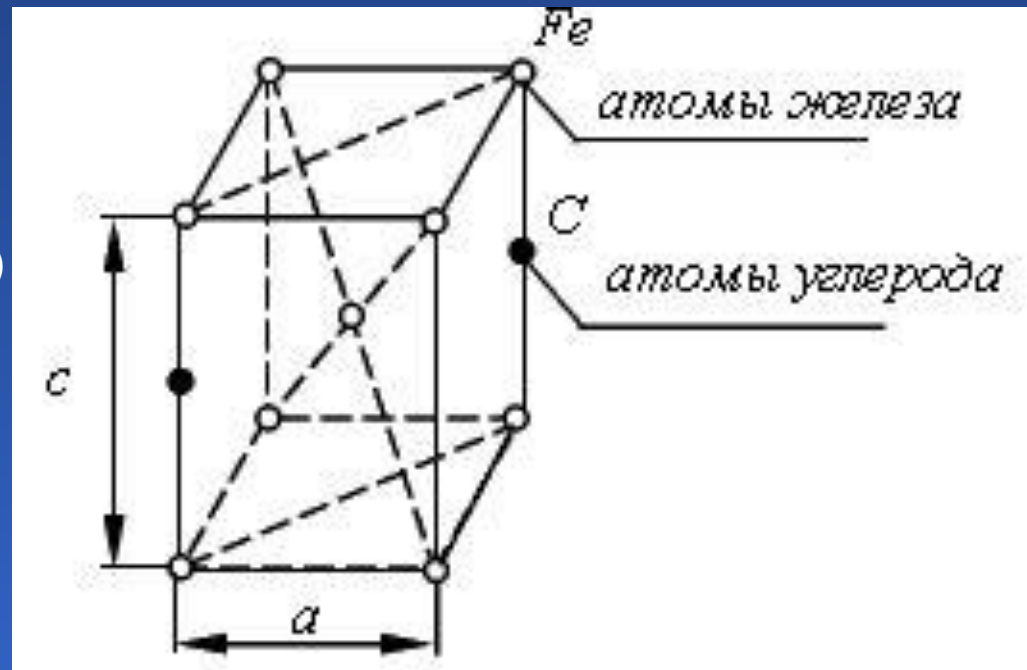
Мартенсит – пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе.

Кристаллическая решётка мартенсита – ОЦТ.

Мартенситное превращение происходит бездиффузионно путём ориентированного сдвига групп атомов железа в определённом направлении относительно решётки аустенита.

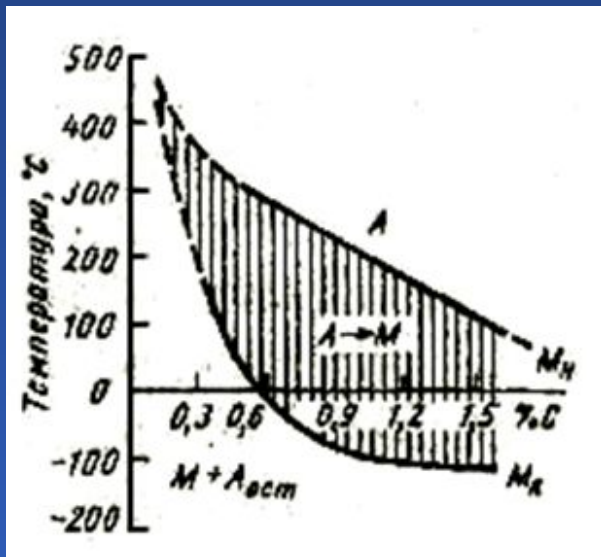
Свойства мартенсита:

- высокая твёрдость (до 66 HRC)
- высокая прочность (до 2700 МПа)
- малая пластичность
- высокая хрупкость

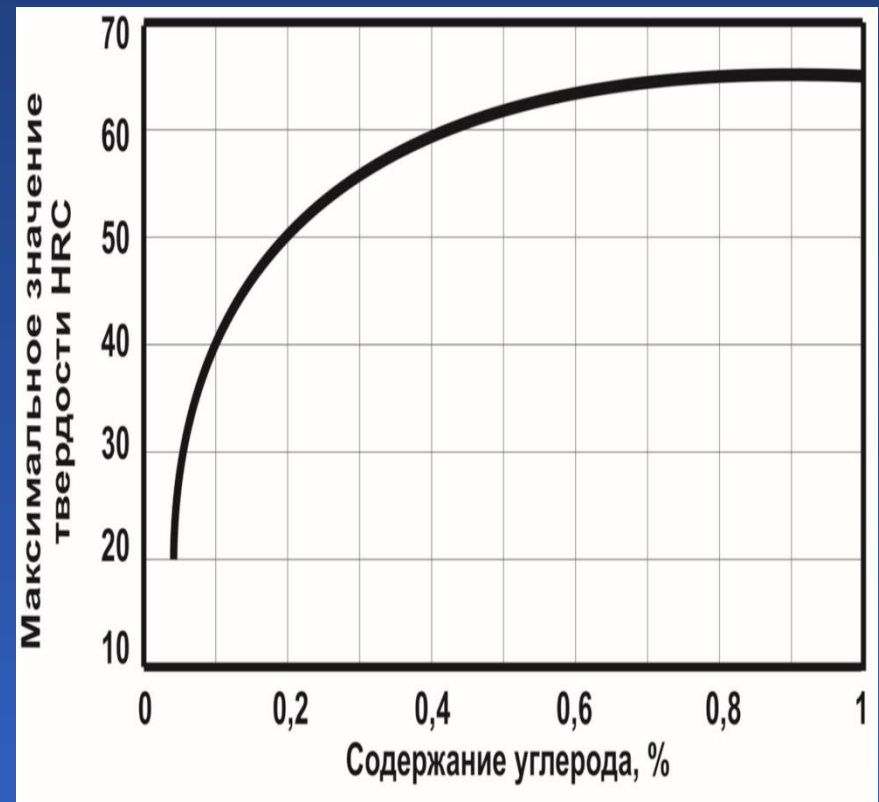


Мартенситное превращение в сталях

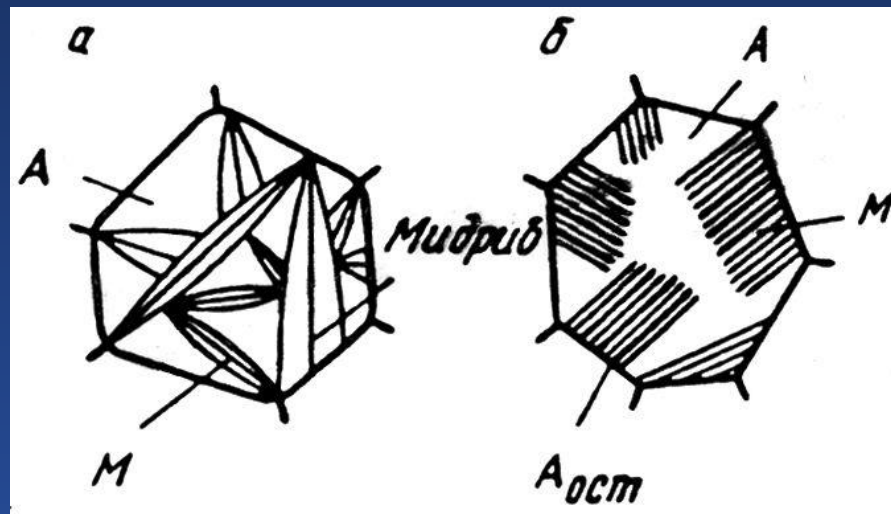
Температура мартенситных точек M_n и M_s при различном содержании углерода в сталях



Твердость мартенсита в зависимости от содержания в нем углерода



Структура мартенсита

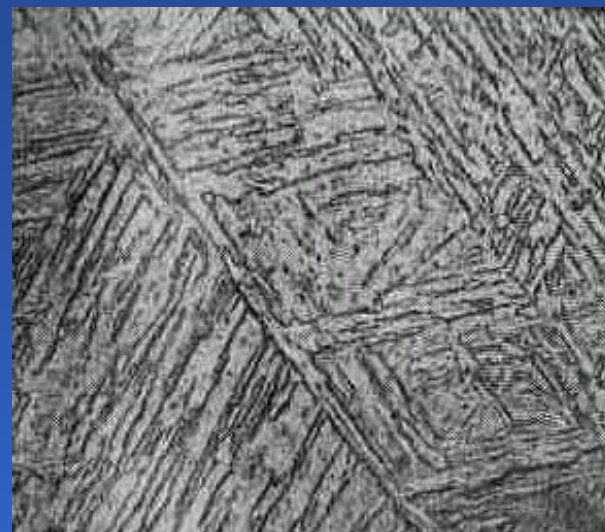


а – игольчатый

б - пакетный



x1000

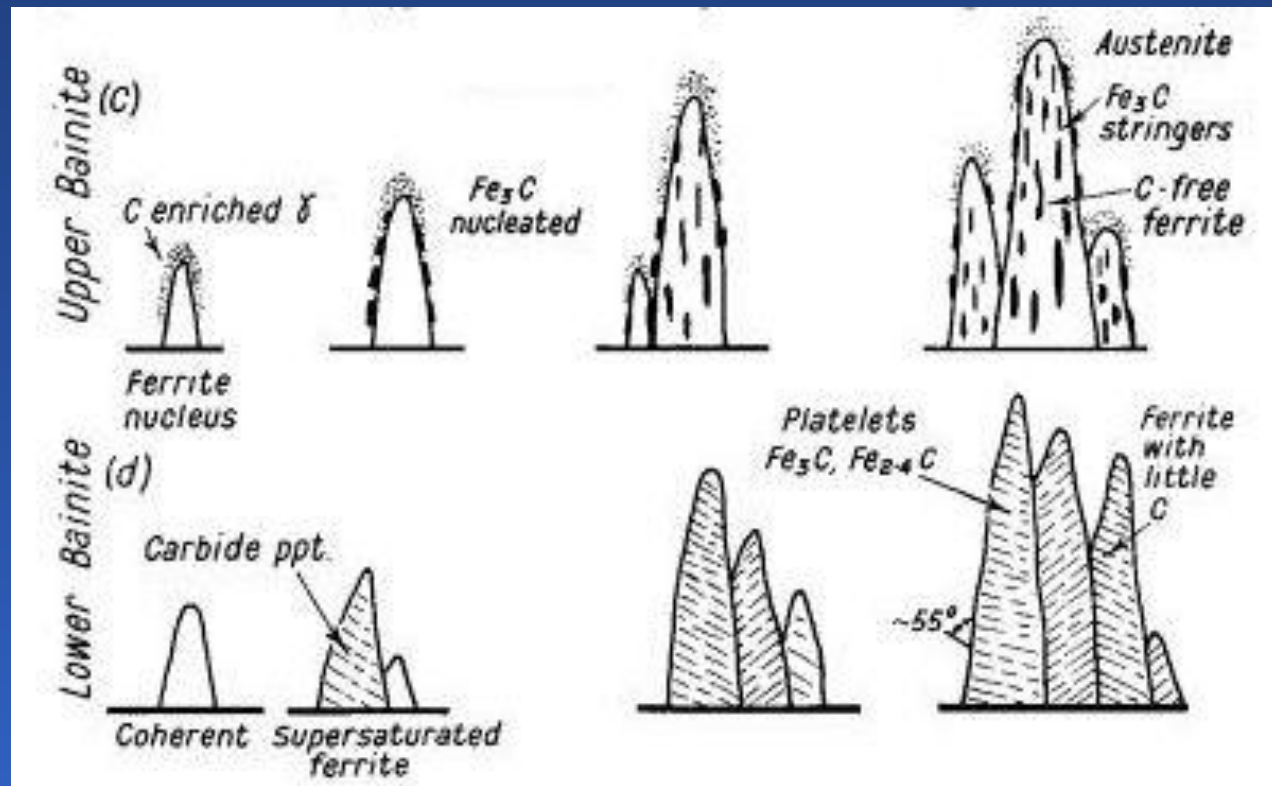


Промежуточное (бейнитное) превращение

Бейнит – структура, состоящая из α -твёрдого раствора, претерпевшего мартенситное превращение, и частиц карбидов.
Различают верхний и нижний бейнит.

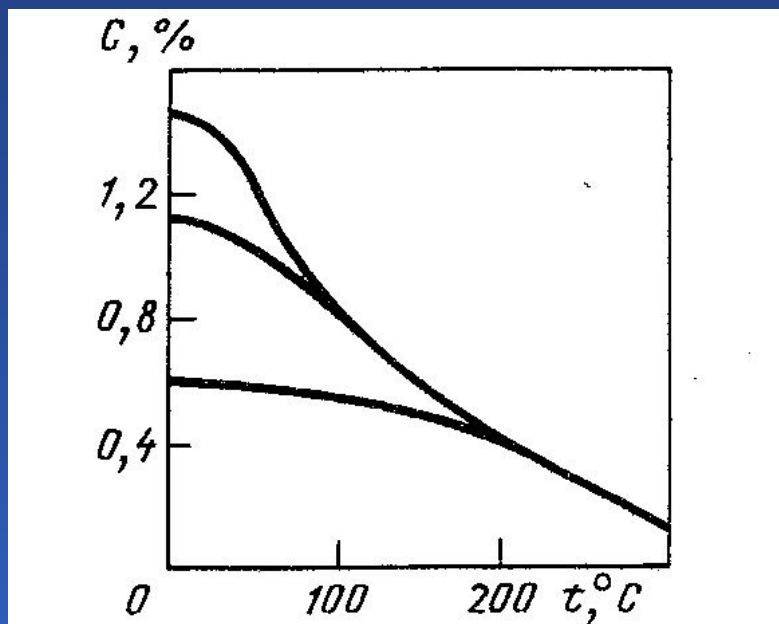


Нижний бейнит, x750



Превращения при отпуске

1. Распад мартенсита
2. Превращение остаточного аустенита
3. Снятие внутренних напряжений
4. Коагуляция карбидов - растворение более мелких и роста более крупных частиц цементита при одновременном обеднении углеродом α -твердого раствора



Изменение содержания C в мартенсите при отпуске

Структуры отпуска

200 °C

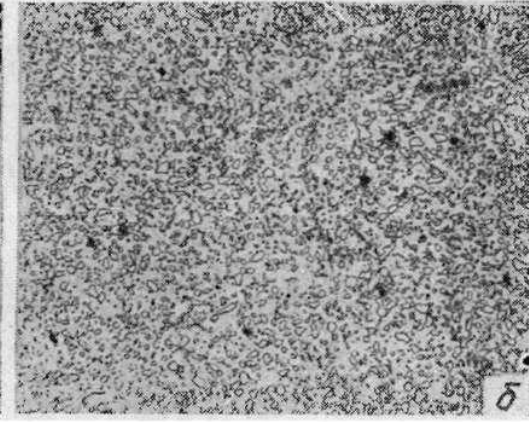
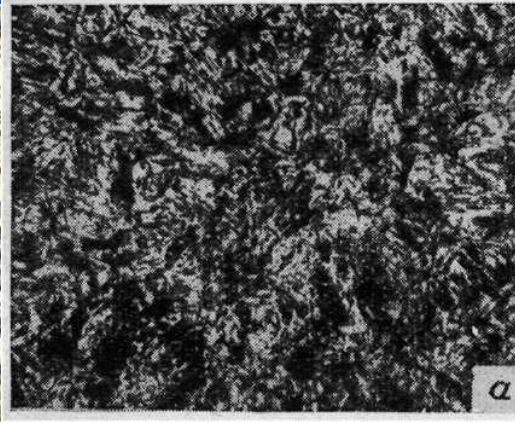
400 °C

600 °C

Мартенсит отпуска

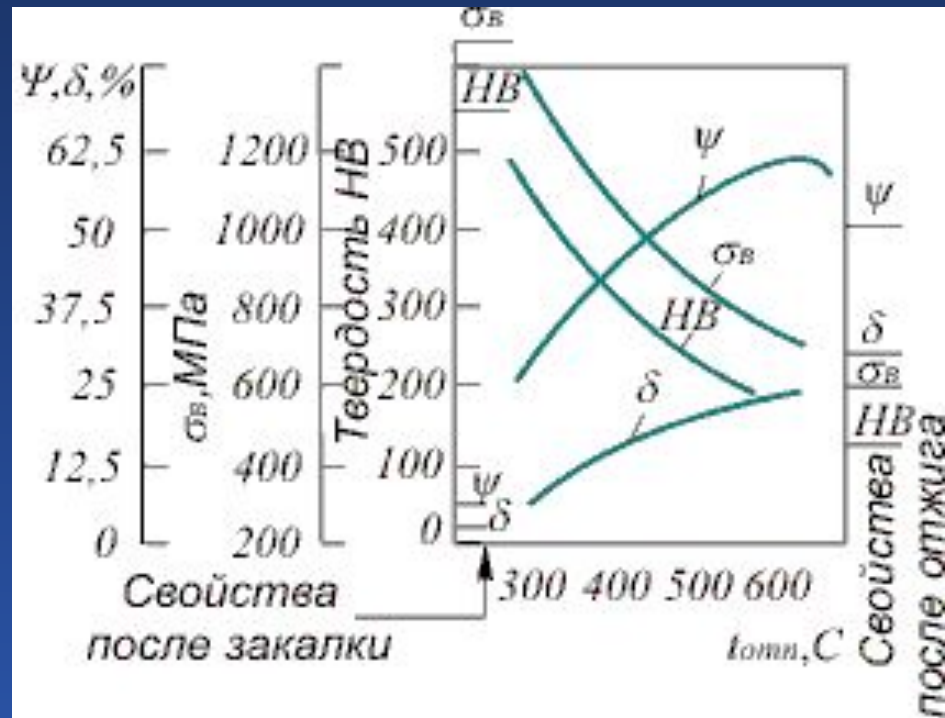
Троостит отпуска

Сорбит отпуска

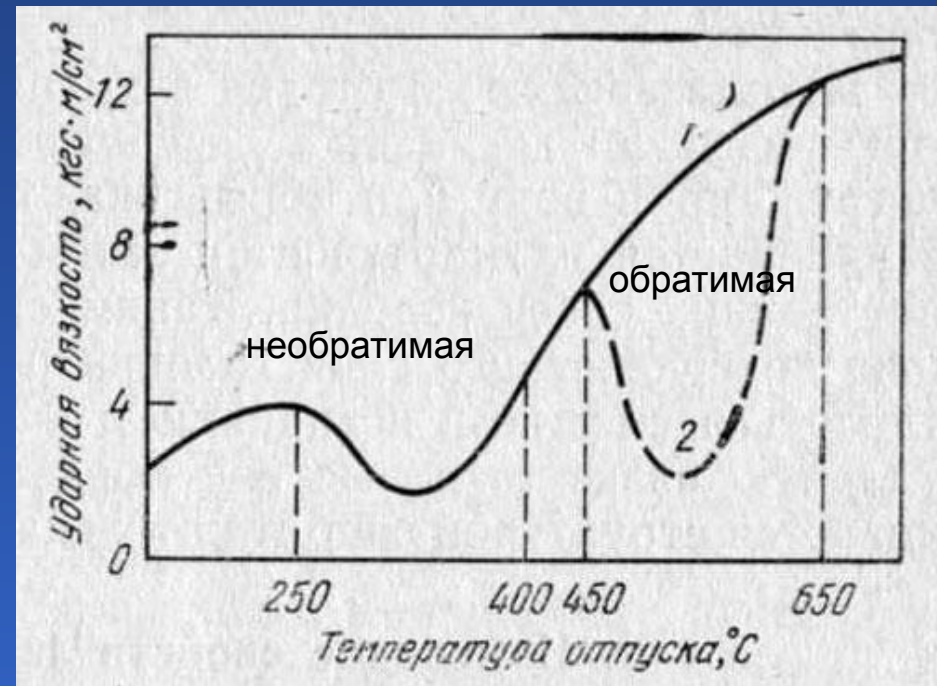


x 500

Влияние температуры отпуска на свойства стали



Отпускная хрупкость

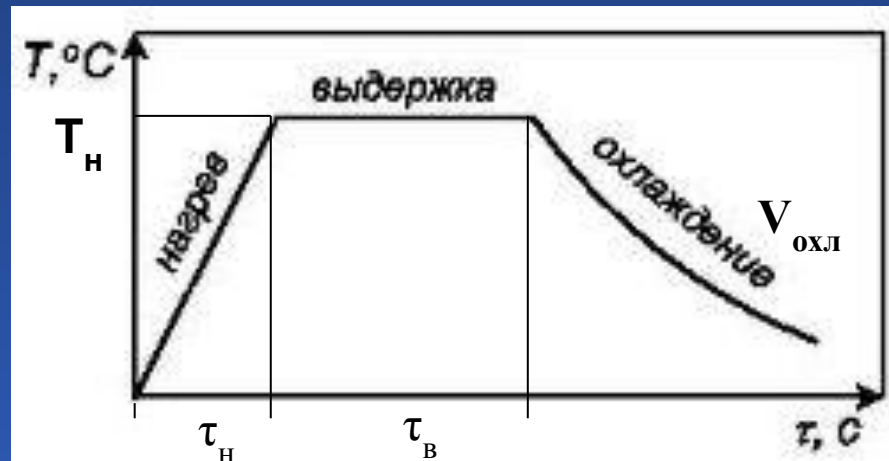
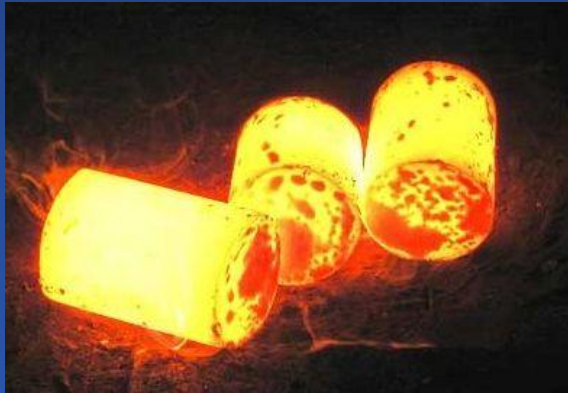


Термическая обработка

Термическая обработка (ТО) – это тепловое воздействие на материал с целью изменения структуры и получения требуемых свойств.

Классификация видов ТО:

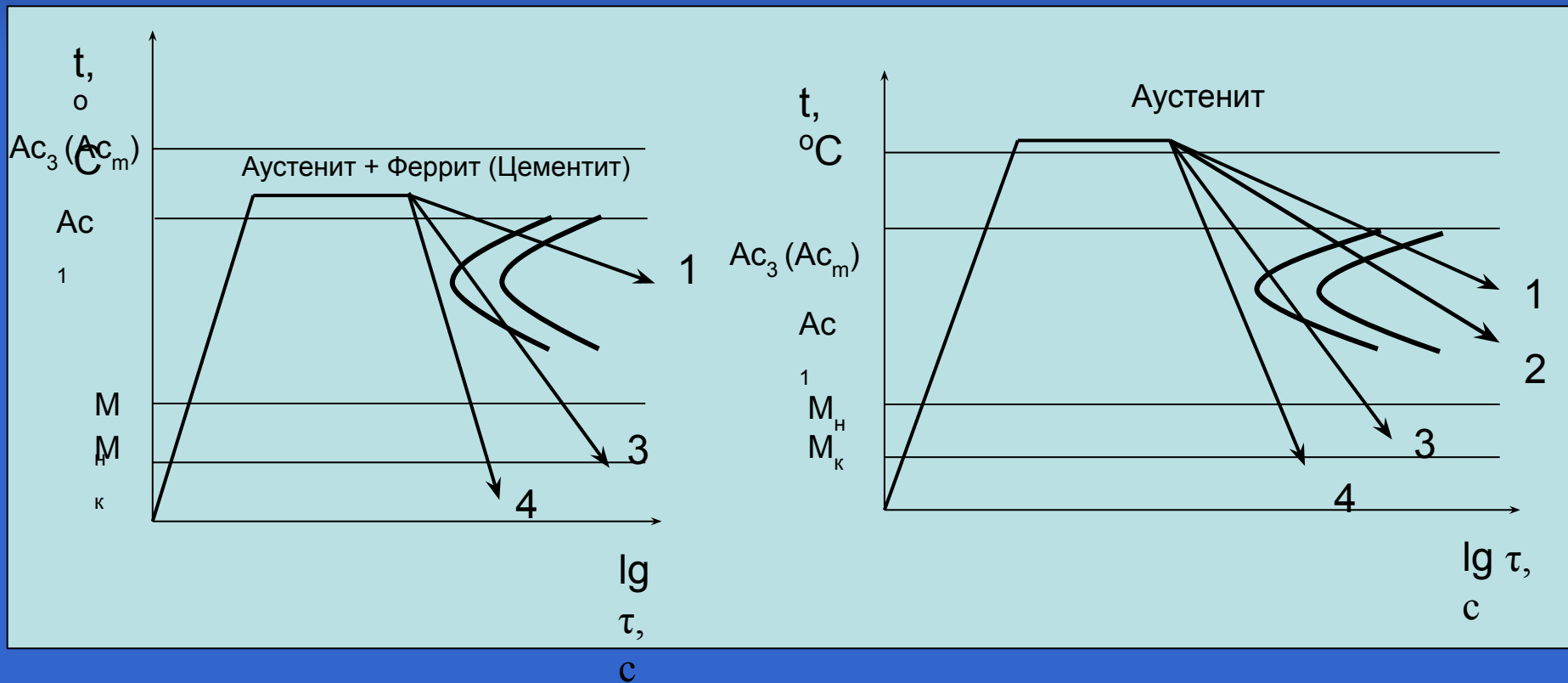
- Объёмная
- Поверхностная
- Предварительная
- Окончательная
- Полная
- Неполная



Параметры ТО:

- T_n , °C - температура нагрева (определяется видом ТО и критическими точками стали).
- $\tau_{\text{общ}}$, мин – общее время нагрева. $\tau_{\text{общ}} = \tau_n + \tau_v = 1,5D + 0,2(1,5D)$
- $V_{\text{охл}}$, град/мин – скорость охлаждения (определяется видом ТО и составом стали)

Неполная и полная термообработка

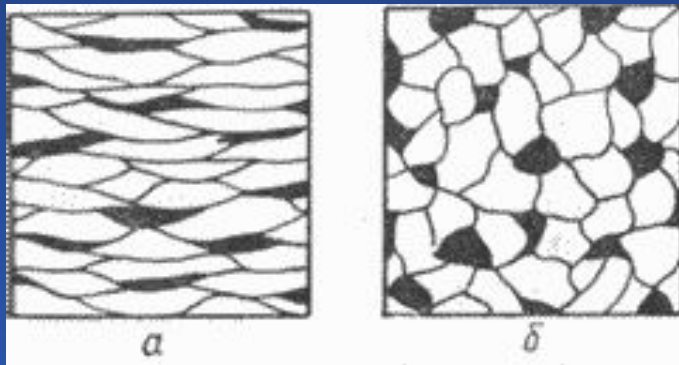


1. Отжиг; 2. Нормализация; 3. Частичная закалка; 4. закалка.

ОТЖИГ

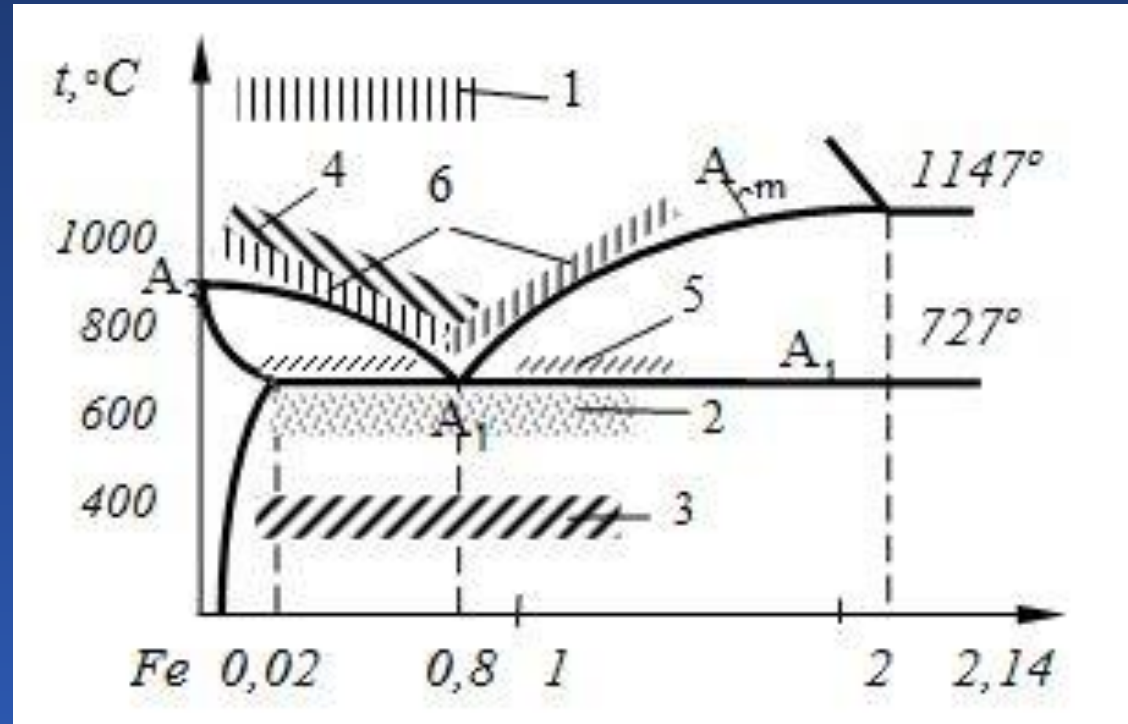
Отжиг I рода не связан с фазовыми превращениями:

1. Диффузионный.
2. Рекристаллизационный.
3. Для снятия напряжений.



Наклёп

Отжиг



Наклепом называют упрочнение металла, появляющееся в результате холодной пластической деформации. При холодной прокатке, штамповке, волочении зерна металла деформируются, дробятся. Это повышает твердость металла, снижает его пластичность и вызывает хрупкость.

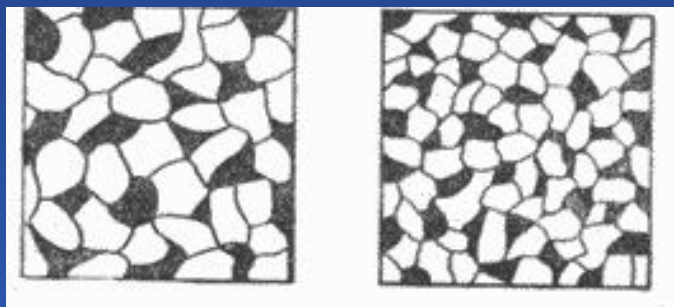
Отжиг и нормализация

Отжиг II рода – термообработка, основанная на фазовой перекристаллизации при нагреве ($\text{П} \rightarrow \text{А}$) и при охлаждении ($\text{А} \rightarrow \text{П}$)

4. Полный.

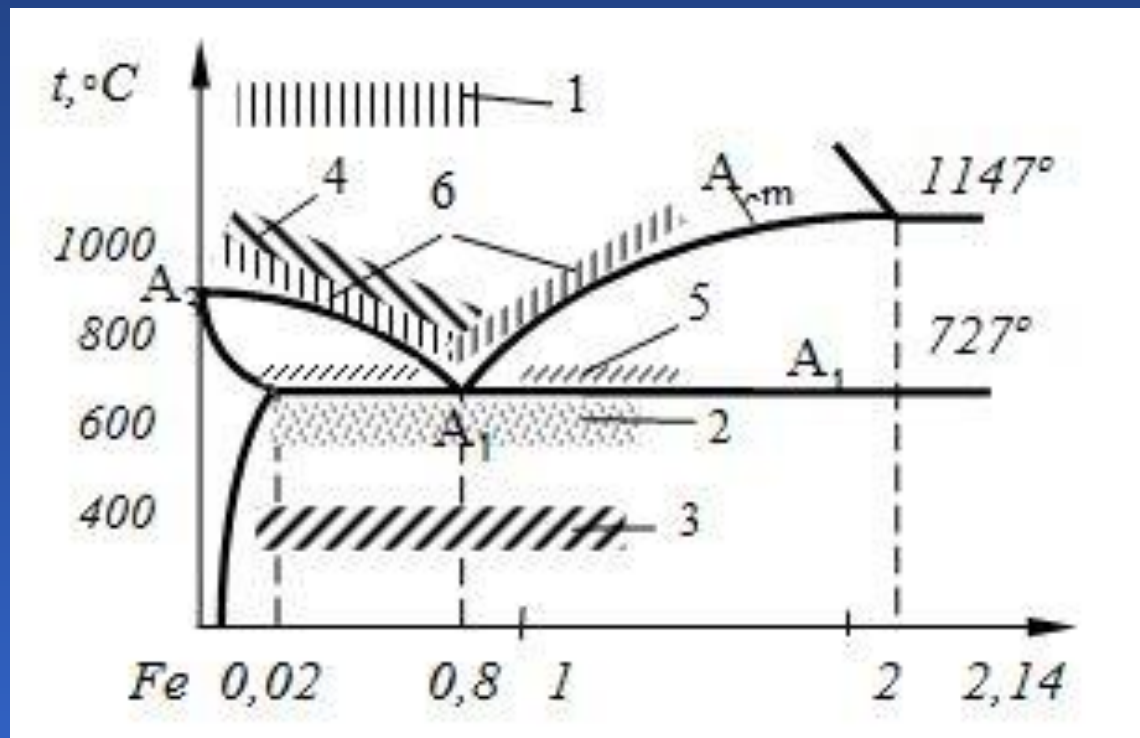
5. Неполный

6. Нормализационный

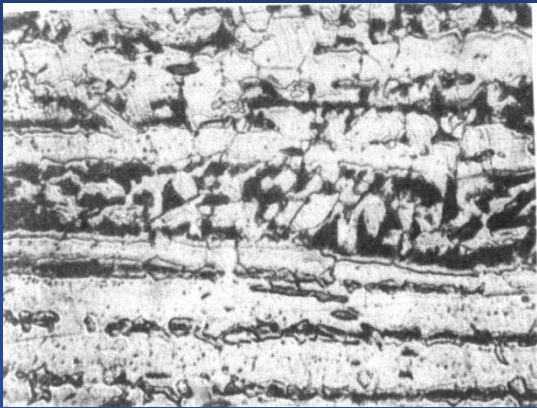


Отжиг

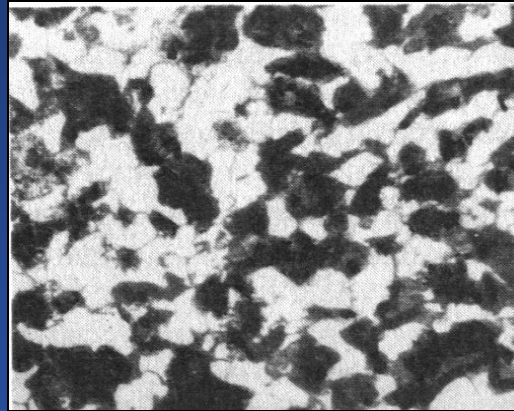
Нормализация



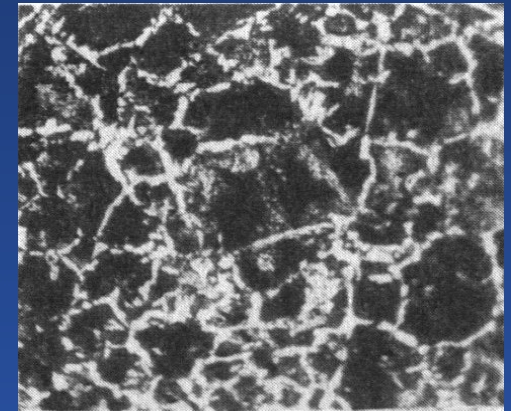
Структуры до и после отжига сталей



а



б



в

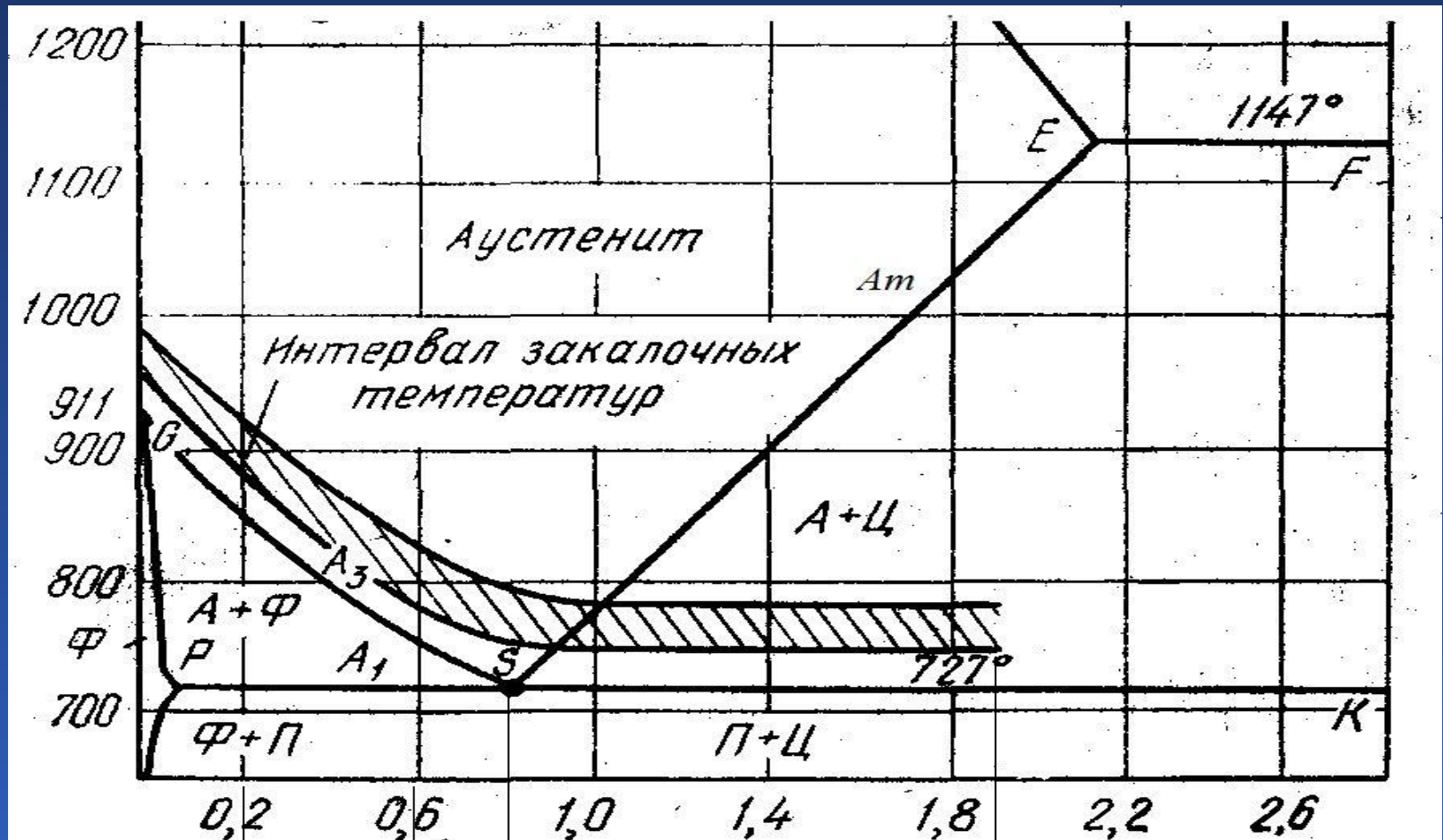
***а* – строчечная структура конструкционной углеродистой стали, х250;**

***б* – микроструктура стали (0,4 % С) после отжига, х300;**

***в* – микроструктура стали (0,4 % С) после нормализации, х300**

Закалка

Интервал температур нагрева под закалку углеродистых сталей



Структура стали:

М	М+Ауст	М+Ауст+Ц
---	--------	----------

Среднее время нагрева деталей из углеродистых сталей под закалку в различных средах

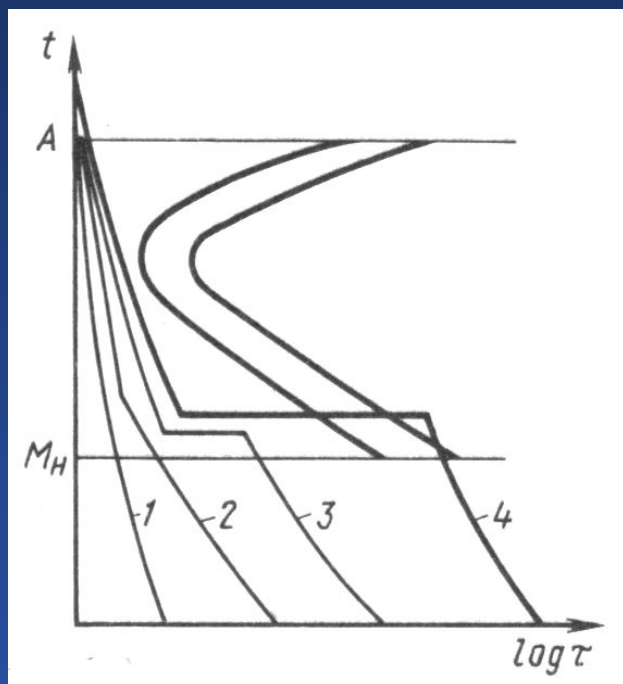
Нагревательные устройства	Температура нагрева, °С	Время нагрева (с) 1 мм диаметра или толщины деталей с сечением		
		круглым	квадратным	прямоугольным
Электрическая печь	800	40–50	50–60	60–75
Пламенная печь	800	35–40	45–50	55–60
То же	1300	15–17	17–19	19–22
Соляная ванна	800	12–15	15–18	18–22
То же	1300	7–8	8–10	10–12

Температуры закалки:

дозвтектоидных сталей – $T = A_{с3} + (30–50 \text{ } ^\circ\text{C})$,
заэвтектоидных сталей – $T = A_{с1} + (30–50 \text{ } ^\circ\text{C})$.

Технология заковки

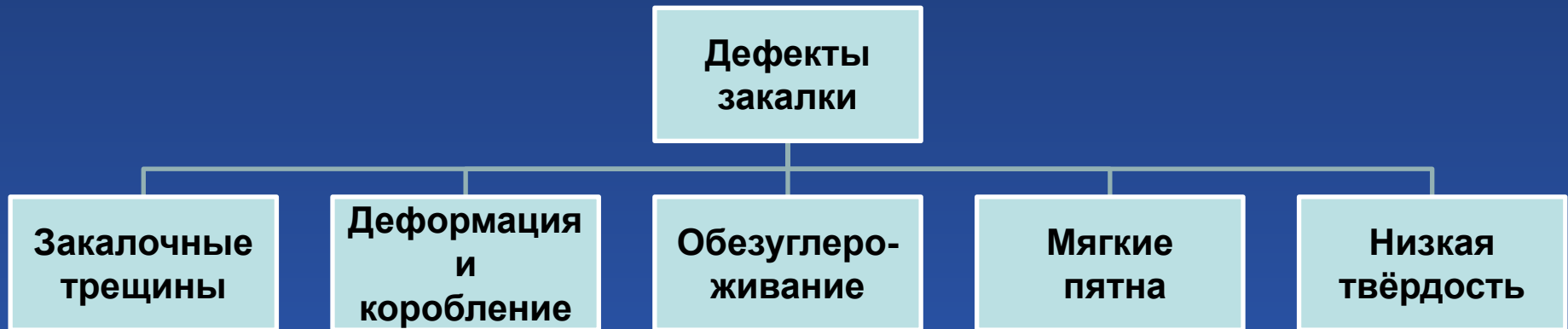
Скорость охлаждения стали в зависимости от закалочных сред



Способы охлаждения при заковке сталей:
1 – непрерывное охлаждение;
2 – заковка в двух средах;
3 – ступенчатая заковка;
4 – изотермическая заковка

Закалочная среда	Скорость охлаждения, град/с, в интервале температур, °C	
	600–500	300–200
Вода:		
при 20 °C (спокойная)	600	270
при 20 °C (циркулирующая)	350	700
при 40 °C (циркулирующая)	100	270
Дистиллированная при 20 °C	250	200
Дистиллированная при 80 °C	30	200
10%-ные водные растворы:		
поваренной соли	1100	300
едкого натра	1200	300
соды (Na ₂ CO ₃)	800	270
Минеральное масло при 20 °C	120	25
Эмульсия (смесь масла и воды)	70	200
Керосин	170	50

Дефекты, возникающие при закалке



Отпуск

Отпуск — термическая обработка закалённой на мартенсит стали, при которой основными процессами являются распад мартенсита и остаточного аустенита.

Отпуск проводят с целью получения более высокой пластичности материала при сохранении приемлемого уровня его прочности.

Низкий (200°C) — применяется для режущего инструмента и штампов холодного деформирования, а также для деталей после поверхностного упрочнения. Структура — мартенсит отпуска.

Средний (400°C) — применяется для упругих элементов (рессор, пружин), а также для штампов горячего деформирования. Структура — троостит отпуска.

Высокий (600°C) — применяется для широкой номенклатуры деталей машин. Даёт оптимальное сочетание прочности и пластичности. Структура — сорбит отпуска.

Закалка с высоким отпуском называется **улучшением**

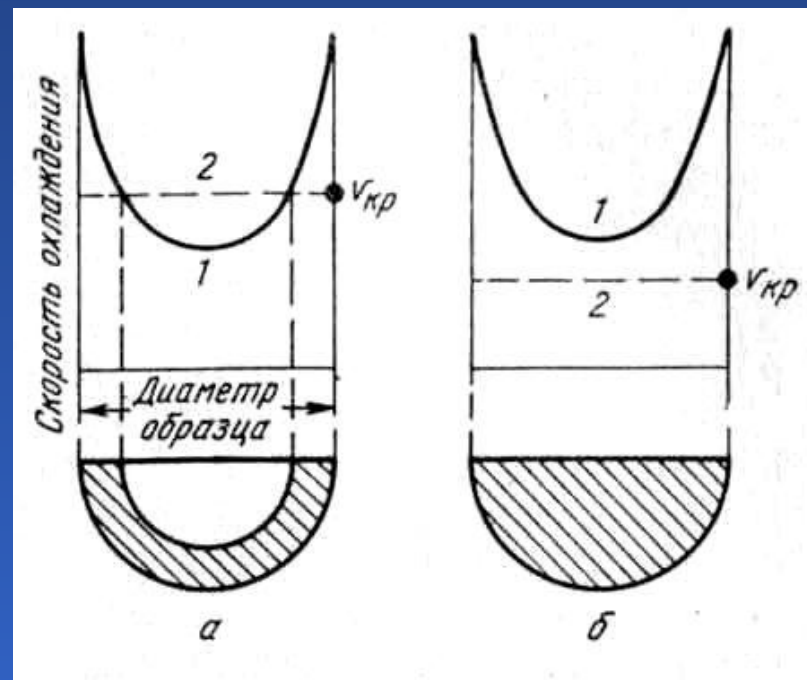
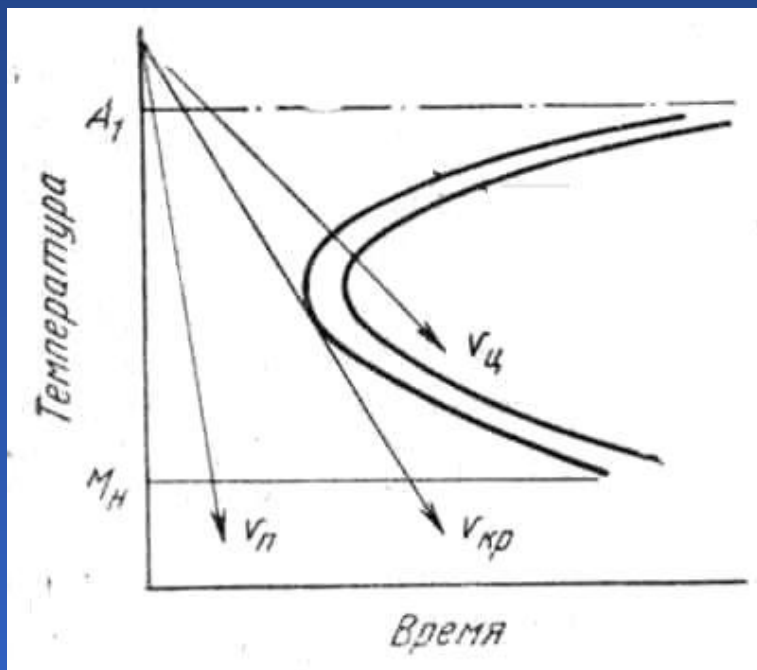
Прокаливаемость

Прокаливаемость - способность стали воспринимать закалку на определённую глубину (единица измерения – мм).

Закаливаемость – уровень твёрдости, достигаемый при закалке стали (единица измерения – HRC).

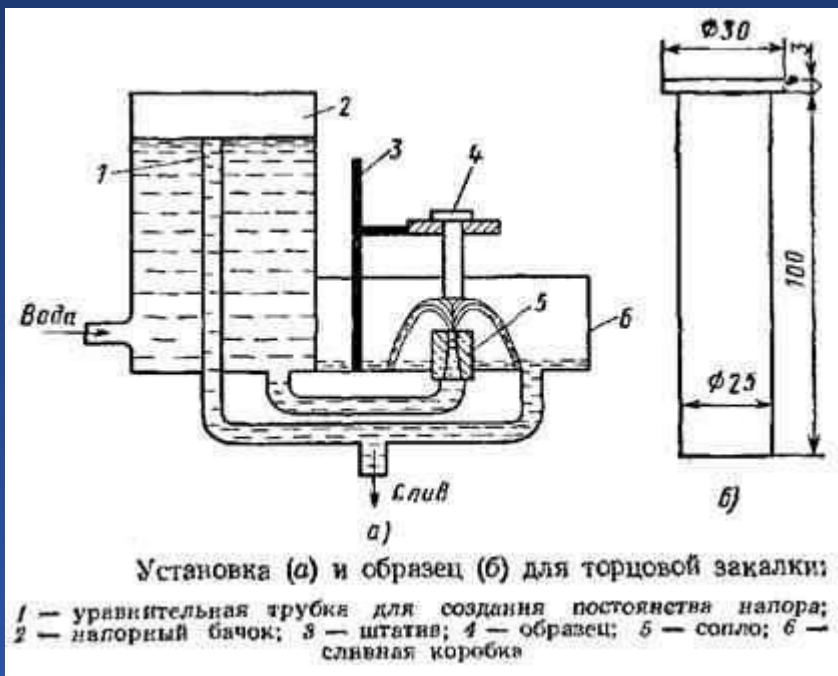
Несквозная прокаливаемость объясняется разными скоростями охлаждения поверхности и центра детали.

За глубину проникновения закалки принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50%M+50%Т).

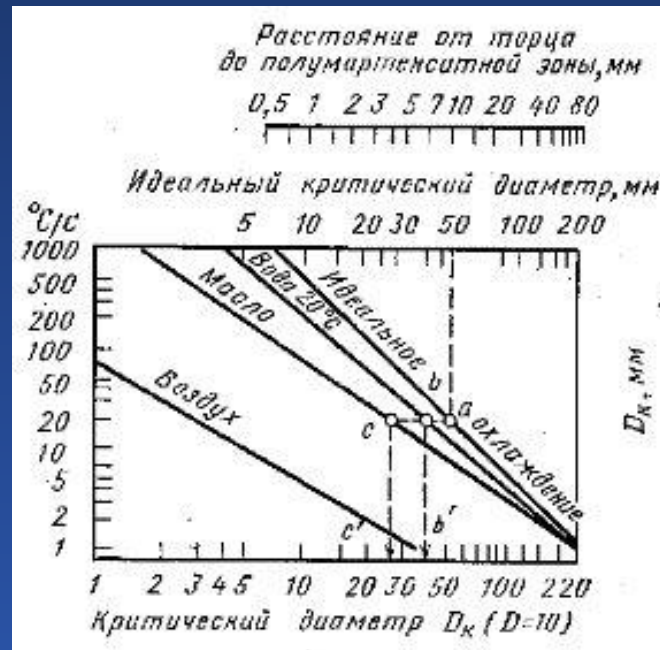


Прокаливаемость

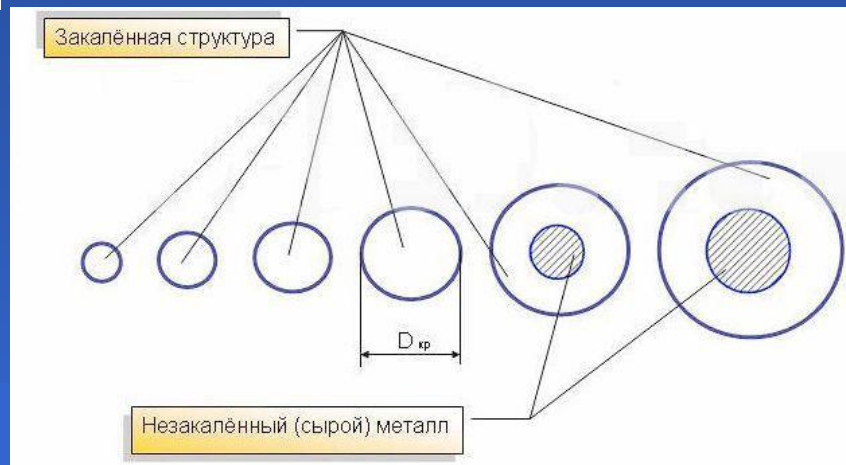
Метод торцевой закали



Номограмма Блантера для определения $D_{кр}$



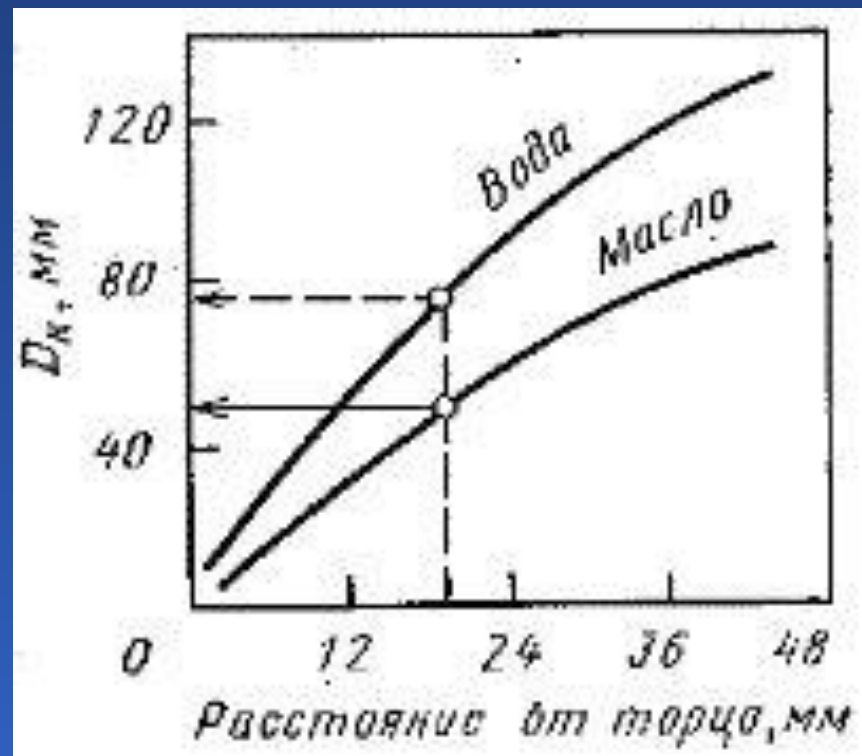
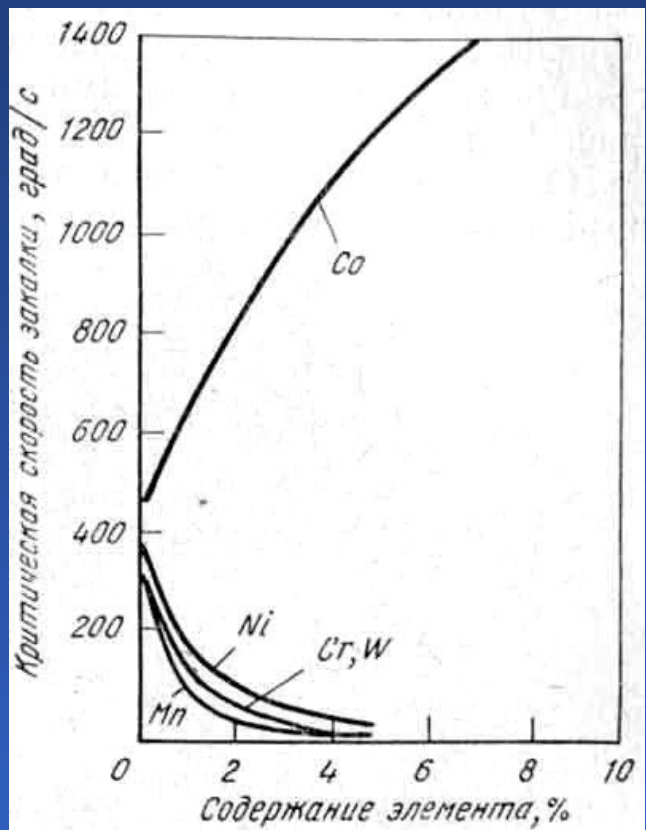
Критический диаметр $D_{кр}$ - диаметр максимального сечения, прокаливающегося насквозь в данном охладителе



Прокаливаемость

На прокаливаемость оказывает влияние:

- Температура нагрева под закалику
- Наличие легирующих элементов
- Вид охлаждающей среды



Поверхностное упрочнение

Методы поверхностного упрочнения:

термические (ТО):

- Газопламенная закалка
- Закалка ТВЧ
- Нагрев в электролите
- Контактный электронагрев
- Упрочнение КПЭ (лазерная, электроннолучевая, плазменная закалка)

химико-термические (ХТО):

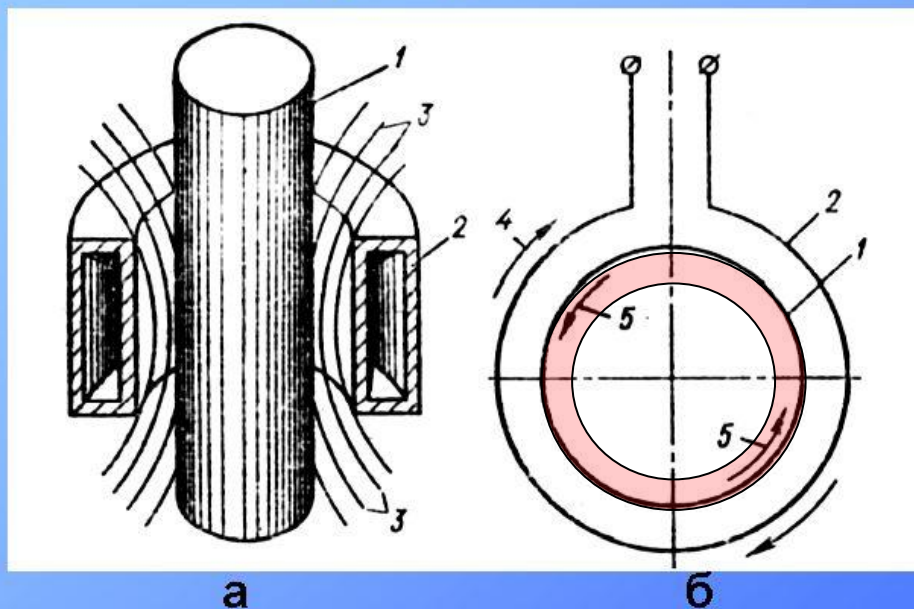
- Цементация, азотирование, борирование, нитроцементация, силицирование, диффузионная металлизация

поверхностного пластического деформирования (ППД):

- Дробеструйная обработка
- Обкатка роликами

Индукционная закалка (закалка ТВЧ)

Схема индукционного нагрева

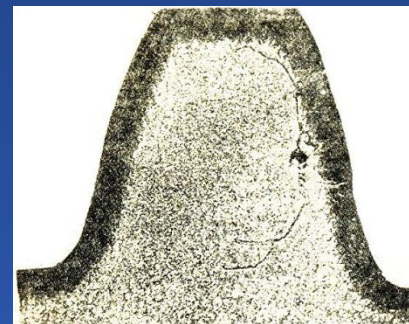


- а – распределение магнитного потока в индукторе;
б – направление токов в индукторе и детали;
1 – нагреваемая деталь; 2 – виток индуктора;
3 – магнитные силовые линии; 4 – направление тока в индукторе; 5 – направление тока в детали

Глубина проникновения тока

$$\delta_{\text{хол.}} = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

Структура



Стали для закалки ТВЧ:

- 40, 40Х, 45ХНМ
- 55ПП

Преимущества закалки ТВЧ:

- ТВЧ закалка экономичней объёмной закалки, т.к. нагревается только необходимый элемент детали плюс уменьшается время закалки;
- ТВЧ закалка позволяет снизить брак по короблению, и появлению трещин;
- ТВЧ закалка не способствует выгоранию углерода и окалинообразованию;
- В зависимости от необходимости, можно менять глубину упрочнённого слоя;
- Механические свойства упрочнённого слоя стали, выше, чем после объёмной закалки.
- Высокая автоматизация и механизация процесса.

Химико-термическая обработка

ХТО – изменение химического состава поверхностного слоя материала при высокой температуре с целью изменения структуры и получения требуемых свойств.

Процессы при ХТО:

- **Диссоциация** (процессы образование активных частиц в насыщающей среде)
- **Адсорбция** (процессы поглощения активных частиц поверхностью обрабатываемого материала)
- **Диффузия** (процессы, развивающиеся в твердом насыщаемом материале).

Цементация

Это химико-термическая обработка, заключающаяся в насыщении поверхностного слоя стали углеродом. Назначение цементации и последующей термообработки – повышение твёрдости, износостойкости и контактной выносливости.

Цементации подвергают стали с содержанием углерода менее 0,3%:

10, 20, 15ХА, 25ХГМ, 20Х2Н4А, 18Х2Н4МА.

Толщина цементованного слоя – 0,3–1,5 мм.

Содержание углерода в поверхностном слое – до 1,2%

Твёрдость поверхности – 56-60 HRC.

Твёрдость основы – от 20 до 40 HRC.

Цементация в твёрдом карбюризаторе:

$T = 910-930^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10-15$ ч.

Состав смеси – древесный уголь, 20% BaCO_3 , 2% CaCO_3



Газовая цементация:

$T = 930-950^{\circ}\text{C}$, $\tau = 5-8$ ч.

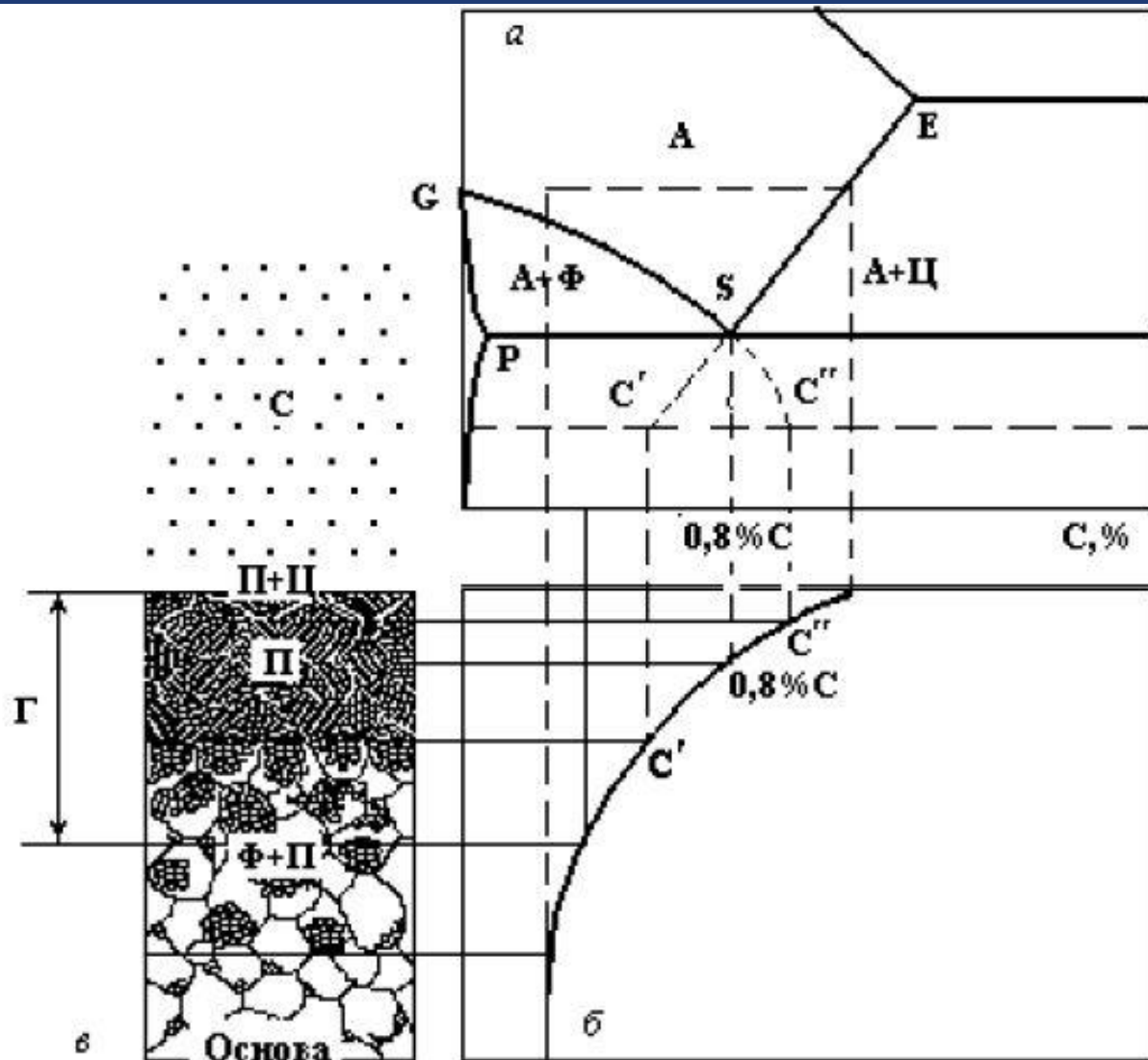
Используется природный газ или жидкие углеводороды



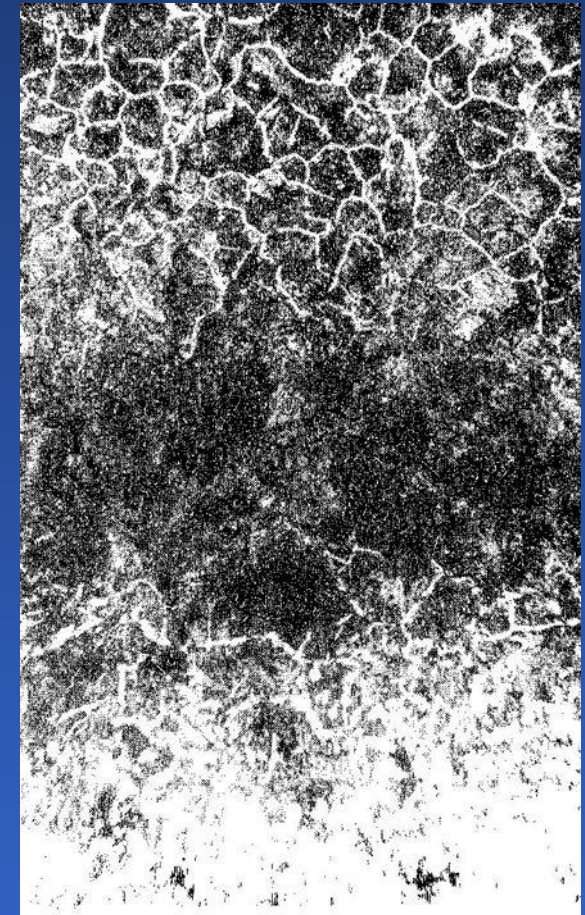
Структура цементованного слоя

До цементации: $\Phi + \Pi$

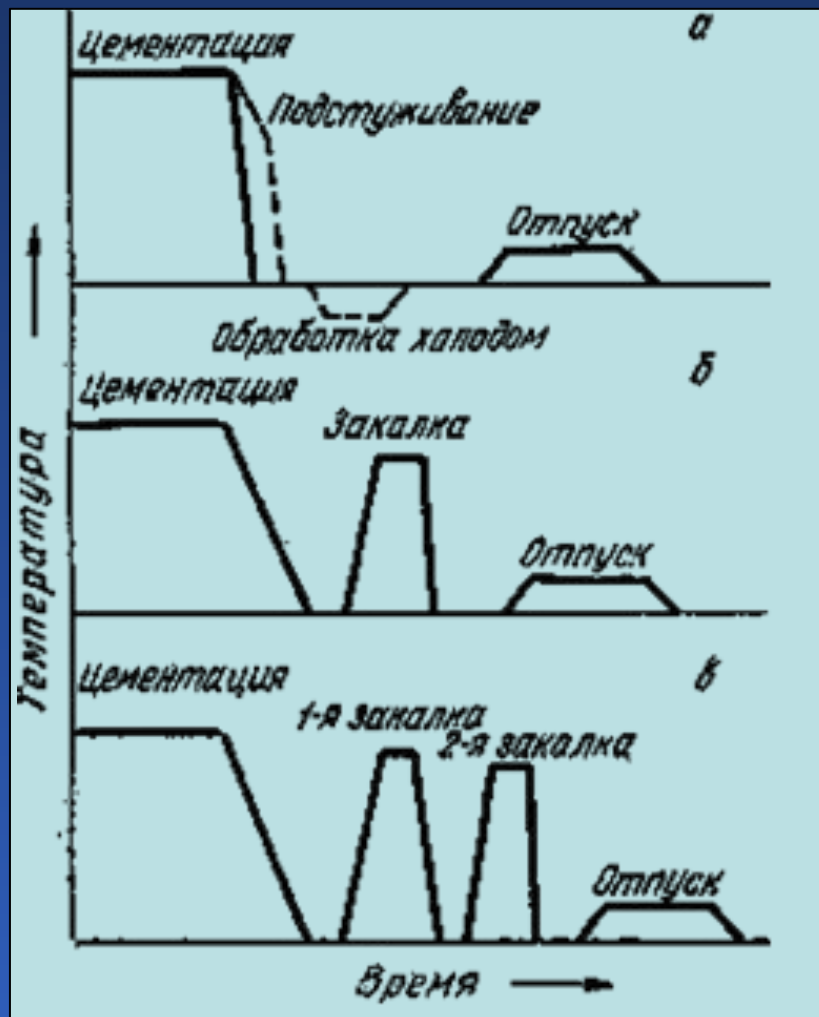
После цементации: $\Pi + \text{Ц}$, Π , $\Pi + \Phi$.



x100

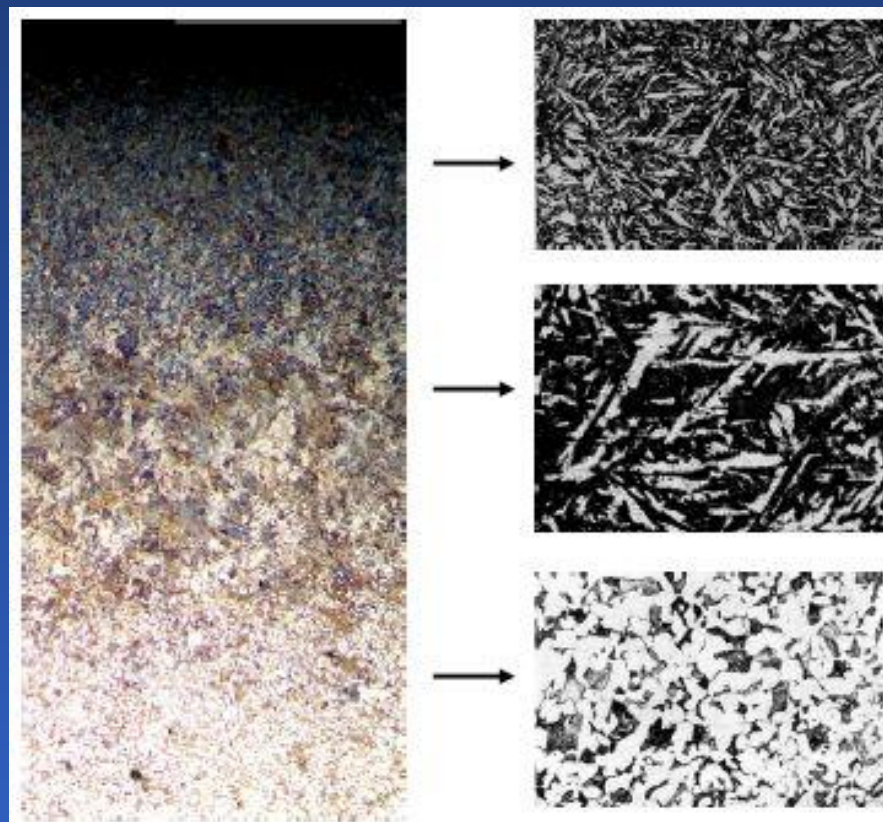


Термообработка стали после цементации



- а) закалка с цементационного нагрева
- б) для НМС
- в) для НКС

Структура после ТО:
Поверхность: М+Аост+Ц;
Основа: Ф+П, Б или М (зависит от степени легированности стали)



x50

x500

Азотирование

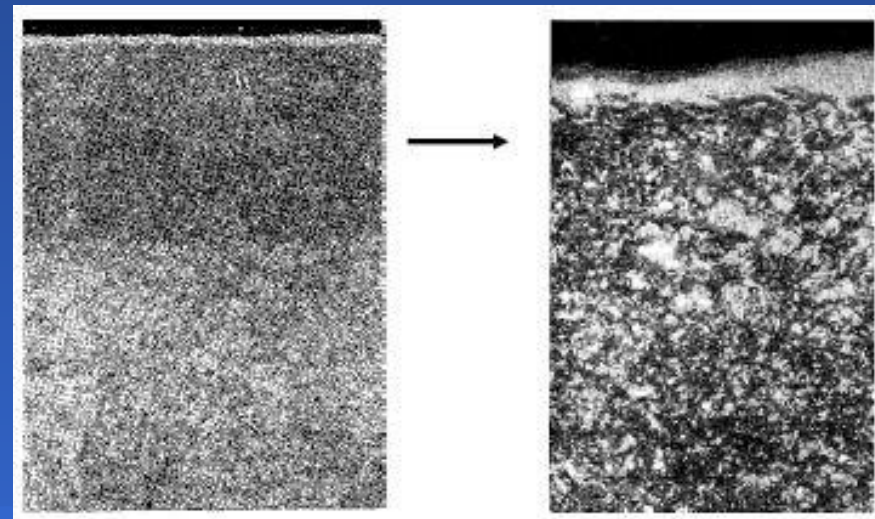
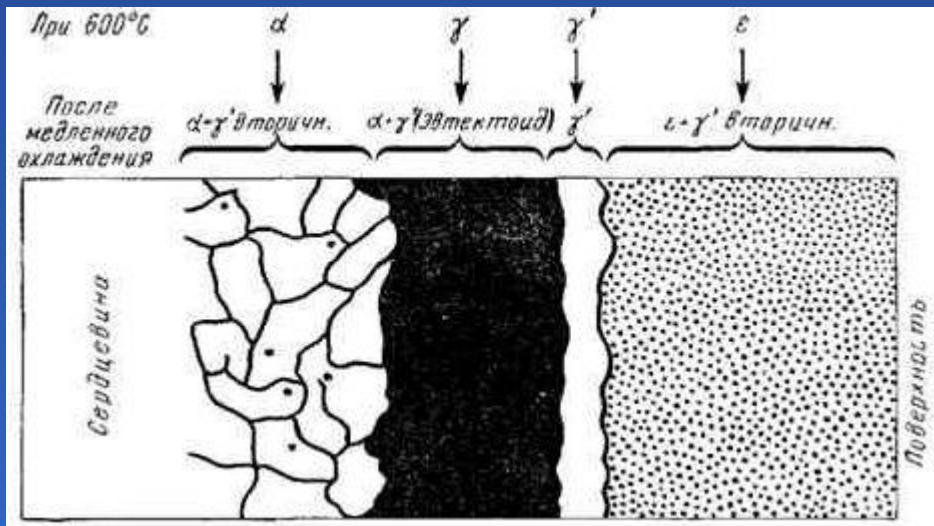
Азотирование – химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои стали насыщаются азотом. При азотировании увеличиваются твердость и износостойкость, также повышается коррозионная стойкость.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак NH_3 . При нагреве аммиак диссоциирует по реакции: $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$. Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.

Для азотирования используют стали, содержащие Al, Mo, Cr, Ti. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

Типовые азотируемые стали: 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2Н3Ю.

Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпуском). После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.



Азотирование

- для повышения поверхностной твердости и износостойкости

$T = 500 \dots 560^\circ\text{C}$, $\tau = 24 \dots 90$ часов, скорость азотирования составляет $0,01$ мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет $10 \dots 12\%$, толщина слоя $h = 0,3 \dots 0,6$ мм. Твердость поверхности - около 1000 HV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом (контейнерной установкой) возбуждается тлеющий разряд. Катодное распыление осуществляется в течение $5 \dots 60$ мин при напряжении $1100 \dots 1400$ В и давлении $0,1 \dots 0,2$ мм рт. ст., рабочее напряжение $400 \dots 1100$ В, продолжительность процесса до 24 часов.



- антикоррозионное азотирование проводят и для легированных, и для углеродистых сталей. $T = 650 \dots 700^\circ\text{C}$, $\tau = 10$ часов. На поверхности образуется слой ϵ — фазы толщиной $0,01 \dots 0,03$ мм, который обладает высокой стойкостью против коррозии (ϵ -фаза — твердый раствор на основе нитрида железа Fe_3N , имеющий гексагональную решетку).

Цианирование и нитроцементация

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

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



Цианированный слой обладает высокой твердостью 58...62 HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость. Продолжительности процесса 0,5...2 часа.

Высокотемпературное цианирование – проводится при $T = 800...950^\circ \text{C}$, сопровождается преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6...1,2 %, (жидкостная цементация). Содержание азота в цианированном слое 0,2...0,6 %, толщина слоя 0,15...2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску. Окончательная структура цианированного слоя состоит из тонкого слоя карбонитридов $\text{Fe}_2(\text{C}, \text{N})$, а затем азотистый мартенсит.

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

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

Цианирование и нитроцементация

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

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

Высокотемпературная нитроцементация проводится при $T = 830...950^{\circ}C$, для деталей из углеродистых и малолегированных сталей при повышенном содержании аммиака. Завершающей термической обработкой является закалка с низким отпуском. Твердость достигает 56...62 HRC.

Низкотемпературной нитроцементации подвергают инструмент из быстрорежущей стали после термической обработки (закалки и отпуска). Процесс проводят при $T = 530...570^{\circ}C$, в течение 1,5...3 часов. Образуется поверхностный слой толщиной 0,02...0,004 мм с твердостью 900...1200 HV.

Нитроцементация характеризуется безопасностью в работе, низкой стоимостью.

Легированные стали

Легирующие элементы – химические элементы, специально вводимые в сталь для получения заданных свойств. Улучшают механические, физические и химические свойства основного материала. Сталь с легирующими добавками называется **легированной**. Нужный комплекс свойств достигается не только легированием стали, но и рациональной термической обработкой, в результате которой получается необходимая структура. Легированием можно повысить предел текучести, ударную вязкость, относительное сужение и прокаливаемость, а также существенно снизить скорость закалки, порог хладноломкости, деформируемость изделий и возможность образования трещин. В изделиях крупных сечений (диаметром свыше 15...20 мм) механические свойства легированных сталей значительно выше, чем механические свойства углеродистых сталей.

Легирующие элементы существенно повышают стоимость стали, а некоторые из них к тому же являются дефицитными металлами, поэтому добавление их в сталь должно быть строго обосновано.

По степени легированности:

- низколегированные (2,5-5 % ЛЭ),
- среднелегированные (до 10 % ЛЭ),
- высоколегированные (более 10 % ЛЭ).

По применению:

- Конструкционные (строительные, котельные, цементуемые, рессорно-пружинные, улучшаемые, подшипниковые)
- Инструментальные (для режущего, штампового и измерительного инструмента)
- С особыми свойствами (коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, хладостойкие, магнитомягкие и т.д.)

Роль легирующих элементов

Хром повышает прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твердости стали, увеличивает коррозионную стойкость.

Бор (0,003%) увеличивает прокаливаемость, повышает порог хладноломкости.

Марганец увеличивает прочность, прокаливаемость, однако содействует росту зерна и повышает порог хладноломкости.

Титан (~0,1%) вводят для измельчения зерна в хромомарганцевой стали.

Молибден (0,15...0,46%) повышает прокаливаемость, снижает порог хладноломкости, увеличивает статическую, динамическую и усталостную прочность стали, устраняет склонность к внутреннему окислению. Кроме того, молибден снижает склонность к отпускной хрупкости сталей, содержащих никель.

Ванадий (0,1...0,3) % в хромистых сталях измельчает зерно и повышает прочность и вязкость.

Никель значительно повышает прочность и прокаливаемость, понижает порог хладноломкости, но при этом повышает склонность к отпускной хрупкости. Хромоникелевые стали, обладают наилучшим комплексом свойств. Однако никель является дефицитным, и применение таких сталей ограничено. Значительное количество никеля можно заменить медью, это не приводит к снижению вязкости.

Влияние легирующих элементов на механические и технологические свойства сталей

ЛЭ	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	HB	KCU	σ_{-1}	Dкр	Св	КС
C	++	+	--	+	-	-	+	-	0
Mn	+	+	-	+	-	+	+	0	+
Si	+	+	-	+	--	0	+	-	-
Ni	+	+	0	+	+	0	++	+	++
Cr	+	+	-	++	0	0	+	-	++
Cu	0	0	0	0	0	0	0	0	++
Nb	++	++	-	+	0	+	++	+	0
V	+	+	-	+	0	++	+	+	+
Mo	+	+	-	+	0	++	+	+	+
B	++	++	-	+	-	+	+	0	0
Ti	+	+	0	+	-	0	+	+	0
P	+	+	--	+	--	0	+	--	-
N	++	++	--	++	--	-	+	-	0

Взаимодействие легирующих элементов с углеродом

- Некарбидообразующие

Al, Si, Ni, Co, Cu

- Карбидообразующие

Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Zr, Ti



способность к карбидообразованию

Типы карбидов:

Простые Me_3C .

Образуют Mn, Cr, W при растворении в цементите – $(Fe, Me)_3C$

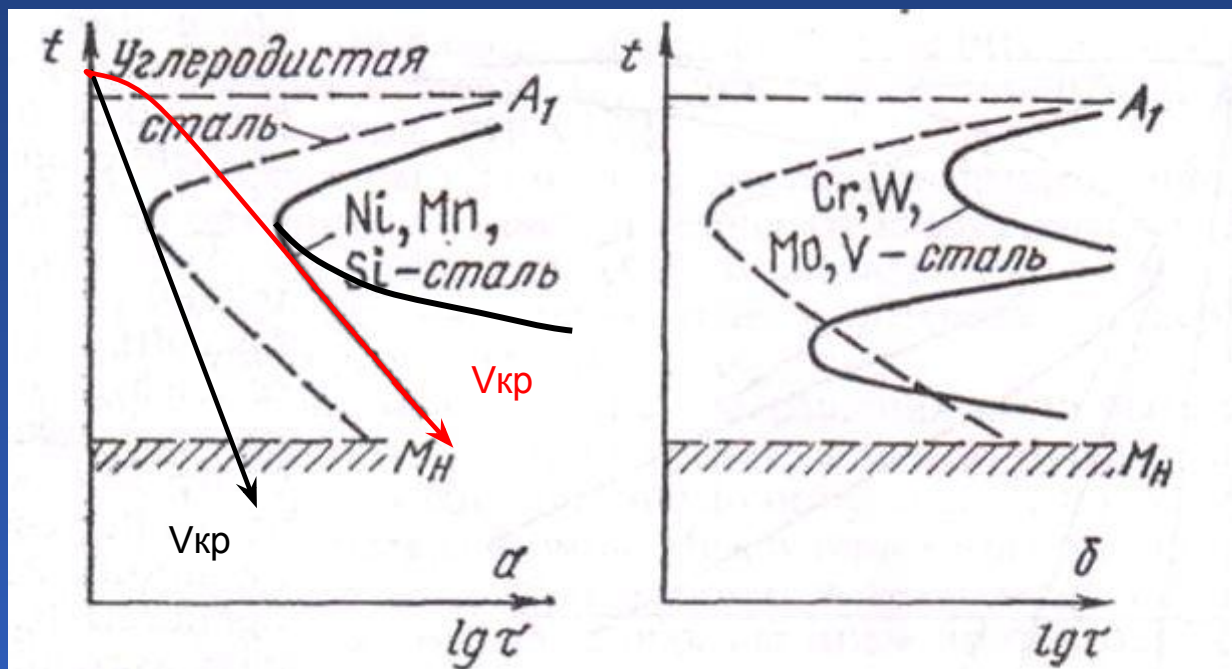
Специальные

Cr: $Me_{23}C_6$, Me_7C_3

Mo, W, V, Nb, Ti: MeC , Me_2C

Влияние легирующих элементов на диаграмму изотермического превращения аустенита

Большинство легирующих элементов увеличивают устойчивость переохлаждённого аустенита, сдвигая С-образные кривые вправо. Это приводит к уменьшению критической скорости заковки



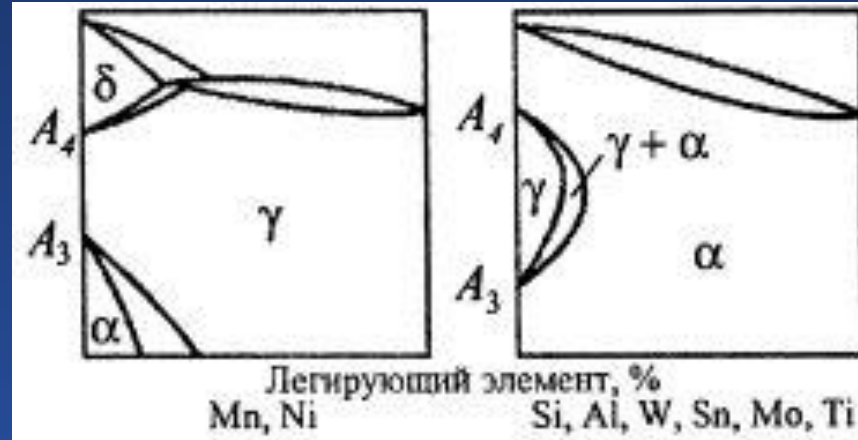
некарбидообразующие

карбидообразующие

Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа и устойчивость аустенита

γ -стабилизаторы

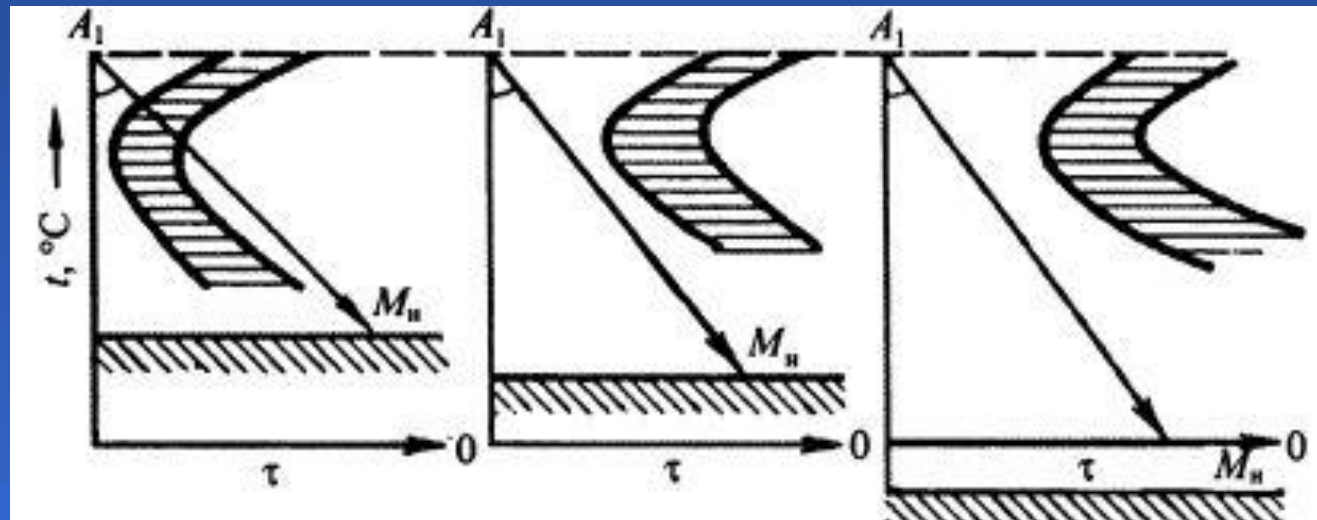
α -стабилизаторы



перлит

мартенсит

аустенит



Структурные классы легированных сталей

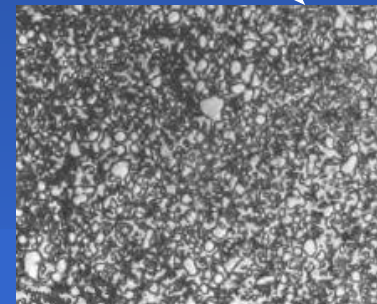
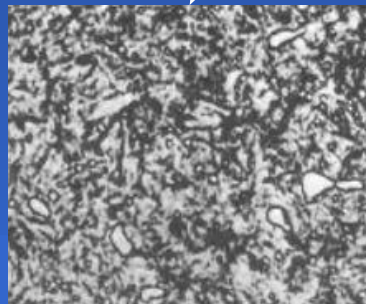
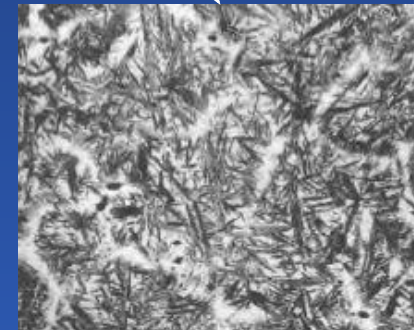
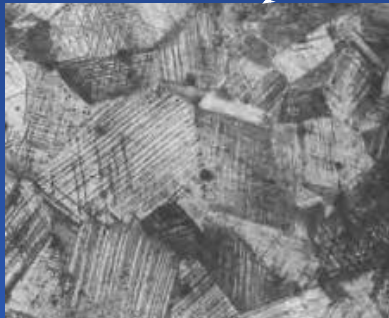
В равновесном состоянии:

- Доэвтектоидные
- Эвтектоидные
- Заэвтектоидные
- Аустенитные
- Ферритные
- Ледебуритные

перлитные

После нормализации:

- Перлитные
- Аустенитные
- Ферритные
- Мартенситные
- Карбидные



x100

Маркировка легированных сталей

В России стали маркируются цифрами и буквами русского алфавита.

Цифры в начале марки означают среднее содержание углерода:

- Конструкционные и с особыми свойствами – содержание С в сотых долях %:
40ХНМ, 110Г13Л
- Инструментальные – содержание С в десятых долях %: **9ХС, ХВГ**

Буквы обозначают либо наименование легирующего элемента, либо классификацию стали по способу выплавки, применению, особым свойствам.

После букв, соответствующих легирующим элементам, указывается их среднее содержание в целых процентах. Если число отсутствует, то этого элемента ~1%.

«Сильнодействующие» ЛЭ, наличие которых отражается в марке, несмотря на их малое количество : **N, Nb, B, Zr, V**

Маркировка легированных сталей

А – автоматная (А40) - азот (16Г2АФ) - высококачественная (30ХГСА)

Б – Nb (10Г2Б)

В – W (ХВГ)

Г – Mn (110Г13Л)

Д – Cu

Е – магнито-твёрдая (ЕХ9К15М2) - Se в автоматной (А40Е)

К – Co (Р10Ф5К5) - котельная (22К)

Л – Be - для отливок (110Г13Л)

М – Mo (45ХНМ)

Н – Ni

П – P

Р – быстрорежущая (Р6М5, 6%W) - В (20ХГР, 0,005%В)

С – строительная (С540) - Pb в автоматной (АС12ХН), Si (9ХС)

Т – Ti

Ф – V

Х – Cr

Ц – Zr - Ca в автоматной (АЦ40Г) - цепная

Ч – P3M

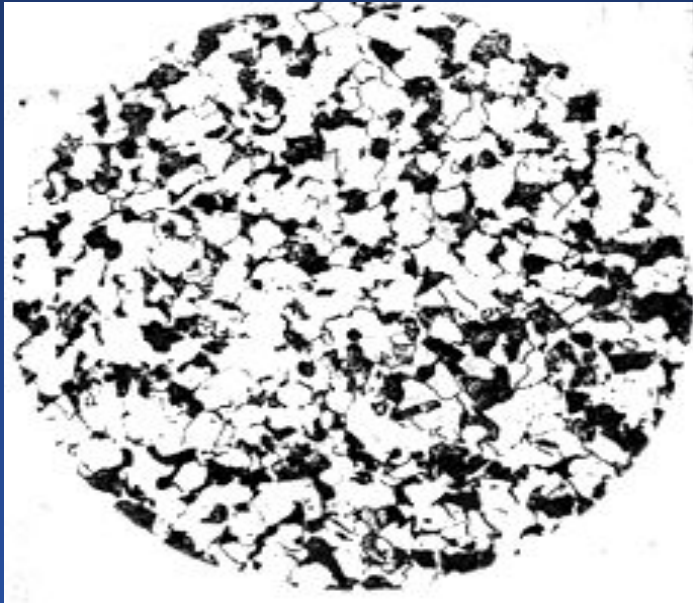
Ш – шарикоподшипниковая (ШХ15, 1,5%Cr) - , особовысококачественная (30ХГСА-Ш)

Э – электротехническая

Ю – Al (38Х2МЮА)

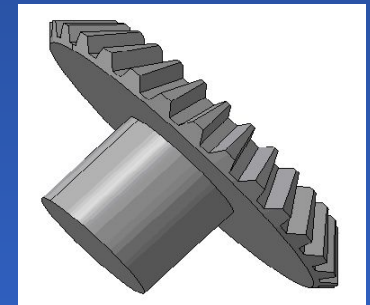
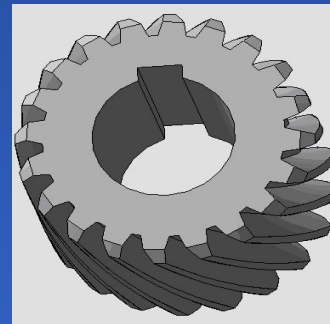
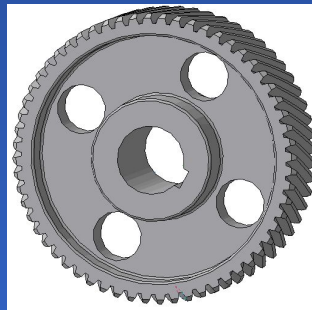
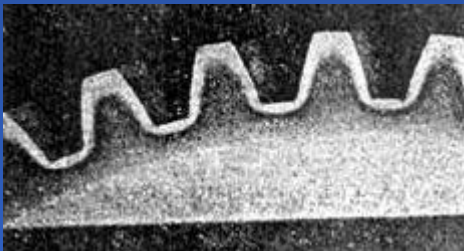
Конструкционные легированные стали

Цементуемые стали



- Содержание углерода: менее 0,3%.
- Марки: 20ХН, 18ХГТ, 15Х, 15ХФ, 25ХГМ и т. д.
- Исходная структура: феррит + перлит.
- Температура цементации: 930–950 °С.
- Температура закалки 770–880 °С, охлаждение в воде.
- Температура отпуска 150–160 °С, охлаждение на воздухе (мартенсит отпуска, 61–63 HRC).
- Применение: поршневые пальцы, толкатели, крестовины карданного шарнира, конические и цилиндрические шестерни коробок передач.

Шестерни коробок передач

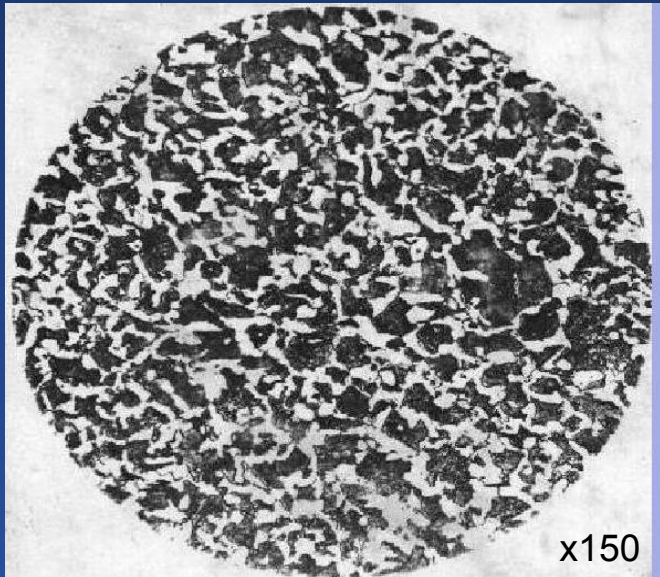


Свойства цементуемых сталей

Марка стали	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж/м ²
	МПа		%		
	Не менее				
15Х	700	500	12	45	0,7
15ХФ	750	550	13	50	0,8
30ХГТ	1500	1300	9	40	0,6
25ХГМ	1200	1100	10	45	0,8
12ХМ3А	950	700	11	55	0,9
12Х2Н4А	1150	950	10	50	0,9

Улучшаемые стали (ГОСТ 4543–51)

Исходная структура



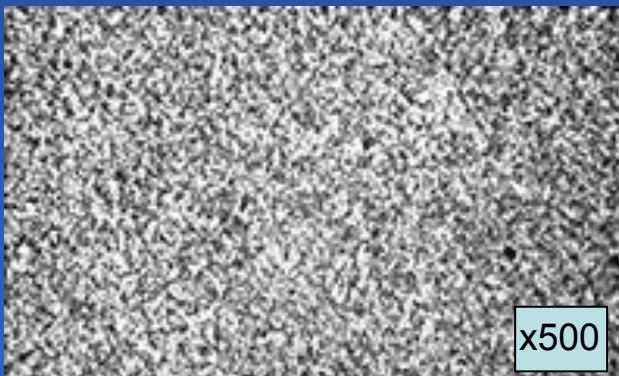
Марки сталей: 40Х, 40ХН, 40ХГРТ, 40ХН2МА, 50Х и т. д.

Исходная структура: феррит + перлит.
Температура закали 860 °С,
охлаждение в масле.

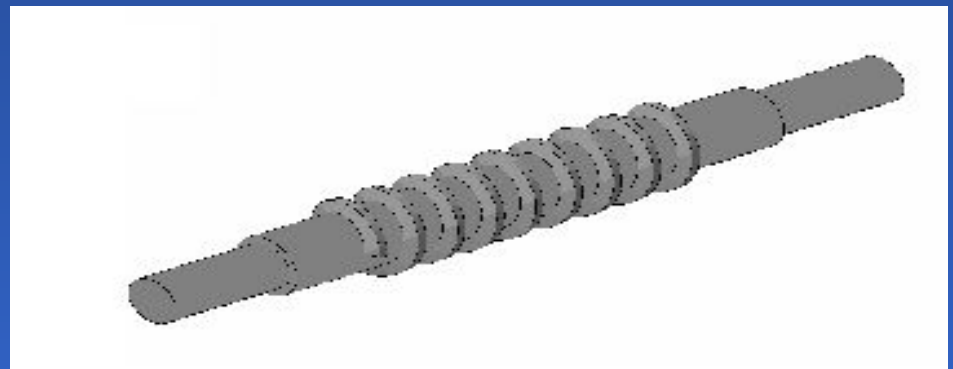
Температура отпуска 550–600 °С,
охлаждение в воде, масле или
на воздухе (сорбит, 30–40 HRC).

Применение: валы, шестерни коробок
передач, червяки.

После улучшения



Червячный вал коробки передач



Свойства улучшаемых сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_B МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
40ХН	760	910	20	60	0,8
30ХН3А	830	930	21	64	1,4
40ХН2МА	930	1070	13	55	1,0
38ХН3МФА	1100	1200	12	50	0,8
18Х2Н4МА	710	940	19	70	1,8

Строительные стали

Предназначены для изготовления мостов, ферм, трубо газ- и нефтепроводов и других конструкций.

Требования к сталям:

- малая склонность к хрупким разрушениям;
- хорошая свариваемость, для ее обеспечения содержание углерода не должно превышать 0,18 %.
- обрабатываемость резанием.

В качестве строительных сталей используют:

- углеродистые стали обычного качества (Ст0... Ст6)
- низколегированные стали.

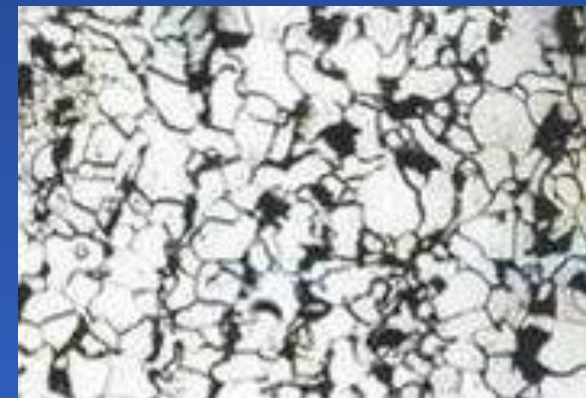
Низколегированные стали содержат не более 0.18 % С и в небольших количествах - Si, Mn, V, Cr, Ni, Nb и Cu.

Состав и свойства низколегированных сталей.

марка стали	Содержание , %				Свойства без термообработки		
	С	Si	Mn	Другие	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
09Г2	≤ 0.12	0.17-0.37	1.4-1.8		450	310	21
09Г2С	≤ 0.12	0.5-0.8	1.3-1.4		480	330	21
17ГС	0.14-0.20	0.4-0.6	1.0-1.5		500	340	19
15ХСНД	0.12-0.18	0.4-0.7	0.4-0.7	Cr 0.6-0.9 Ni 0.3-0.6 Cu 0.2-0.4	500	350	21

Низколегированные стали подвергают нормализации (09Г2С, 17ГС), а также закалке и отпуску (15ХСНД).

Структура стали 09Г2С после нормализации



x150

Рессорно-пружинные стали

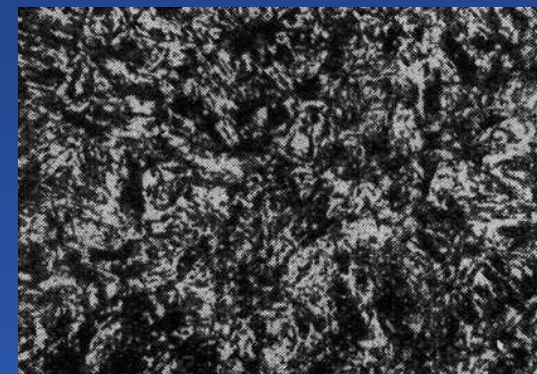
Требования к сталям: высокое сопротивление малым пластическим деформациям (предел упругости) и высокий предел усталости при достаточной пластичности.

Содержание углерода: 0,5 – 0,7%.

Термическая обработка: закалка от 820-860°C в масло + средний отпуск 410-480°C

Состав, структура и свойства рессорно-пружинных сталей:

Марка стали	Содержание, %				
	C	Si	Mn	Cr	другие
углеродистые					
65	0,62-0,70	0,17-0,37	0,5-0,8	-	-
75	0,72-0,80	0,17-0,37	0,5-0,8	-	-
кремнистые					
50C2	0,47-0,55	1,50 -2,00	0,6 -0,9	-	-
60C2	0,57-0,65	1,50 -2,00	0,6 -0,9	-	-
60C2ХА	0,56-0,64	1,40-1,80	0,4 - 0,7	0,70-1,00	-
60C2ХФА	0,56-0,64	1,40-1,80	0,4 - 0,7	0,90-1,20	V 0,1-0,2
хромистые и хромомарганцевые					
50ХФА	0,46-0,54	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,1	V 0,1-0,2
50ХГФА	0,48-0,54	0,17-0,37	0,8-1,0	0,95-1,1	V 0,1-0,2

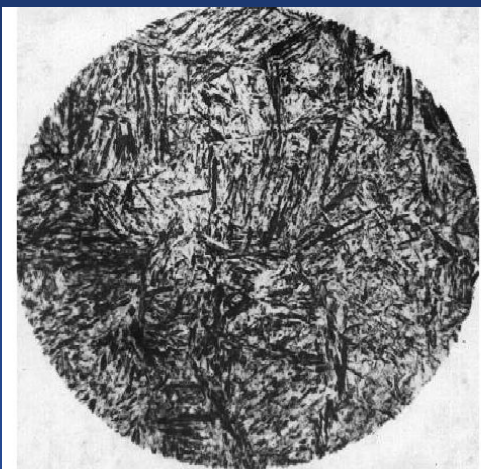


x500



Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_B МПа	δ %	ψ %
65	Закалка от 840°C, масло + отпуск (480°C)	800	1100	10	35
60C2	Закалка от 870°C, масло + отпуск (460°C)	1200	1300	6	30
60C2ХФА	Закалка от 950°C, масло + отпуск (450°C)	1680	1820	7	30

Подшипниковые стали (ГОСТ 801–78)



Мартенсит, ×300

Требования: высокие твёрдость, износостойкость, контактная выносливость

Марки: ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС и др.

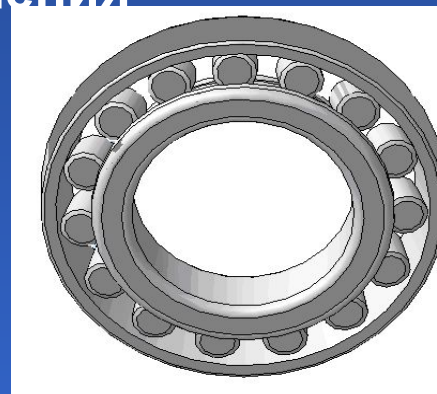
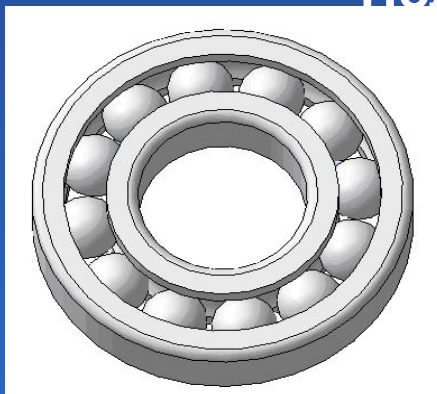
Исходная структура: перлит + цементит.

Температура закалки 840–860 °С, охлаждение в масле (мартенсит).

Температура отпуска 150–170 °С, охлаждение в масле (мартенсит отпуска, 61–64 HRC).

Применение: подшипники качения.

Подшипники качения



Трубные стали

Класс прочности	Марка стали	Диаметр труб, мм	Толщина стенки труб, мм	Механические свойства			Ударная вязкость, Дж/см ² (кгс/см ²) (при температуре испытания, градус С), не менее на образцах с надрезом		Доля вязкой составляющей, ДВТТ, % (при температуре градус С), не менее
				Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Предел текучести σ_T , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Относительное удлинение, S_5 , %	КСИ	КСУ	
K50	12Г2С	530	7,0-10,0	490 (50)	340 (35)	20	29,4 (3,0) (-40С)	29,4 (3,0) (0С)	-
K50	12Г2С	530	11,0-12,0	490 (50)	340 (35)	20	39,2 (4,0) (-40С)	29,4 (3,0) (0С)	-
K50	09Г2С	530	7,0-12,0	490 (50)	340 (35)	20	29,4 (3,0) (-60С)	29,4 (3,0) (-20С)	-
K52	17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У	530	7,0-16,0	510 (52)	350 (36)	20	29,4 (3,0) (-40С)	29,4 (3,0) (0С)	-
K52	13ГС	530	8,0-15,0	510 (52)	360 (37)	20	29,4 (3,0) (-40С)	29,4 (3,0) (0С)	-
K52	13ГС	530	св.15,0-24,0	510 (52)	360 (37)	20	39,2 (4,0) (-40С)	29,4 (3,0) (0С)	-
K52	08ГБЮ	530	7,0-14,0	510 (52)	350 (36)	20	39,2 (4,0) (-60С)	39,2 (4,0) (-20С) или (-40С)*	-
K52	12ГСБ	530	7,0-14,0	510 (52)	350 (36)	20	39,2 (4,0) (-60С)	39,2 (4,0) (-20С)	-
K52	13ГС-У	530	7,0-15,0	510 (52)	360 (37)	20	29,4 (3,0) (-60С)	29,4 (3,0) (-15С)	-
K52	13ГС-У	530	св.15,0-24,0	510 (52)	360 (37)	20	39,2 (4,0) (-60С)	29,4 (3,0) (-15С)	-
K54	13Г2АФ	530	8,0-12,0	530 (54)	360 (37)	20	29,4 (3,0) (-60С)	29,4 (3,0) (-5С)	-
K55	13Г1С-У	530	8,0-15,0	540 (55)	390 (40)	19	29,4 (3,0) (-60С)	29,4 (3,0) (-15С)	-
K55	13Г1С-У	530	св.15,0-24,0	540 (55)	390 (40)	19	39,2 (4,0) (-60С)	29,4 (3,0) (-15С)	-
K56	09ГБЮ	530	7,0-14,0	550 (56)	380 (39)	20	39,2 (4,0) (-60С)	39,2 (4,0) (-20С) или (-40С)*	-
K56	12Г2СБ	530	7,0-14,0	550 (56)	380 (39)	20	39,2 (4,0) (-60С)	39,2 (4,0) (-20С)	-
K56	09Г2ФБ	530	12,0-24,0	550 (56)	430 (44)	20	39,2 (4,0) (-60С)	39,2 (4,0) (-20С)	-
K58	13Г1СБ-У	530	12,0-15,0	570 (58)	470 (48)	20	29,4 (3,0) (-60С)	49,0 (5,0) (-5С)	-

ПРОИЗВОДСТВО БЕСШОВНЫХ ТРУБ (СХЕМА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ)

- Подготовка лома
- Подготовка раскислителей, материалов и ферросплавов
- Загрузка сталеплавильной печи

1. Плавка



2. Внепечная обработка стали в печь-ковше



3. Вакуумирование (применяется для высококачественных марок стали)



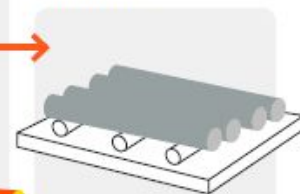
4. Непрерывная разливка стали. Получение трубной заготовки



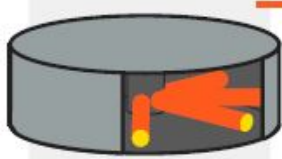
5. Разрезка заготовок



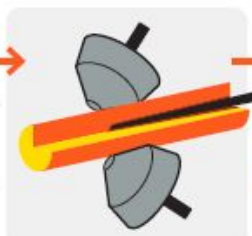
6. Охлаждение и маркировка заготовок



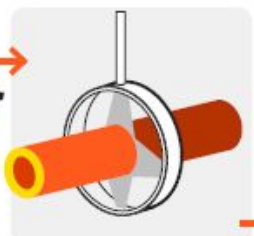
7. Нагрев заготовки в кольцевой печи



8. Прошивка заготовки



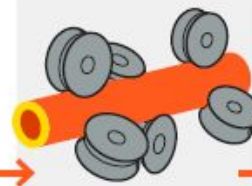
9. Гидросбив окалины



10. Калибровочный стан PQF®



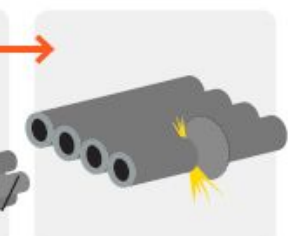
11. Редукционно-растяжной стан



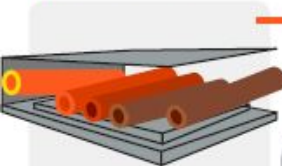
12. Охлаждение



13. Пакетная резка



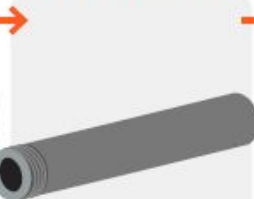
14. Термообработка (закал + отпуск)



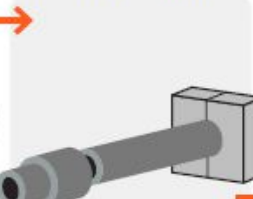
15. Контроль качества



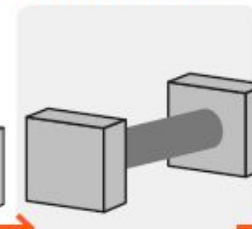
16. Нарезка и контроль резьбы



17. Навинчивание муфт и шаблонирование



18. Гидроиспытания



19. Навинчивание предохранительных деталей и нанесение антикоррозийного покрытия



20. Складирование



Стали с особыми свойствами

Коррозионно-стойкие стали

Коррозия – разрушение материала под действием окружающей среды («**corrodere**» – пожирать, изглаживать).

Виды коррозии:

- Химическая (газовая);
- Электрохимическая;
- Биологическая.

Электрохимическая коррозия имеет место в присутствии электролитов.

Ионы металла на поверхности детали, имея слабую связь с глубинными ионами, легко отрываются от металла молекулами воды. Металл, потеряв часть положительно заряженных ионов, заряжается отрицательно за счет избыточного количества оставшихся электронов. Одновременно слой воды, прилегающий к металлу, приобретает положительный заряд. Разность зарядов на границе металл – вода обуславливает скачок потенциала. Возникает **гальваническая пара**. Металлы, стандартный потенциал которых отрицательный – корродируют в воде, в которой растворен кислород тем активнее, чем отрицательней значение электрохимического потенциала.

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

Межкристаллитная коррозия – микрогальваническая пара возникает между телом и границей зерна.

Коррозионно-стойкие стали

Повышению коррозионной стойкости способствует:

- Наличие на поверхности защитной плёнки оксидов;
- Содержание Cr в твёрдом растворе более 12%;
- Однофазная структура.

Коррозионно-стойкие стали ферритного класса

Стали ферритного класса **08X13**, **12X17**, **08X25T**, **15X28**. Стали с повышенным содержанием хрома не имеют фазовых превращений в твердом состоянии и поэтому не могут быть подвергнуты закалке. Они склонны к межкристаллитной коррозии (по границам зерен) из-за обеднения хромом границ зерен. Для избежания этого вводят небольшое количество Ti. Межкристаллитная коррозия обусловлена тем, что часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом и образует карбиды. Концентрация хрома в твердом растворе у границ становится меньше 13% и сталь приобретает отрицательный потенциал.

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

Для повышения механических свойств ферритных хромистых сталей в них добавляют 2...3 % Ni. Стали **10X13H3**, **12X17H2** используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах.

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

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

Коррозионно-стойкие стали мартенситного и аустенитного классов

Стали мартенситного класса 20X13, 30X13, 40X13. После закалки и отпуска при 180...250°C стали имеют твердость 50...60 HRC и используются для изготовления режущего инструмента (хирургического), пружин для работы при температуре 400...450°, предметов домашнего обихода.

Стали аустенитного класса – высоколегированные хромоникелевые стали. После охлаждения на воздухе до комнатной температуры имеет структуру аустенита.

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

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

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

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

Химический состав (ГОСТ 5632–72) и механические свойства хромистых коррозионно-стойких сталей

Марка стали	Класс	Содержание элементов (остальное Fe),%		σ_B , МПа, после			δ , %, после		
		C	Cr	отжига	заковки и высоког о отпуска	заковки и низкого отпуска	отжига	заковки и высоког о отпуска	заковки и низкого отпуска
20X13	Мартенситный	0,16-0,25	12–14	500	660	–	20	16	–
30X13		0,26-0,35	12–14	500	700	1600	15	12	3
40X13		0,36-0,45	12–14	600	800	1680	15	9	3
20X17H2		0,17-0,20	16–18	875	1000	1400	20	18	15
95X18		0,9-1,0	17–19	–	–	2000	–	–	< 2
12X13	Ферритно-мартенситный	0,09-0,15	12–14	400	600	–	20	20	–
08X13	Ферритный	≤ 0,08	12–14	420	–	–	22	–	–
12X17		≤ 0,12	16–18	400	–	–	17	–	–
15X25T* ²		≤ 0,15	24–26	450	–	–	12	–	–

*¹В стали также содержится 1,7–2,5 Ni. *²В стали также содержится 0,6–0,8 % Ti.

Применение хромистых коррозионно-стойких сталей

Марка	Класс стали	Назначение
12X17	ферритный	Для изделий, работающих в окислительных средах, для бытовых приборов, в пищевой, легкой промышленности, для теплообменного оборудования в энергомашиностроении
08X18T1		
40X13	мартенситный	Для изделий, работающих на износ, в качестве режущего инструмента, упругих элементов и конструкций в пищевой и химической промышленности, находящихся в контакте со слабоагрессивными средами
30X13		
20X13	мартенсито-ферритный	
08X13		

Применение хромоникелевых коррозионно-стойких сталей

Марка	Класс стали	Назначение
12X18H9	аустенитный	Для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах, и химической аппаратуры
10X17H13M3T		
20X13H4Г9		Для торгового и пищевого машиностроения
12X17Г9АН4		

Жаростойкие материалы

Марка	Содержание элементов, %					
	C	Cr	Ni	Si	σ_B , МПа	δ , %
08X17T*	$\leq 0,08$	16–18	0,7	0,8	400	20
15X28*	$\leq 0,15$	27–29	0,8	1	450	20
20X23H18**	$\leq 0,2$	22–25	17-20	1	500	35
20X25H20C2**	$\leq 0,2$	24–27	18-21	2-3	600	35

Химический состав (ГОСТ 5632–72) и механические свойства жаростойких сталей

20Х23Н18 – муфели, направляющие, детали вентиляторов, конвейеров и рольганговых печей;

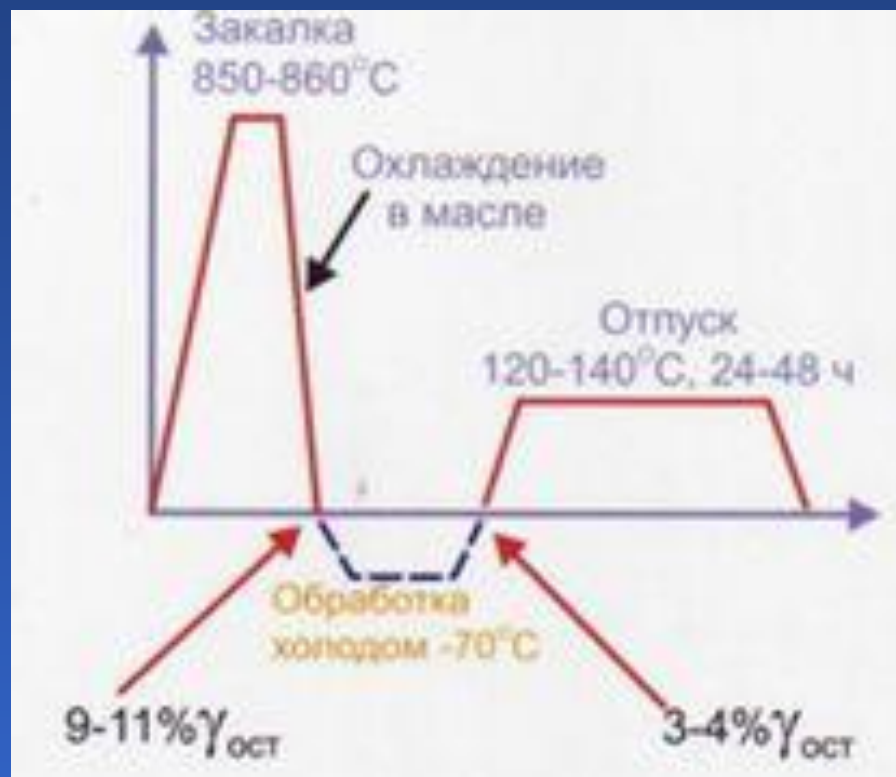
20Х25Н20С2 – муфели, ролики рольгангов, подовые плиты и другие детали печей, работающие в углеродосодержащей атмосфере.

Инструментальные легированные стали

Стали для измерительного инструмента

Измерительные инструменты должны обладать высокой износостойкостью. Требования: структурная стабильность, чтобы не допускать изменения размеров из-за фазовых и структурных превращений в процессе эксплуатации.

Высокую размерную стабильность при повышенной износостойкости обеспечивают стали марок: X, 12X1, XГ после термической обработки: .



Стали для режущих инструментов

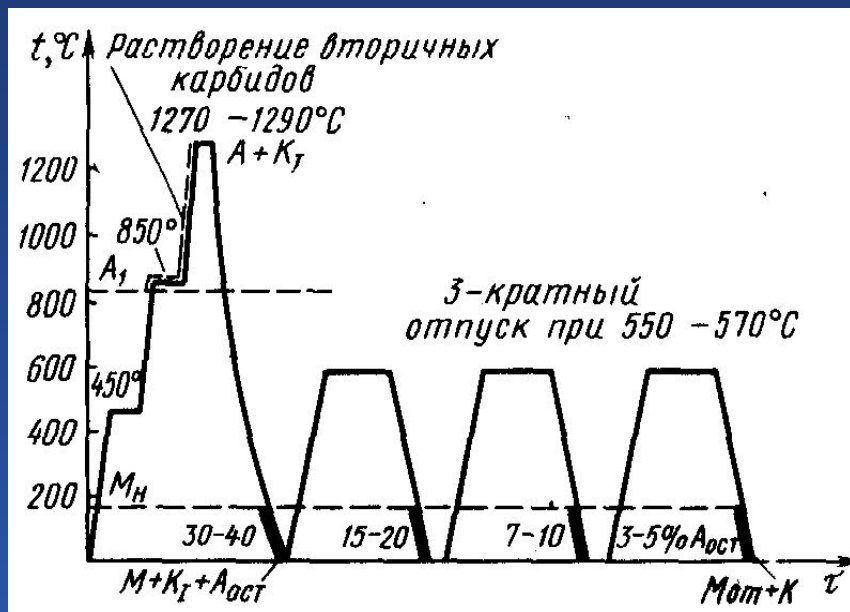
Требования: высокая твердость (не менее 60–62 HRC), износостойкость и теплостойкость.

Теплостойкость (стойкость против отпуска) – способность стали сохранять мартенситную структуру и высокую твердость при нагреве.

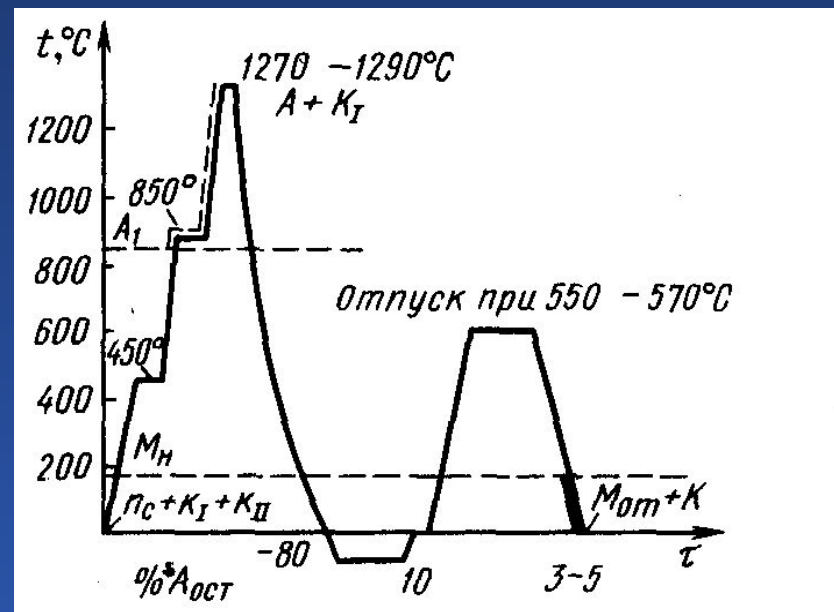
Различают стали:

- нетеплостойкие **У7-У13, У7А-У13А** (200°C);
- повышенной прокаливаемости **9ХС, ХВГ, ХВГС** (300°C) для инструментов сложной формы;
- (Термообработка сталей первой и второй группы: Закалка от 840-860°C в масло + низкий отпуск 200-250°C)
- теплостойкие – быстрорежущие **Р6М5, Р10Ф5К5** (до 600°C).

Схемы термической обработки быстрорежущих сталей



а



б

а – без обработки холодом; б – с обработкой холодом

Стали для штампового инструмента

Среди сталей для штампов холодного деформирования выделяют следующие:

- повышенной износостойкости: X12, X12BM, X12M, X12Ф1, X6ВФ, 8Х6НФТ;
- повышенной теплостойкости: 8Х4В3М3Ф2, 8Х4В2С2МФ;
- повышенной ударной вязкости: 7ХГ2ВМ и 7Х3ВМФС.
- быстрорежущие: Р6М5.

Требования: высокая твёрдость, прочность, износостойкость в сочетании с удовлетворительной вязкостью.

Термообработка: Закалка от 840-860°С в масло + низкий отпуск 200-250°С

Стали для штампов горячего деформирования: 5ХНМ, 5ХГМ.

Требования к сталям: высокая прочность при повышенных температурах, высокая теплостойкость, износостойкость и разгаростойкость при достаточной вязкости.

Разгаростойкость - это способность стали выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования трещин.

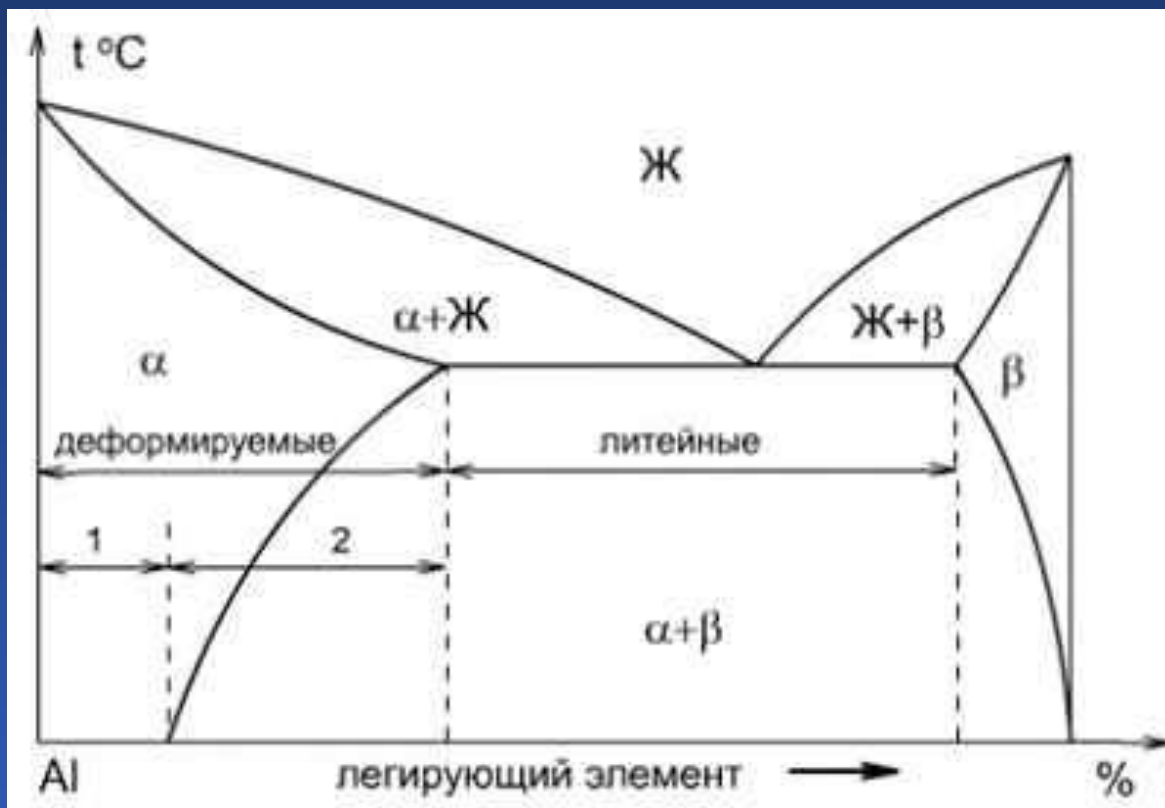
Термообработка. Закалка от 840-860°С в масло + средний отпуск 500°С

Цветные металлы и сплавы

Характеристика алюминия

- Алюминий – легкий металл, плотность $2,7 \text{ г/см}^3$.
- Алюминий имеет высокую электро- и теплопроводность. Все легирующие элементы уменьшают электропроводность.
- Решетка ГЦК, температура плавления 660°C
- Легирующие элементы повышают прочность алюминия: из-за растворения в твердом растворе (твердорастворное упрочнение); из-за образования дисперсных выделений при термической обработке.
- В зависимости от чистоты алюминия $\sigma_{\text{в}} = 40\text{--}60 \text{ МПа}$; $\delta = 40\text{--}50 \%$.
- Алюминий имеет высокую коррозионную стойкость из-за образования защитной пленки Al_2O_3 .
- Технический алюминий хорошо сваривается, имеет высокую пластичность. Из него изготавливают строительные конструкции, малонагруженные детали машин, используют в качестве электротехнического материала для кабелей, проводов

Алюминиевые сплавы



Все алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные. Деформируемые сплавы могут быть как термически не упрочняемыми (1), так и термически упрочняемыми (2).

Маркировка алюминиевых сплавов

Буквенно-цифровая маркировка

Название сплава – **Д16, АВ**

Механические свойства – **В95**

Технологическое применение – **АК6, АЛ2, АД31**

Основной легирующий элемент – **АМг, АМц**

Разработчик – **ВАД-23**.

В зависимости от производителя алюминиевые сплавы могут маркироваться по аналогии с нержавеющей прокатом с указанием сокращений названий легирующих элементов (**АК6М1**).

Для указания состояния деформированных полуфабрикатов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, используется буквенно-цифровая система обозначений после марки сплава.

- **М** - мягкий отожженный;
- **Н** - нагартованный;
- **Т** - закаленный и естественно состаренный;
- **Т1** - закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность;
- **Т2, Т3** - режимы искусственного старения, обеспечивающие перестаривание материала (режимы смягчающего искусственного старения);
- **Т5** - закалка полуфабрикатов с температуры окончания горячей обработки давлением и последующее искусственное старение на максимальную прочность;
- **Т7** - закалка, усиленная правка растяжением (1,5-3 %) и искусственное старение на максимальную прочность

Цифровая маркировка

Марка	Группа сплавов, основная система легирования
1000–1018	Технический алюминий
1019, 1029 и т.д.	Порошковые сплавы
1020–1025	Пеноалюминий
1100–1190	Al—Cu—Mg, Al—Cu—Mg—Fe—Ni
1200–1290	Al—Cu—Mn, Al—Cu—Li—Mn—Cd
1300–1390	Al—Mg—Si, Al—Mg—Si—Cu
1319, 1329 и т. д.	Al—Si, порошковые сплавы САС
1400–1419	Al—Mn, Al—Be—Mg
1420–1490	Al—Li
1500–1590	Al—Mg
1900–1990	Al—Zn—Mg, Al—Zn—Mg—Cu

первая цифра - основной металл (1 – алюминий)
вторая цифра - легирующая система
третья и четвертая цифры – порядковый номер сплава.

Дополнительная информация последней цифры – четная для литейных сплавов, а нечетная для деформируемых.

Если сплав опытный и не используется в серийном производстве, то перед маркой ставят цифру "0" (01570, 01970) и маркировка становится пятизначной.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой

Дюралюмины (Al-Cu-Mg) **Д1, Д16** обычно подвергаются закалке с температуры 500°C и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период. Максимальная прочность 490 МПа достигается через 4...5 суток. Широкое применение дюралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

Авиали (Al-Mg-Si) **АВ** имеют предел прочности 330 МПа

Высокопрочные сплавы (Al-Cu-Mg-Zn) **В95, В96** имеют предел прочности около 650 МПа. Основным потребителем – авиастроение (обшивка, стрингеры, лонжероны).

Ковочные алюминиевые сплавы (Al-Mg-Si-Cu) **АК6, АК8** применяются для изготовления поковок с пределом прочности 480 МПа. Поковки изготавливаются при температуре 380...450°C, подвергаются закалке от температуры 500...560°C и старению при 150...165°C в течение 6...15 часов.

Жаропрочные алюминиевые сплавы. В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят Ni, Fe, Ti, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до 300°C. Изготавливают поршни, лопатки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей.

Термическая обработка алюминиевых сплавов

1. Закалка

Цель – получение пересыщенного твёрдого раствора, способного к дальнейшему распаду.

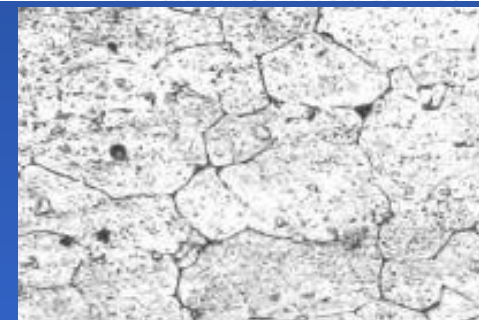
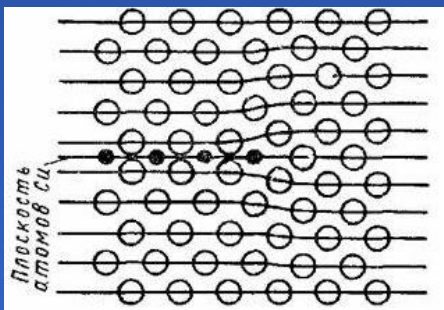
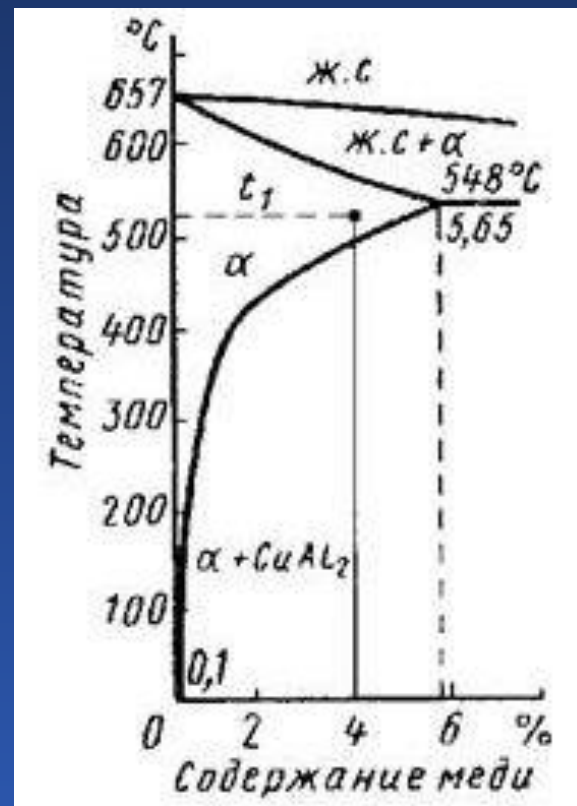
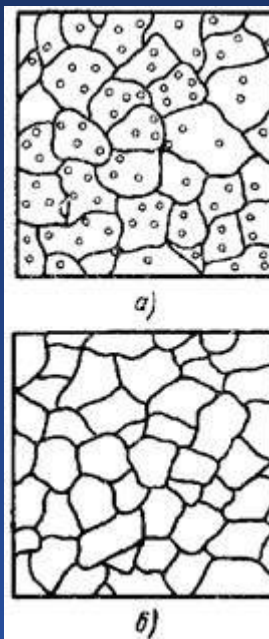
2. Старение

- Естественное
- Искусственное

Цель – распад пересыщенного твёрдого раствора с последовательным выделением зон и фаз, приводящий к увеличению твёрдости и прочности.

100 → 150 → 175 → 250

ГП1 → ГП2 → Θ' → Θ



Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой

Прочность Al можно повысить легированием Mn или Mg. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность. Обозначаются сплавы: с марганцем – **АМц**, с магнием – **АМг**; после обозначения элемента указывается его содержание (АМг3). Mg действует только как упрочнитель, Mn упрочняет и повышает коррозионную стойкость.

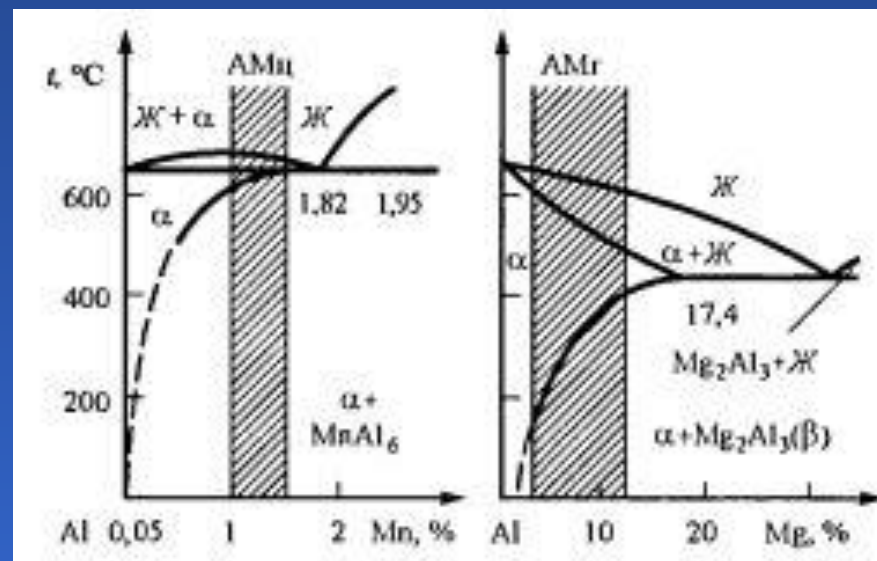
Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном состоянии. Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

Невозможность термического упрочнения связана с **высокой устойчивостью** пересыщенного твёрдого раствора, получаемого при закалке. Старения не происходит.

Структура сплава АМг



x200



Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы имеют маркировку «АЛ» с последующей цифрой, обозначающей номер марки в ГОСТе.

АЛ2 – нормальные силумины.

АЛ3, АЛ5, АЛ6 – алюминиевые сплавы, легированные медью, которые характеризуются слабыми литейными свойствами, но одновременно выгодно отличаются отличной способностью к любой механической обработке.

АЛ4 и АЛ9 – это литейные сплавы с минимальным количеством кремния и повышенным содержанием магния и марганца.

АЛ7 применяется для изготовления небольших деталей путём литья, которые впоследствии подвергаются активной механической обработке.

АЛ8 – магнилий (система AL-Mg), отличается высокой прочностью, плотностью и химической пассивностью.

АЛ11 – литейный сплав с цинковой присадкой, который используют при отливке деталей сложной конфигурации.

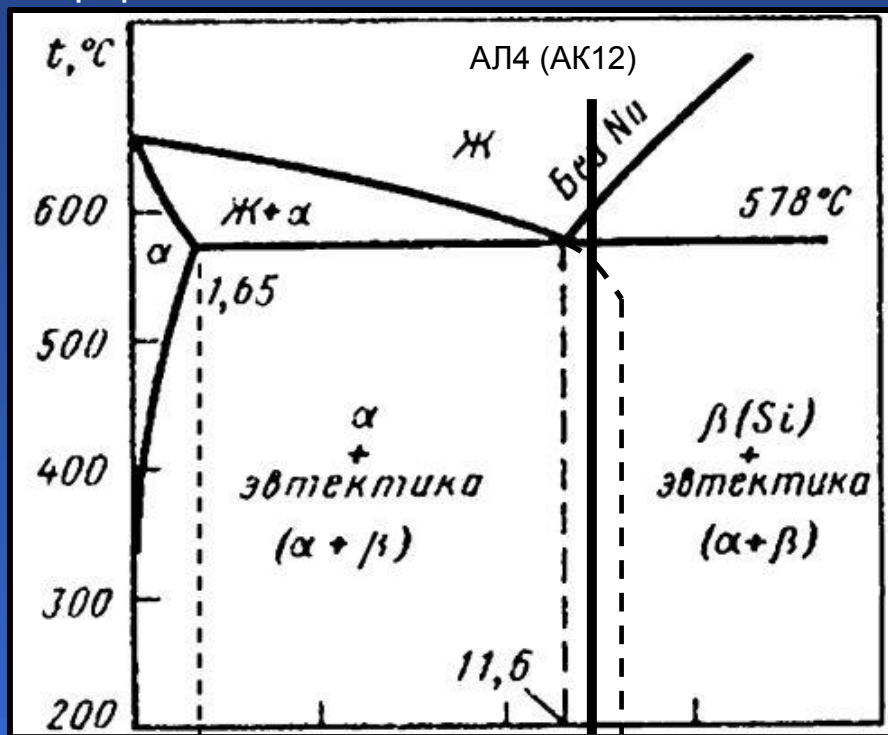
АЛ12 имеет ярко выраженную склонность к точному фасонному литью, однако механическая обработка деталей из этого металла нецелесообразна.

Силумины

К литейным сплавам относятся сплавы системы *силумины* (Al-Si), содержащие 10...13 % кремния.

Присадка к силуминам Mg, Cu содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении, Ti и Zr измельчают зерно, Mn повышает антикоррозионные свойства, Ni и Fe повышают жаропрочность.

Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне- и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.



немодифицированный

модифицированный



x100

Магний и его сплавы

Магний – легкий металл, его плотность – $1,74 \text{ г/см}^3$. Температура плавления – 650°C . Магний имеет ГП решетку. Очень активен химически, вплоть до самовозгорания на воздухе.

Механические свойства технически чистого магния (**Mg1**): предел прочности – 190 МПа, относительное удлинение – 18 %, модуль упругости – 4500 МПа.

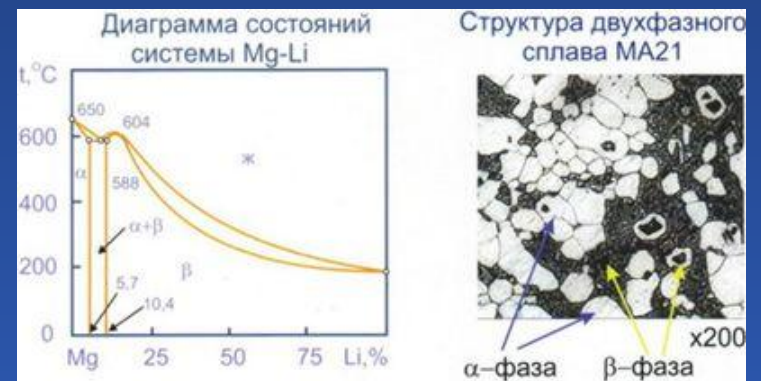
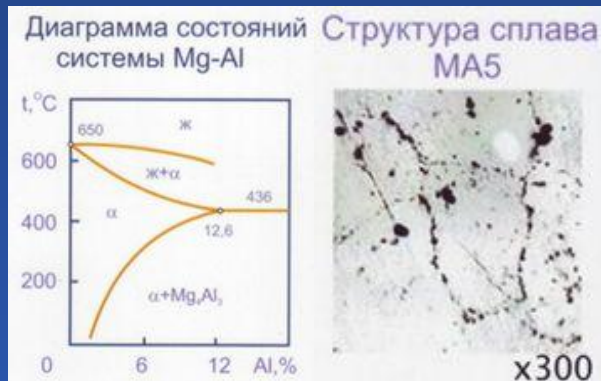
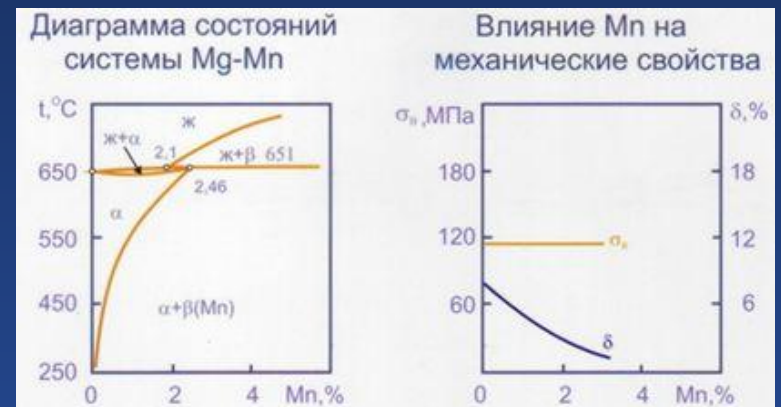
Основными магниевыми сплавами являются сплавы магния с Al, Zn, Mn, Zr. Магниевые сплавы, благодаря **высокой удельной прочности** широко используются в самолето- и ракетостроении. Сплавы упрочняются после закалки и искусственного старения. Закалку проводят от температуры $380\dots420^\circ\text{C}$, старение при температуре $260\dots300^\circ\text{C}$ в течение $10\dots24$ часов. Особенностью является длительная выдержка под закалку – $4\dots24$ часа.

Удельная прочность — предел прочности материала, отнесённый к его плотности. Показывает, насколько прочной будет конструкция при заданной массе. Особенно важна для авиационного, ракетостроения, космических аппаратов. Если разделить удельную прочность на ускорение свободного падения, то получится максимальная длина нити из материала постоянного сечения, которая может висеть вертикально вниз, без обрыва под своим собственным весом.

Материал	$\rho, \text{ г/см}^3$	$\sigma_{\text{в}}^{\text{уд}}, \text{ км}$
Углеродистые стали	7,8	15
Сталь 30ХГСА	7,8	19
Высокопрочные стали	7,8	25
Магниевые сплавы	1,7	15
Алюминиевые сплавы	2,7	21
Титановые сплавы	4,5	40
Стеклопластики	1,8	50

Деформируемые магниевые сплавы

Сплав	система	σ_B , МПа	δ , %
МА8	Mg-Mn	250	16
МА5	Mg-Al-Zn	310	8
МА19	Mg-Zn-Zr	380	5
МА21	Mg-Li	240	16



Магний плохо деформируется при нормальной температуре. Пластичность сплавов значительно увеличивается при горячей обработке давлением (360...520°C). Деформируемые сплавы маркируют **МА5, МА8, МА19, ВМ 5-1**.

Из деформируемых магниевых сплавов изготавливают детали автомашин, самолетов, прядильных и ткацких станков. В большинстве случаев эти сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью.

Литейные магниевые сплавы

Марка сплава	Содержание, %					$\sigma_{в}$, МПа	δ , %
	Al	Mn	Zn	другие	Термическая обработка		
	Система Mg - Al - Zn						
МЛ5	7,5-9	0,15-0,5	0,2-0,8	-	T4	230	5
МЛ6	9-10,2	0,1-0,5	0,6-1,2	-	-	150	1
	Система Mg - Zn - Zr						
МЛ12	-	-	4,0-5,0	Zr 0,6-1,1	T1	230	5
МЛ15	-	-	4,0-5,0	Zr 0,7-1,1 La 0,6-1,2	T1	210	3
	Система Mg - PЗМ - Zr						
МЛ10	-	-	0,1-0,7	Zr 0,4-1,0 Nd 2,2-2,8	T6	250	5
МЛ19	-	-	0,1-0,6	Zr 0,4-1,0 Nd 1,6-2,3 Y 1,4-2,2	T6	250	5

Литейные сплавы маркируются **МЛ3, МЛ5, ВМЛ-1**.

Отливки изготавливают литьем в землю, в кокиль, под давлением. Необходимы меры, предотвращающие загорание сплава при плавке, в процессе литья.

Из литейных сплавов изготавливают детали двигателей, приборов, телевизоров, швейных машин.

Условные обозначения режимов термической обработки:

T1 - искусственное старение без предварительной закалки;

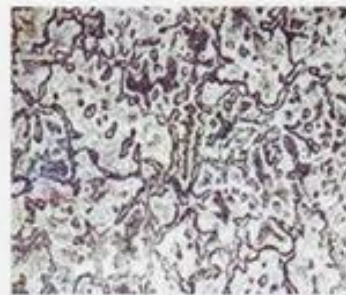
T2 - отжиг;

T4 - закалка;

T6 - закалка на воздухе и старение;

T61 - закалка в горячей воде и старение

Структура сплава МЛ5



X300

Основные свойства меди

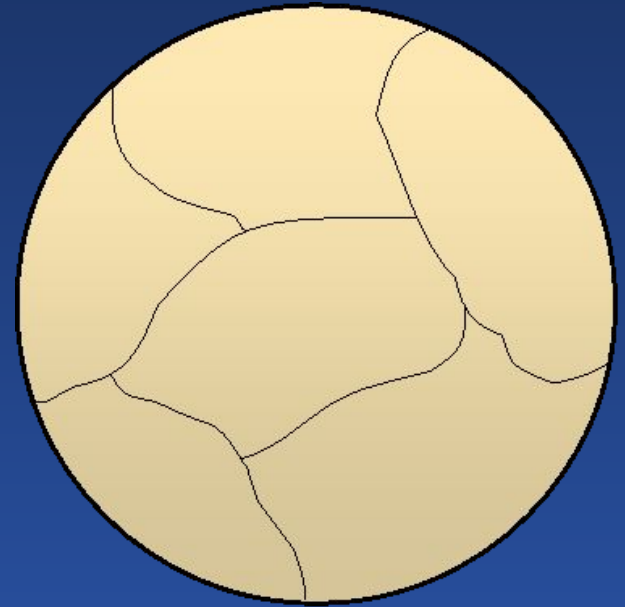
Медь – металл светло-розового цвета,
Пластичный.

Решётка - ГЦК с параметром $3,607\text{\AA}$,
Плотность чистой меди $8,94\text{ г/см}^3$.

Механические свойства меди:

- в литом состоянии $\sigma_{\text{в}} = 160\text{ МПа}$; $\delta = 25\%$;
- после горячекатаной обработки $\sigma_{\text{в}} = 240\text{ МПа}$; $\delta = 45\%$.

Медь не имеет полиморфных превращений, обладает резко выраженными металлическими свойствами, основными из которых являются высокая электропроводность, теплопроводность и пластичность.



Влияние примесей на структуру и свойства меди

Кислород в меди присутствует в виде хрупкой составляющей Cu_2O или эвтектики ($\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$), вызывая охрупчивание при прокатке. В небольших количествах содержание кислорода не вызывает охрупчивания, а частички Cu_2O при прокатке равномерно распределяются во всем объеме меди.

Висмут и свинец образуют с медью легкоплавкие эвтектики, состоящие практически из чистых свинца или висмута, располагающихся в литой меди преимущественно по границам зерен. Нагрев такой меди перед горячей обработкой давлением может проводить к расплавлению висмута и свинца по границам зерен и межзеренному разрушению. Висмут сообщает хрупкость меди и ее сплавам при холодной обработке давлением. Такое явление называется красноломкостью меди.

Сера дает соединение с медью Cu_2S – очень хрупкое соединение, что часто приводит к охрупчиванию меди и ее сплавов. Однако сера не образует легкоплавких эвтектик и не вызывает горячеломкости меди. Иногда добавки серы к меди применяют для улучшения обрабатываемости резанием.

Фосфор в небольших количествах, в которых он может присутствовать в меди, не оказывает значительного влияния на свойства меди. Однако последними исследованиями показано, что добавки тысячных долей процентов фосфора совместно с такими же добавками олова уменьшают анизотропию свойств меди, способствуют получению равномерного мелкого рекристаллизованного зерна.

Марки меди и ее применение (ГОСТ 859–2001)

Марка меди	Содержание меди, %	Назначение
M00	99,99	Для полупроводниковых приборов
M0	99,95	Для анодов, проводов
M1	99,9	Для безоловянистых бронз, проводников
M2	99,7	Для сплавов, обрабатываемых давлением
M3	99,5	Для проката обычного качества
M4	99,0	Для литейных бронз и других неотчетливых сплавов

Латуни

В медных сплавах наиболее часто применяемыми легирующими элементами являются Zn, Sn и Al.

Сплавы меди с цинком называются **латунями**. Технические латуни содержат до 45%Zn.

По химическому составу латуни делят на двойные (простые) и многокомпонентные (легированные, специальные).

Простые латуни - **Л96** (96% Cu)

Многокомпонентные латуни:

- деформируемые **ЛС59-1** (59%Zn, 1%Pb, остальное – Cu)

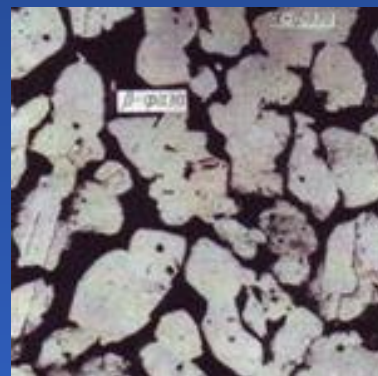
- литейные **ЛЦ23А6Ж3Мц2** (23%Zn, 6%Al, 3%Fe, 2%Mn, остальное – Cu).

По структуре латуни делятся на:

однофазные (α -латуни) и двухфазные ($\alpha+\beta$ -латуни).



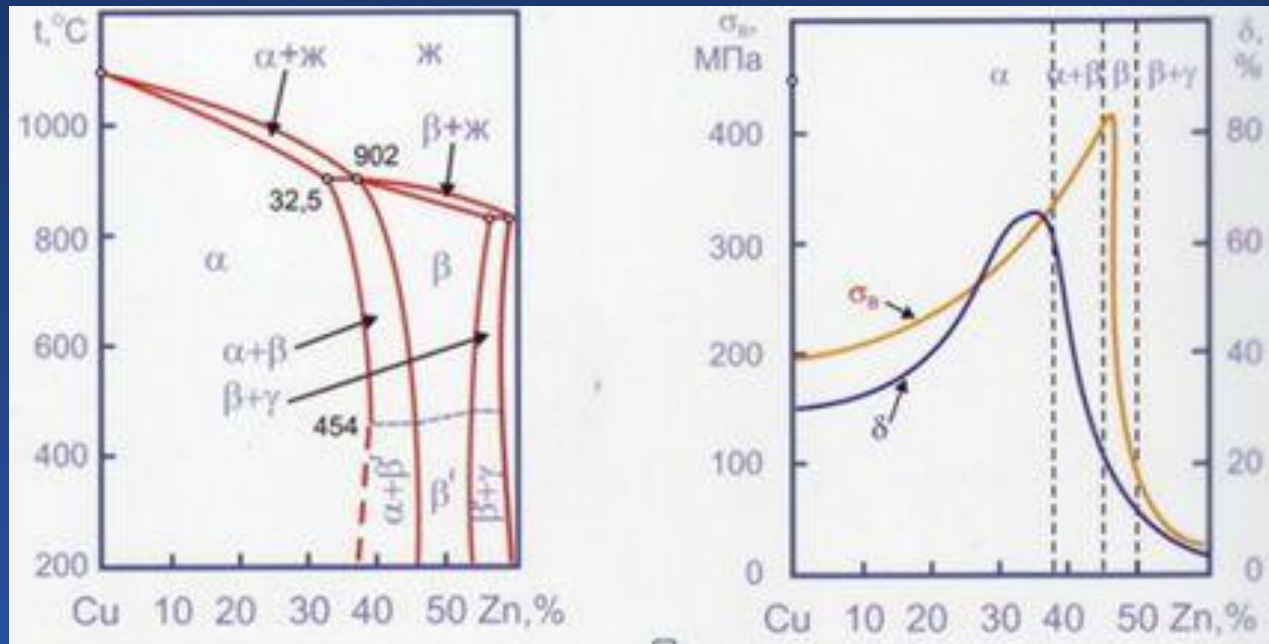
x200



x200

Деформируемые латуни - это преимущественно однофазные латуни, обладающие высокой пластичностью и хорошо поддающиеся холодной пластической деформации. Литейные латуни, являющиеся преимущественно двухфазными, обладают хорошей жидкотекучестью и используются для изготовления отливок.

Диаграмма состояния медь – цинк



α -фаза – раствор замещения Zn в Cu. Предельная растворимость при комнатной температуре составляет 36 %, возрастает до 39 % при 454 °С, а в дальнейшем температуры до 902 °С составляют 32,5 %.

β -фаза – химическое соединение CuZn, с решеткой ОЦК. При высокой температуре имеет высокую область гомогенности от 37 до 56,5 Zn, с понижением температуры эта область сужается до 45–49 % Zn. Фаза β при температуре 454–486 °С приобретает упорядоченную структуру β' фазы. Переход неупорядоченной фазы в упорядоченную сопровождается резким падением пластичности и повышением хрупкости.

Влияние примесей на свойства латуней. Применение латуней

.. Zn удешевляет латуни, улучшает их обрабатываемость резанием, способность прирабатываться и противостоять износу. При этом уменьшаются теплопроводность и электрическая проводимость. Из латуни Л85 изготавливают краны, вентили и другое сантехническое оборудование. Латунь с 30% цинка (Л70) называют *патронной*, т.к. из нее делают гильзы патронов.

Pb способствует улучшению обрабатываемости резанием и повышению антифрикционных свойств, в результате обработки получается гладкая чистая поверхность, из такой латуни получают тонкие детали часов, поэтому такую латунь называли *часовой*. Из легированной свинцом латуни изготавливают втулки, гайки, тройники, штуцеры, токопроводящие детали электрооборудования. Для легирования латуней используют также Al, Fe, Ni, Sn, Si. Эти элементы повышают коррозионную стойкость латуней. Легированные латуни широко используются в судостроении.

Латуни, легированные Sn, называют *морскими* (ЛО70-1), они идут на изготовление обшивки и деталей оборудования судов

Al повышает прочность и твердость латуней. Однофазные латуни с содержанием алюминия до 4%, несмотря на упрочнение, хорошо обрабатываются давлением. Легирование алюминиевых латуней дополнительно Ni, Fe, Mn, Si, обладающими переменной растворимостью в α -твердом растворе, позволяет дополнительно упрочнять их путем закалки и старения, повышая предел прочности до 700 МПа.

Кремнистые латуни характеризуются высокими прочностью, пластичностью, вязкостью при отрицательных температурах, высокой свариваемостью и деформируемостью в холодном и горячем состояниях. Такие латуни (ЛК80-3) применяют для изготовления арматуры, деталей приборов в судостроении и общем машиностроении.

Ni повышает растворимость цинка в меди и улучшает механические свойства латуни. Никелевые латуни (например, латунь ЛН65-5) хорошо обрабатываются давлением в холодном и горячем состояниях.

Механические свойства латуней

Марка латуни	Структура	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	ψ , %
Деформируемые латуни					
Л90	α	260	120	44	80
Л68	α	330	91	56	70
ЛН65-5	α	380	170	65	-
Л59	$\alpha + \beta'$	390	-	44	52
ЛС59-1	$\alpha + \beta'$	420	140	40	44
ЛО70-1	α	350	100	60	-
ЛК80-3	α	300	200	58	-
Литейные латуни					
ЛА67-2,5	$\alpha + \beta'$	400	-	15	
ЛАЖ60-1-1 Л	$\alpha + \beta'$	420	-	18	
ЛМцЖ52-4-1	$\alpha + \beta'$	500	-	18	
ЛАЖМц 66-6-3-2	$\alpha + \beta'$	650	-	7	

Бронзы

Бронзы – это сплавы меди с различными элементами (олово, алюминий, кремний, бериллий, свинец и другие), кроме цинка. Наименование бронзы определяют по основному легирующему компоненту (оловянистые, алюминиевые, кремнистые, бериллиевые бронзы и т. д.).

Маркировка бронз:

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

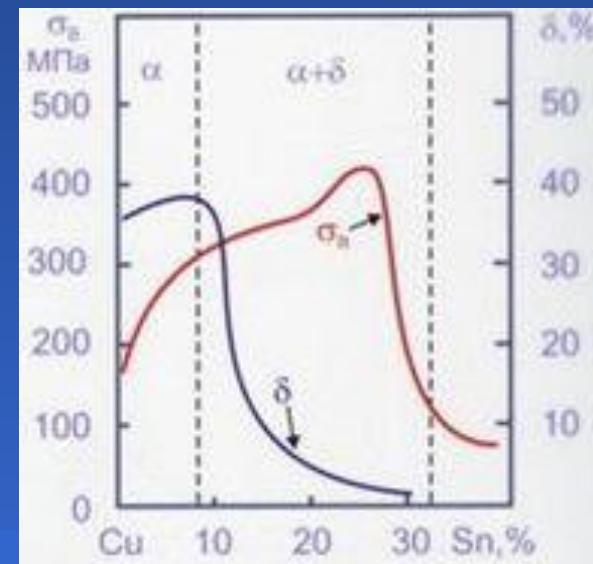
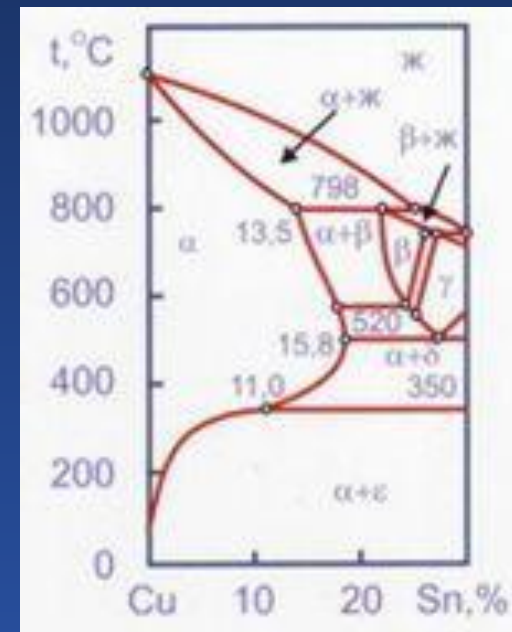
- деформируемые **БрОФ6,5-0,4** (6,5%Sn, 0,4%P, остальное - Cu)
- литейные **БрО6Ц4С17** (6%Sn, 4%Zn, 17%Pb, остальное – Cu)

Оловянистые бронзы

История: зеркальная (30-35%Sn), колокольная (20-30%Sn), пушечная (8-18%Sn), монетная (4-10%Sn).

Оловянистые бронзы отличаются хорошими литейными свойствами – высокой жидкотекучестью и малой усадкой. С целью экономии Sn в бронзы добавляют Zn в таком количестве, чтобы он полностью растворялся в меди, образуя твёрдый раствор, тем самым повышая механические свойства. Для улучшения обрабатываемости резанием в оловянистые бронзы добавляют Pb (например, **БрО6Ц4С17**). Литейные оловянистые бронзы, обладая высокой коррозионной стойкостью в воде и на воздухе, применяются для пароводяной арматуры.

Деформируемые оловянистые бронзы характеризуются более низким содержанием олова (например: **БрОЦ4-3**) и имеют однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергаются отжигу при 600-700 °С. Они пластичны и более прочны, чем литейные. Кроме того, деформируемые оловянистые бронзы обладают высокими упругими свойствами, поэтому их используют для получения пружин, мембран и др.



Бронзы

Алюминиевые бронзы содержат 9-11 % Al (**БрА10Ж4Н4**). Они обладают хорошими технологическими и механическими свойствами. Алюминиевая бронза, с содержанием 8–10 % Al и более, может быть упрочнена закалкой на мартенсит из β -области в воде с образованием игольчатой метастабильной фазы β' . Их применяют для изготовления зубчатых колес, сальников, деталей турбин.

Кремнистые бронзы содержат до 3% Si и являются заменителями оловянистых бронз, для улучшения механических свойств их дополнительно легируют Ni и Mn. Обладая высокой упругостью и антикоррозионными свойствами, эти бронзы применяются для изготовления упругих элементов различных механизмов. Из бронзы **БрКМц3-1** изготавливают стопорные и упорные кольца насосов, мембраны датчиков давления.

Свинцовистые бронзы обладают высокими антифрикционными свойствами, хорошей теплопроводностью (**БрС30**), поэтому из этих бронз изготавливают вкладыши подшипников, работающих при больших давлениях и скоростях.

Бериллиевые бронзы содержат 2-2,5 % Be, а также Mn (заменитель Be), Ni и Ti (упрочнители). Бериллиевые бронзы способны к термическому упрочнению при закалке и последующем старении за счет дисперсионного твердения. Бронза **БрБ2** после термообработки приобретает твердость HB 300–400, прочность – до 1500 МПа при относительном удлинении более 2–3 %. Эти бронзы относятся к разряду дорогих и используются в приборостроении для изготовления пружин, мембран и др.

Титан и его сплавы

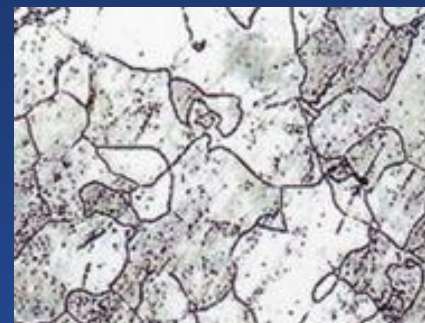
Титан - металл серебристо-белого цвета, легкий, прочный, тугоплавкий, коррозионно-стойкий за счет возникновения оксидной пленки TiO_2 .

Плотность $\rho = 4,505 \text{ г/см}^3$;

Температура плавления $T_{пл} = 1672^\circ\text{C}$.

Полиморфизм: α -Ti до 882°C с решеткой ГП
 β -Ti выше 882°C с решеткой ОЦК .

Механические свойства: $\sigma_v = 300\text{МПа}$, $\delta = 40\%$,
не имеет температурного порога хладноломкости, парамагнитен.

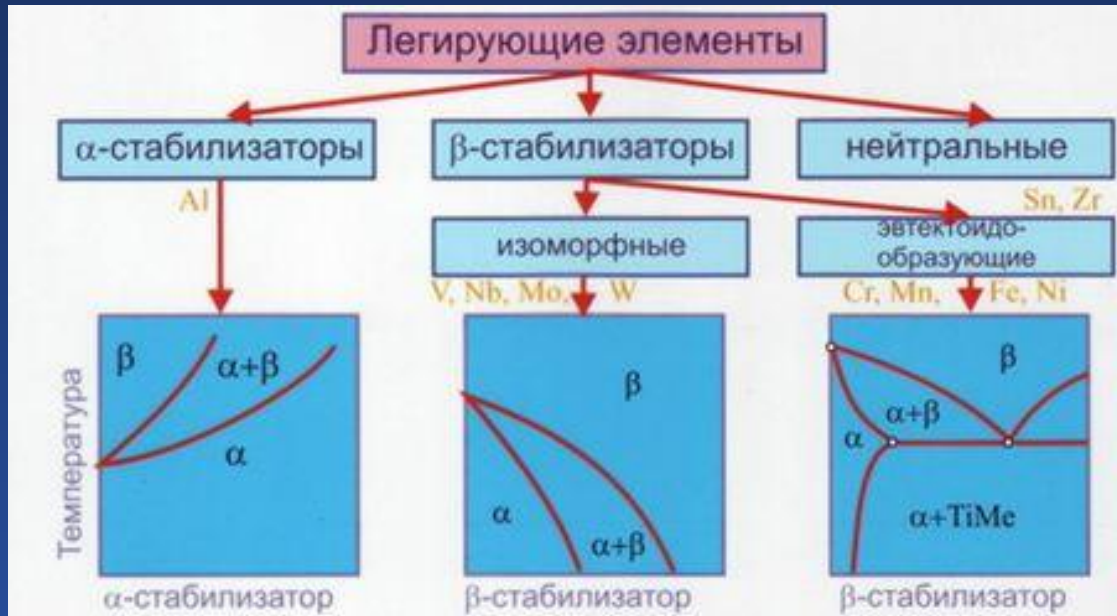


x100

Механические свойства Ti определяются составом: чем в нем меньше примесей, тем ниже прочность и выше пластичность. Ti чувствителен к примесям атмосферных газов – O_2 , N_2 , H_2 и углероду, которые образуют с титаном твердые растворы внедрения и промежуточные фазы, повышая его характеристики прочности и снижая пластичность.

Важнейшее преимущество титана и титановых сплавов перед другими конструкционными материалами - это высокая удельная прочность и жаропрочность в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью, практическое отсутствие хладноломкости. Кроме того, титан и его сплавы, несмотря на плохую обрабатываемость резанием, хорошо свариваются, обрабатываются давлением в холодном и горячем состоянии, термически упрочняются, что имеет важное значение для их применения в ряде отраслей техники. Это относится в первую очередь к авиа-, ракето- и судостроению, химическому, пищевому и транспортному машиностроению.

Влияние легирующих элементов на полиморфизм Ti



Al является основным легирующим элементом и содержится почти во всех промышленных сплавах. Он повышает удельную прочность сплава, жаропрочность, модуль упругости, уменьшает склонность к водородной хрупкости. Из-за уменьшения технологической пластичности содержание Al ограничивается 7%.

Для повышения рабочих характеристик жаропрочных сплавов с высоким содержанием алюминия главным образом используют добавки V, Mo и W.

Zr повышает термическую стабильность, увеличивает предел ползучести, прочность при низких и средних температурах, уменьшает склонность к хладноломкости и улучшает свариваемость.

Cr считается одной из наиболее перспективных легирующих добавок к титану. Сплавы титана с хромом отличаются превосходным сочетанием прочности и пластичности.

Nb повышает стабильность поверхности, увеличивает жаростойкость при высоких температурах.

Классификация титановых сплавов

по технологии изготовления: деформируемые и литейные.

по механическим свойствам: сплавы нормальной прочности, высокопрочные сплавы, жаропрочные сплавы, сплавы с повышенной пластичностью.

по способности упрочняться термической обработкой: упрочняемые термической обработкой и не упрочняемые термической обработкой.

по структуре в отожженном состоянии:

- α -сплавы,
- псевдо- α -сплавы,
- $(\alpha+\beta)$ – сплавы,
- псевдо- β -сплавы,
- β -сплавы.

Химический состав, тип структуры и свойства основных титановых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %				Тип структуры	σ_B , МПа	δ , %
	Al	V	Mo	Прочие			
BT5	4,3–6,2	–	–	–	α -сплавы	700–950	10–15
BT5-1	4–6	–	–	2–3 Sn		750–950	10–15
OT4-1	1–2,5	–	–	0,7–2 Mn	Псевдо- α -сплавы	600–750	20–40
OT4	3,5–5	–	–	0,8–2 Mn		700–900	12–20
BT20	5,5–7	0,8–2,3	0,5–1,8	1,4–2,5 Zr		950–1150	8
BT3-1*	5,5–7	–	2–3	0,8–2,3% Cr 0,2–0,7% Fe	$(\alpha+\beta)$ -сплавы	1200–1400	8–10
BT6*	5,3–6,8	3,5–5,3	–	–		1100–1150	14–16
BT14*	3,5–6,3	0,8–1,9	2,5–3,8	–		1150–1400	6–10
BT16*	1,6–3,8	4–5	4,5–5,5	–		1250–1450	4–6
BT22	4,8–5,2	4,5–5,5	4,5–5,5	0,8–1,2 Cr 0,8–1,2 Fe		1100–1250	9
BT32	2	8	8	1 Cr, 1 Fe	β -сплавы	800–950	6–15

Деформируемые титановые сплавы

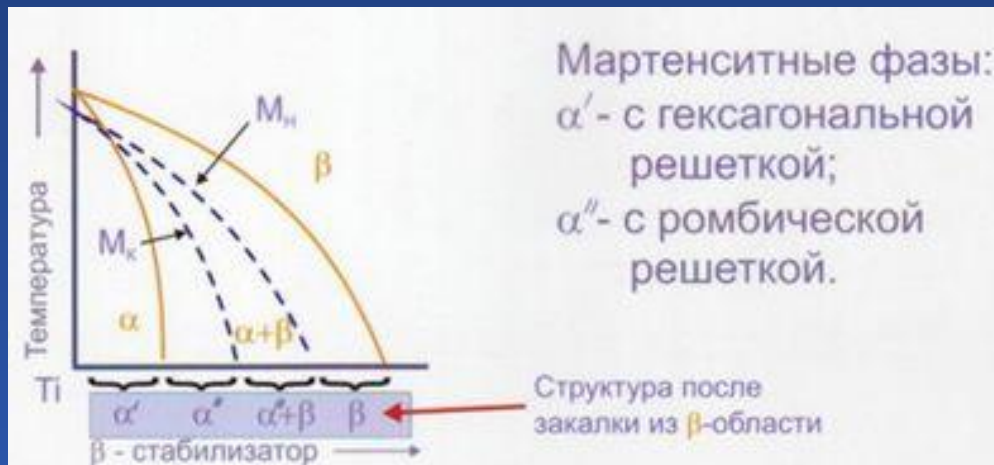
α-сплавы (BT5, BT5-1) - система Ti - Al, дополнительно легируются Sn и Zr. Характеризуются средней прочностью при комнатной температуре, но высокими механическими свойствами при повышенных и криогенных температурах, отличной свариваемостью и удовлетворительной обрабатываемостью резанием. К недостаткам α -сплавов относятся их неупрочняемость термической обработкой, низкая технологическая пластичность. Сплавы куят, штампуют и прокатывают в горячем состоянии, используют для изготовления изделий, работающих при различных температурах (до 450-500°C).

Псевдо-α-сплавы имеют преимущественно α -структуру с небольшим (1-5%) количеством β-фазы вследствие дополнительного легирования β-стабилизаторами: Mn (OT4-1, OT4), V, Mo, Zr (BT 20), Nb и др. В сравнении с α-сплавами, они обладают более высокой технологической пластичностью. Поэтому сплавы с низким содержанием алюминия (2-3 %) обрабатываются давлением в холодном состоянии и только при изготовлении деталей сложной формы подогреваются для деформации до 500-700 °С. Сплавы с большим содержанием Al подвергают обработке давлением при 600-800 °С. Дополнительному упрочнению таких сплавов способствует легирование Zr и Si. Поэтому псевдо-α-сплавы, содержащие 7-8 % Al и легированные Zr, Si, Mo, Nb, V, используют в изделиях, работающих при наиболее высоких в сравнении с другими титановыми сплавами температурах. Недостаток псевдо-α-сплавов - склонность к водородной хрупкости, вызывающая снижение пластичности и вязкости.

Деформируемые титановые сплавы

($\alpha+\beta$)-сплавы обладают лучшим сочетанием технологических и механических свойств. Эти сплавы легированы 1,5-7 % Al для упрочнения α -фазы, а также β -стабилизаторами: V, Mo, Cr, Fe и др. Сплавы упрочняются термической обработкой - закалкой и старением. По структуре после закалки, ($\alpha+\beta$)-сплавы подразделяют на два класса: мартенситный и переходной.

Сплавы **мартенситного класса** содержат меньшее количество β -стабилизаторов и немного (5-25 %) β -фазы. После закалки такие сплавы приобретают структуру мартенсита α' (или α''). Такие сплавы легируют Al и V (BT 6), а также дополнительно Mo, что имеет место в случае высокопрочных сплавов (BT 14, BT 16), а также сплавов для работы при повышенных температурах (BT25, BT3-1).



Структура α' -мартенсита



x500

Сплавы **переходного класса** содержат большее количество ЛЭ и поэтому большее количество β -фазы в равновесной структуре (25-50 %). После закалки из β -области можно получить однофазную β' или двухфазную ($\alpha'' + \beta'$) структуру. Наличие большого количества β -фазы обеспечивает максимальную прочность сплавов переходного класса среди всех двойных титановых сплавов. Сплав BT22 после отжига имеет прочностные свойства, не уступающие таковым у сплава BT6 после закалки и старения. Это позволяет использовать сплавы переходного класса как в отожженном состоянии, так и после закалки и старения, что важно при производстве крупногабаритных изделий. ($\alpha+\beta$)-сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются, куются, прокатываются и штампуются.

Деформируемые титановые сплавы

Для получения однофазных **β-сплавов** требуется высокое содержание в них β-стабилизаторов, изоморфных титану (V, Mo, Nb, Ta), являющихся не только дорогими, но и более “тяжелыми”, чем сам Ti, т.е. при этом уменьшается удельная прочность сплава. Поэтому как конструкционный материал в машиностроении β-сплавы широкого распространения не нашли.

Псевдо-β-сплавы (BT15) также являются высоколегированными сплавами, в которых суммарное содержание легирующих элементов превышает 20%. Наиболее часто их легируют Mo, V, Cr, реже - Fe, Zr, Sn. Содержание Al не более 3 %. В равновесном состоянии сплавы имеют преимущественно β-структуру с небольшим количеством α-фазы.

После закалки они имеют структуру метастабильной β'-фазы. В таком состоянии сплавы обладают хорошей пластичностью ($\delta = 12-40\%$), сравнительно невысокой прочностью ($\sigma_B = 650-1000$ МПа), легко обрабатываются давлением.

После старения упрочняются до $\sigma_B = 1300-1800$ МПа.

Сплавы обладают высокой удельной прочностью, низкой склонностью к водородной хрупкости, удовлетворительно обрабатываются резанием. Однако, они чувствительны к примесям кислорода и углерода (снижение пластичности и вязкости), обладают пониженной пластичностью сварных швов и низкой термической стабильностью.

Литейные сплавы титана

Марка сплава	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_{в1}$, МПа	δ , %
	Al	V	Mo	другие			
BT5Л	4,1-6,2	-	-	-	отжиг 800-850°C, охл. на воздухе	700	6
BT20Л	5,5-7,5	0,8-1,8	0,5-2,0	Zr 1,5-2,5	отжиг 700-800°C, охл. на воздухе	930	8
BT6Л	5,0-6,5	3,5-4,5	-	-	закалка от 900-950°C старение 450-550°C	850	5
BT14Л	4,3-6,3	0,9-1,9	3,5-3,8	-	отжиг 740-760°C	880	5

Сплавы имеют хорошие литейные свойства (небольшой интервал кристаллизации, высокая жидкотекучесть, хорошая плотность отливок), малую склонность к образованию горячих трещин, небольшую линейную (около 1 %) и объемную (около 3 %) усадку. Недостатки: большая склонность к поглощению газов, высокая активность при взаимодействии с формовочными материалами. Поэтому плавку и разливку таких сплавов ведут в вакууме или в атмосфере инертных газов.

Для фасонного литья применяют сплавы, аналогичные по химическому составу некоторым деформируемым сплавам (**BT5Л**, **BT3-1Л**, **BT14Л** и др.), а также специальные литейные сплавы. Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термическая обработка резко снижает пластичность литейных сплавов титана и поэтому не применяется.

Неметаллические материалы

Общая характеристика неметаллических материалов

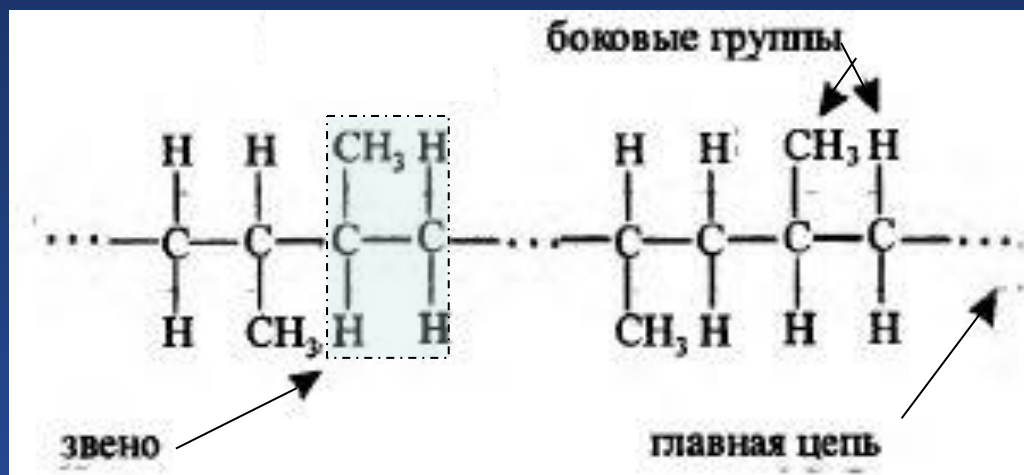
К неметаллическим материалам относят:

органические и неорганические полимеры, пластмассы и композиционные материалы на неметаллической основе, графит, неорганические стёкла и ситаллы, керамику, каучуки и резины, клеи, герметики, лакокрасочные покрытия.

Достоинством неметаллических материалов являются такие их свойства, как достаточная прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, светопрозрачность, химическая стойкость, диэлектрические свойства.

Неметаллические материалы технологичны и эффективны при использовании. Трудоемкость при изготовлении изделий из неметаллических материалов в 5–6 раз ниже, они в 4–5 раз дешевле по сравнению с металлическими. В связи с этим непрерывно возрастает использование неметаллических материалов в машиностроении автомобилестроении, авиационной, пищевой, холодильной и криогенной технике и др.

Полимеры



Полимеры - высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных элементарных звеньев, представляющих собой одинаковую группу атомов и связанных между собой прочными ковалентными связями (330-360 кДж/моль).

Макромолекула полимера представляет собой длинную цепь из мономеров, что определяет её большую гибкость. Между макромолекулами полимеров действуют значительно более слабые физические связи (5-40 кДж/моль).

Молекулярная масса их составляет от 5000 до 1000000. Свойства полимеров определяются не только химическим составом макромолекул, но и **надмолекулярной структурой** - их взаимным расположением и строением.

Классификация полимеров

По природе: естественные и синтетические

По способу получения: полимеризационные и поликонденсационные.

По форме макромолекул:

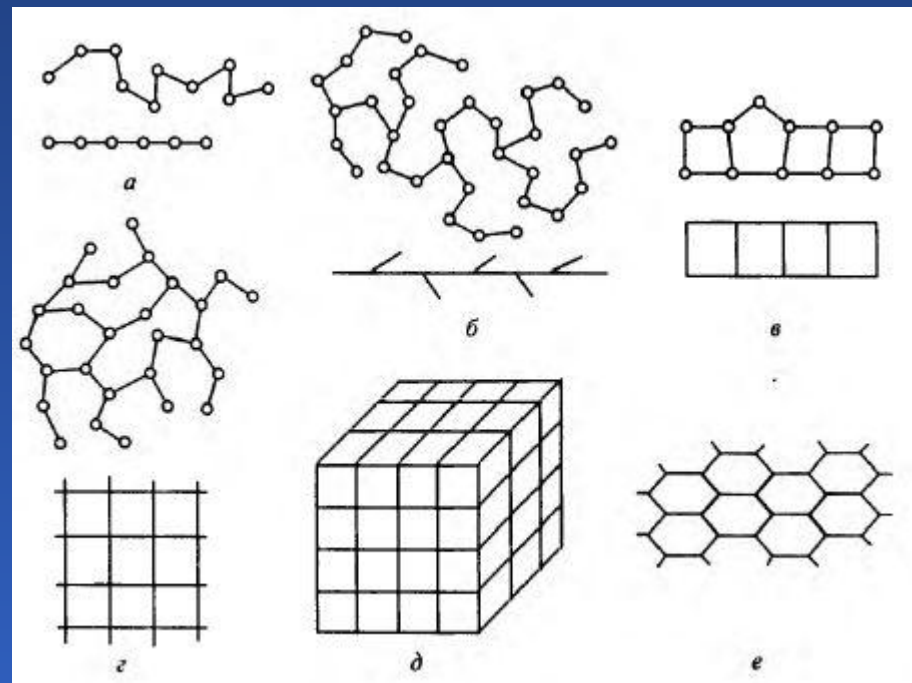
а - линейные (высокая эластичность) ,

б - разветвленные (низкая прочность, плавкость),

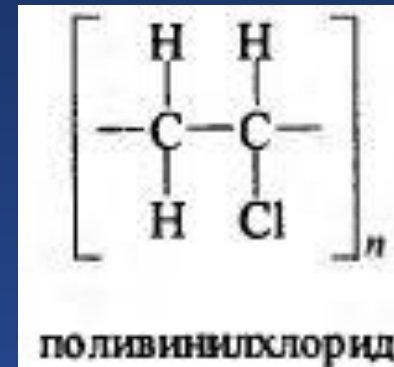
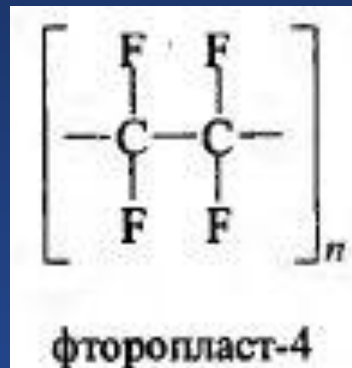
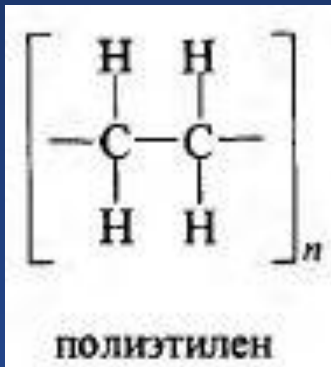
в – лестничные, г - сетчатые (набухание в растворителях),

д - пространственные (высокая стойкость к внешним воздействиям, хрупкость),

е - паркетные.



Классификация полимеров



По полярности: неполярные

полярные

Неполярные полимеры имеют симметричное расположение функциональных групп и дипольные моменты связей атомов взаимно компенсируются. В молекулах полярных полимеров присутствуют или полярные связи группировок (-Cl, -F, -OH), или несимметрия в их структуре.

За счет полярности энергия межмолекулярных связей в поливинилхлориде больше, чем в полиэтилене. Поливинилхлорид, имея прочность при растяжении 100-200 МПа, прочнее полиэтилена (20-45 МПа). Полярные полимеры жесткие, теплостойкие, но в отличие от неполярных их морозостойкость низкая.

Полярность полимера можно оценить по величине диэлектрической проницаемости ϵ . Неполярные полимеры фторопласт и полиэтилен имеют $\epsilon = 2,1$, а у полярных полимеров (органического стекла, капрона) — $\epsilon > 3,5$.

Классификация полимеров

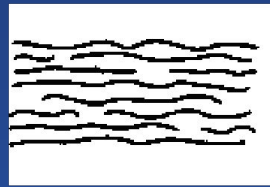
По фазовому состоянию: аморфные и кристаллические.

В аморфном состоянии полимер имеет упорядоченное строение только в пределах участков, соизмеримых со звеньями цепи макромолекул (ближний порядок). В кристаллических полимерах соблюдается не только ближний, но и дальний порядок.

Характерными элементами надмолекулярной структуры полимеров являются **глобула** для аморфных структур и **пачка** для кристаллических.



глобула



пачка



сферолит

Аморфное состояние для большинства полимеров термодинамически более устойчиво: глобула обладает минимумом свободной энергии.

Термодинамически наиболее устойчивой формой надмолекулярного образования является **сферолит**, сформированный тангенциально расположенными пачками макромолекул. Сферолитные структуры типичны для большинства кристаллизующихся полимеров.

Примером практической реализации влияния надмолекулярной структуры на прочность может служить *ориентационное упрочнение* полимеров - в процессе вытяжки полимеров при повышенных температурах макромолекулы ориентируются параллельно направлению приложения нагрузки. Физико-механические свойства полимера в направлении ориентации увеличиваются примерно в 5 раз, а в перпендикулярном направлении уменьшаются до 2 раз по сравнению с исходным значением. Ориентационное упрочнение полимеров наиболее широко применяется при получении искусственных волокон и пленок.

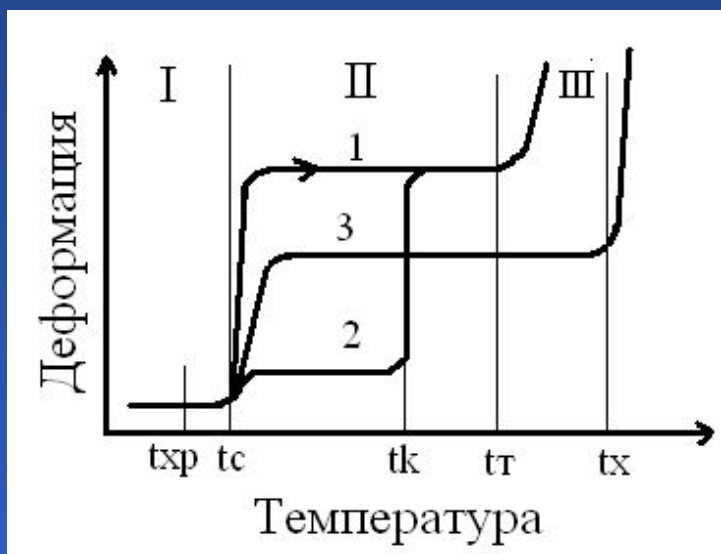
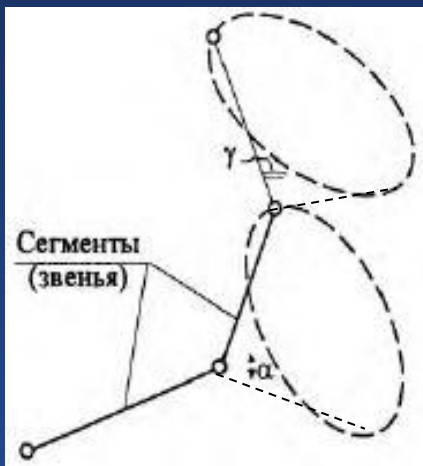
Классификация полимеров

По поведению при нагреве: термопластичные и терморезактивные.

Полимеры с линейными и разветвленными макромолекулами пластичны, способны размягчаться при повышении температуры и затвердевать при охлаждении, называются **термопластами**. Свойства термопластов обратимы при повторном нагревании. Обратимость свойств термопластов, их достаточно низкая прочность 1 -10 МПа обусловлены слабыми межмолекулярными силами связи. Структура таких полимеров может быть аморфной, частично кристаллической и кристаллической. Изделия из термопластов способны перерабатываться.

Терморезактивные полимеры при первичном нагреве, имея линейную структуру размягчаются, а затем затвердевают, в результате протекания химических реакций и образования пространственной структуры. Изделия из терморезактивных полимеров при повторном нагреве не размягчаются и не могут быть подвергнуты повторной переработке.

Физические состояния полимеров



Термомеханические кривые полимеров:

- 1 - некристаллического линейного,
- 2 – кристаллического
- 3 - редкосетчатого

- **I Стеклообразное** - твердое состояние, имеет фиксированное расположение макромолекул. Атомы звеньев молекул находятся только в колебательном движении у положения равновесия, движение звеньев и перемещение молекул не происходит. Переход полимера в подобное состояние происходит при определенной температуре T_c , называемой температурой *стеклования*. Температура стеклования (T_c) определяет теплостойкость и морозоустойчивость полимера. В стеклообразном состоянии находятся полимеры с пространственной сетчатой структурой.
- **II Высокoэластичное** характеризуется подвижностью звеньев или групп звеньев в цепи макромолекул (меняются углы α) при отсутствии перемещения цепи в целом, даже при небольших нагрузках. Макромолекулы способны только изгибаться.
- **III Вязкотекучее** подобно жидком, отличается от него повышенной вязкостью. Энергия теплового движения макромолекул превышает силы межмолекулярного взаимодействия, и макромолекулы свободно перемещаются под действием даже небольших усилий.

Свойства полимеров

Ориентационное упрочнение осуществляется при растяжении аморфных или кристаллических полимеров, находящихся в высокоэластическом или вязкотекучем состоянии. Макромолекулы и элементы надмолекулярных структур ориентируются в силовом поле, приобретают упорядоченную структуру. После достижения желаемой степени ориентации, полученная структура фиксируется. Возрастает межмолекулярное взаимодействие, что приводит к повышению прочности. Прочность при разрыве в направлении ориентации увеличивается в 2–5 раз, в перпендикулярном направлении прочность уменьшается на 30–50%.

Релаксация напряжений. *Механические свойства полимеров зависят от времени действия и скорости приложения нагрузок.* Под действием приложенных напряжений происходит как распрямление и раскручивание цепей (меняется их пространственная форма), так и перемещение макромолекул, пачек и других надмолекулярных структур. Все это требует определенного времени, и установление равновесия (релаксация) достигается не сразу (от 10^{-4} с до нескольких суток).

Старение - самопроизвольное необратимое изменение важнейших технических характеристик, происходящее в результате сложных химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении. Причинами старения являются свет, теплота, кислород, озон и другие немеханические факторы. Старение ускоряется при многократных деформациях.

Свойства полимеров (продолжение)

Вакуумстойкость. Ухудшение свойств связано с выделением из полимера различных добавок (пластификаторов, стабилизаторов) и протеканием процессов деструкции (политетрафторэтилен). Для резин на основе углеродородных каучуков ускоряются накопление остаточной деформации и релаксации напряжения, что уменьшает работоспособность. Для ориентированных полимеров (полиамиды, полиэтилен, полипропилен) долговечность в вакууме и на воздухе одинаковы.

Абляция – это разрушение материала, сопровождающееся уносом его массы при воздействии горячего газового потока. Материалы на основе полимеров линейного строения имеют низкую стойкость (происходит деполимеризация и деструкция). Температура абляции не превышает 900 °С. Материалы на основе термостойких полимеров лестничного или сетчатого строения (фенолоформальдегидные, кремнийорганические и др.) имеют более высокую стойкость к абляции.

Адгезия - слипание разнородных тел, приведенных в контакт. Адгезия обусловлена межмолекулярным взаимодействием. На способности полимеров к адгезии основано их использование в качестве пленкообразующих материалов (клеи, герметики, покрытия), а также при получении наполненных и армированных полимерных материалов. Для создания адгезионного соединения один из материалов должен быть пластичным, текучим (адгезив), а другой может быть твердым (субстрат).

Пластмассы

Пластмассы (пластики) - органические материалы на основе полимеров, способные при нагреве размягчаться и под давлением принимать определенную устойчивую форму.

Простые пластмассы состоят только из полимеров.

Сложные пластмассы помимо полимеров включают добавки:

наполнители (40—70%) для повышения твердости, прочности, жесткости, а также придания особых свойств. Форма наполнителя – порошок, волокна, ткани.

пластификаторы (стеарин, олеиновая кислота) – 10-20% повышают эластичность, пластичность и облегчают обработку пластмасс.

отвердители (амины) – для создания межмолекулярных связей и встраивания молекул отвердителя в общую молекулярную сетку.

красители (минеральные пигменты, спиртовые растворы органических красок) придают пластмассам определенную окраску и снижают их стоимость.

Классификация пластмасс

По характеру связующего:

- Термопласты
- Реактопласты

По виду наполнителя:

- Порошковые
- Волокниты
- Слоистые пластики
- Газонаполненные



Общие свойства пластмасс

- низкая плотность (обычно $1-1,8 \text{ г/см}^3$, в некоторых случаях $0,02-0,04 \text{ г/см}^3$);
- высокая коррозионная стойкость.
- высокие диэлектрические свойства;
- хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными;
- механические свойства широкого диапазона. Пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими.
- антифрикционные свойства. Например, **полиамидные** подшипники скольжения длительное время могут работать без добавления смазочного материала;
- высокие теплоизоляционные свойства;
- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) – литьем, прессованием, формованием в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплостойкость ($100-120 \text{ }^\circ\text{C}$). Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до $-70 \text{ }^\circ\text{C}$), а в отдельных случаях – при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам.

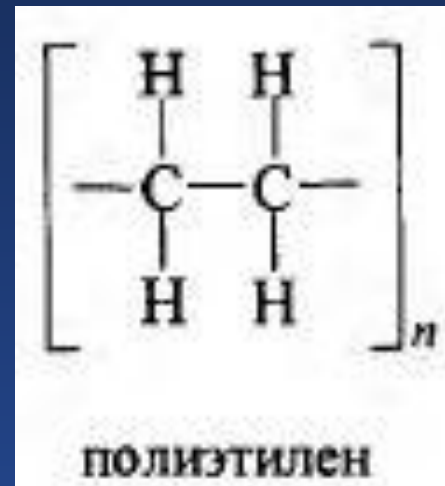
Области применения пластмасс

1. Конструкционные общего назначения.
2. Конструкционные специального назначения (как фрикционные, антифрикционные, тепло- и электроизоляционные, уплотнители, химически стойкие, декоративные).
3. С особыми физико-химическими свойствами.

Термопласты

Полиэтилен получают полимеризацией этилена при низком и высоком давлении. Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) имеет высокую плотность и кристалличность до 74—95%. Макромолекулы полиэтилена высокого давления (ПЭВД) имеют более разветвленное строение и низкую плотность. С увеличением плотности и кристалличности полиэтилена возрастают его прочность и теплостойкость. Полиэтилен способен длительное время работать при 60 - 100 °С. Морозостойкость достигает -70 °С и ниже. Химически стоек и нерастворим в растворителях при 20 °С.

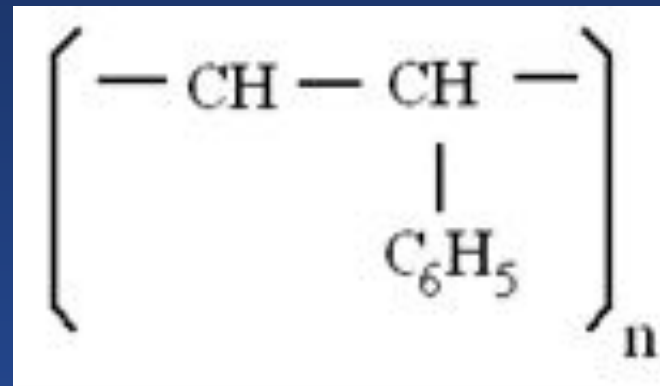
Полиэтилен применяют для изоляции защитных оболочек кабелей проводов, деталей высокочастотных установок и для изготовления коррозионностойких деталей — труб, прокладок, шлангов. Его выпускают в виде пленки, листов, труб, блоков. Полиэтилен подвержен старению. Для защиты от старения в полиэтилен вводят сажу 2—3%, замедляющую процесс старения в 30 раз.



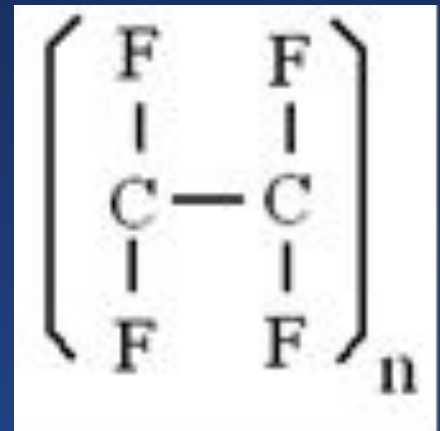
Термопласты

Полистирол

Полярный, аморфный, имеющий преимущественно линейное строение. Обладает высокой твердостью и жесткостью. Имеет высокие диэлектрические свойства, химическую стойкость в щелочах и кислотах, маслах. При температуре выше 200 °С разлагается с образованием стирола. Полистирол хрупок при низких температурах, на поверхности постепенно образуются трещины, приводящие к разрушению.



Термопласты



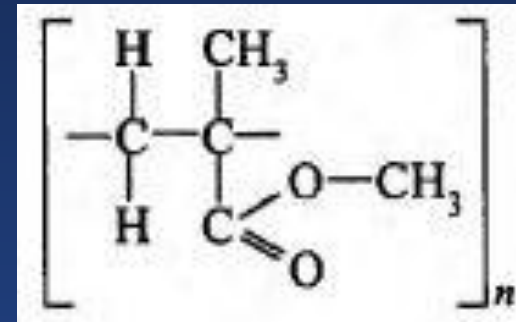
Политетрафторэтилен (фторпласт 4)

Неполярен, имеет аморфно-кристаллическую структуру, способен работать при температуре до 250 °С. Имеет невысокую твердость, обладает уникальной химической стойкостью в соляной, серной, азотной кислотах, царской водке, в щелочах и перекисях. Этот материал не горит и не смачивается водой и многими жидкостями. Не охрупчивается до -269 °С и сохраняет пластичность до -80 °С. Имеет низкий коэффициент трения (0,04), не зависящий от температуры.

Недостатком являются токсичность из-за выделения фтора во время работы при высоких температурах и трудность переработки из-за низкой пластичности.

Служит для изготовления деталей, стойких к действию агрессивных сред (емкости для хранения сильных окислителей, аккумуляторы, трубы, шланги, мембраны, уплотнители, антифрикционные покрытия на металлических втулках, подшипниках, а также на электрических и радиотехнических деталях)

Термопласты



Полиметилметакрилат (органическое стекло) – это полярный аморфный полимер. Температура стеклования – 114 °С, температура размягчения +80°С. Эти стёкла легче и прочнее, чем силикатные; легко обрабатываются резанием, свариваются, окрашиваются. Их прочность выше, чем у термопластов. Они стойки к щелочам, разбавленным кислотам, смазкам. Выпускается в виде листов 0,8–4 мм для изготовления многослойных стекол (триплексов), остекления кабин самолетов и автомобилей, создания оптических линз.



Термопласты

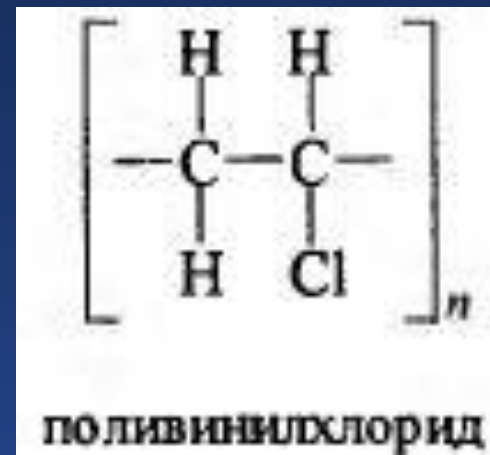
Поливинилхлорид линейный аморфный полимер.

ПВХ стоек в воде, щелочах, разбавленных кислотах, маслах, бензине.

Размягчается при температуре, близкой к 70 °С.

Поливинилхлорид используют в виде винипласта и пластиката. **Винипласт** содержит стабилизаторы (карбонаты металлов) и представляет собой непрозрачное твердое вещество. Хорошо поддается механической обработке, легко сваривается, склеивается различными клеями. Материал применяют для облицовки гальванических ванн и в качестве защитного покрытия металлических емкостей. Винипласт склонен к хладотекучести, чувствителен к надрезам, отличается хрупкостью при низких температурах и низкой теплостойкостью.

Пластикаты получают, вводя в ПВХ пластификаторы — труднорастворимые органические жидкости. Пластифицированный ПВХ отличается повышенной эластичностью и морозостойкостью и более низкими электроизоляционными свойствами. Пластикат выпускается в виде листов, лент, трубок. Его используют в качестве уплотнителя воздушных и гидравлических систем, изолятора проводов и защитных оболочек кабелей аккумуляторных баков.



Свойства некоторых термопластов

Материал	Плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С		σ_B , МПа	Модуль упругости, МПа	δ ,% на разрыв	Ударная вязкость, КДж/м ²
		min	max				
Полиэтален ПЭВД	913–29	-70	105	10–17	120–260	15–20	Не ломается
Полиэтален ПЭНД	949–53	-70	125	18–35	650–750	10–12	2–150
Полистирол	1050–080	-20	90	35	2700	1,5	16–20
Фторопласт4	215–2240	-269	250	14–35	470–850	250–500	10–100
Поливинилхлорид	1400	-40	80	40–120	2600–3000	5–100	75–80
Полиметилакрилат	1200	-60	60	63–100	2900–4160	2,5–20	8–18

Области применения некоторых термопластов

Пластмасса	Интервал рабочих температур, °С	Область применения
Полиэтилен высокого давления	-70 ... +70	Упаковка, ненагруженные детали машин и оборудования, футляры, покрытия, фольги
Полиэтилен низкого давления	-70 ... +80	То же
Полистирол	-40 ... +65	Оборудование радиотехники и фотографии, электроизоляция, пенящиеся изоляционные материалы (стиропиан)
Полипропилен	-20 ... +130	Трубы, детали автомобилей, элементы холодильников, емкости, упаковка
Поливинилхлорид	-40 ... +70	Химическое оборудование, трубы, профили, детали машин, элементы насосов и вентиляторов, упаковка, покрытие полов, искусственная кожа, оконные рамы и т. п.
Полиамид	-60 ... +100	Детали машин, канаты, шнуры, одежда
Полиметилметакрилат (органическое стекло)	-60 ... +100	Детали освещения и оптики, остекление в самолетостроении, на наземном и водном транспорте
Поликарбонаты	-100 ... +135	Точные детали машин и аппаратуры, радио- и электротехника, фотографические пленки и др.
Политетрафторэтилен (тефлон)	-269 ... +260	Химическая, электротехническая, машиностроительная (подшипники) промышленность

Реактопласты

Пластмассы с порошковым наполнителем готовят на основе фенолформальдегидных (новолачных и резольных), кремнийорганических и других смол. Другими компонентами пластмасс являются пластификаторы, красители и наполнители — древесная мука, молотый кварц, асбест, слюда, графит. Готовые изделия получают прессованием.

Пресс-порошки (композиции) характеризуются изотропностью, невысоким уровнем механических свойств, низкой ударной вязкостью и удовлетворительными электроизоляционными характеристиками. Марка пресс-порошка складывается из набора букв и набора цифр. Буква К обозначает слово «композиция». Следующее за ней число — номер (марка) связующей смолы, далее — номер наполнителя (1 - целлюлоза, 2 — древесная мука, 3 — слюдяная мука, 4 — плавиковый шпат, 5 — молотый кварц, 6 — асбест.

Марка К-220-21 означает, что пресс-порошок изготовлен на основе резольной смолы № 220 и наполнителей: древесной муки и целлюлозы.

Пресс-порошки делятся на три группы:

1 — для ненагруженных деталей, 2 — для деталей электротехнического назначения, 3 — специального назначения (влаго- и теплостойкие, грибостойкие, повышенной прочности).

Реактопласты с волокнистым наполнителем

В зависимости от наполнителя различают следующие марки пластмасс: асбестовые нити (асбоволокнит) К6, КФ3, стеклянное волокно – стекловолокнит (АГ-4В, АГ-4С). Эти материалы обладают большей, чем порошковые пластмассы, ударной вязкостью и прочностью при растяжении.

Асбоволокниты. Наполнитель – асбест, связующее – формальдегидная смола. Применяют для фрикционных дисков, колодок тормозов.

Стекловолокниты. Наполнитель – стекловолокно, связующее – синтетическая смола. Применяют для деталей любой конфигурации, работающих в диапазоне температур -60° до 200°C . Волокниты применяют также для деталей общего технического назначения: силовые детали (шкивы, маховики, втулки), электроизоляторы.

Слоистые пластики

Гетинакс – получают пропитыванием бумаги модифицированными смолами (фенольными, карбомидными). Применяется для обшивки вагонов, кабин самолетов, кают, в строительстве.

Текстолит – получают из связующего и наполнителя (ткани хлопчатобумажные – шифон, миткаль, бязь). Применяются для изготовления зубчатых колес, вкладышей подшипников. Рабочая температура не должна превышать 90 °С

Асботекстолит. Наполнитель – асбестовая ткань и до 43% связующие смолы. Конструкционный, фрикционный и термоизоляционный материал. Применяют для изготовления, фрикционных дисков, тормозных колодок, в качестве теплоизоляционного материала.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) – это искусственный древесный материал из лущеного шпона (тонкой непрерывной стружки), пропитанного и склеенного резольным фенолоформальдегидным полимером. Имеет высокие физико-механические свойства, низкий коэффициент трения. Применяют для зубчатых колес, работающих без шума, подшипников, втулок, шкивов, деталей лодок и т.д.

Стеклопластики – пластмассы с наполнителем из стекловолоконистых материалов. Обладает высокой прочностью ($\sigma_B > 500$ МПа), по удельной прочности превосходит металлические сплавы, коррозионностоек, теплостоек, имеет высокие диэлектрические свойства. Широко применяется в самолетостроении, электротехнике (обшивка крыльев, закрылки детали оперения и т.д.).

Металлоорганопластики (алоры) – это материал, в котором последовательно уложены слои алюминиевого сплава и армированного композиционного полимера – органопластика.

Пластмассы с газовоздушным наполнителем

Газовоздушные (ячеистые) пластмассы получают химическим и физическим способами из термореактивных полимеров. Ячеистые пластмассы разрушаются постепенно.

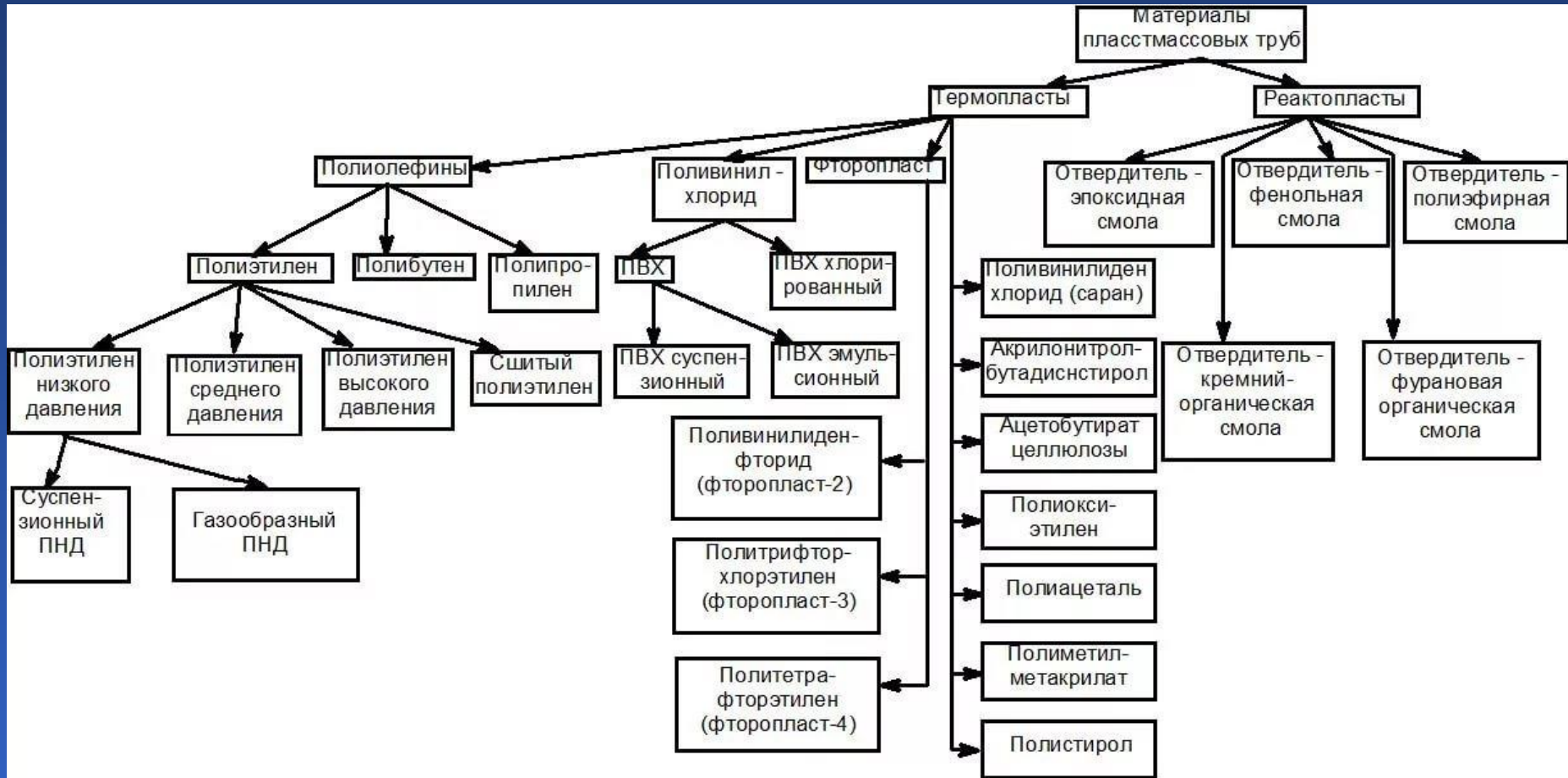
Химический способ получения ячеистой газонаполненной структуры – это разложение газообразователей или взаимодействие компонентов при повышенных температурах.

Физический – это интенсивное расширение растворённых газов при уменьшении давления или повышении температуры. Объём пор в этих полимерах – 90–98 %.

В зависимости от характера пор полимеры делят на 2 группы:

- - *пенопласты* на основе полистирола, поливинилхлорида, полиэтилена (с закрытыми порами в виде ячеек); они радиопрозрачны; Их термостойкость не превышает 60 °С.
- - *поропласты* (полиуретан или поролон) – поры сообщающиеся). Поропласты имеют высокое водо- и звукопоглощение.

Материалы пластмассовых труб



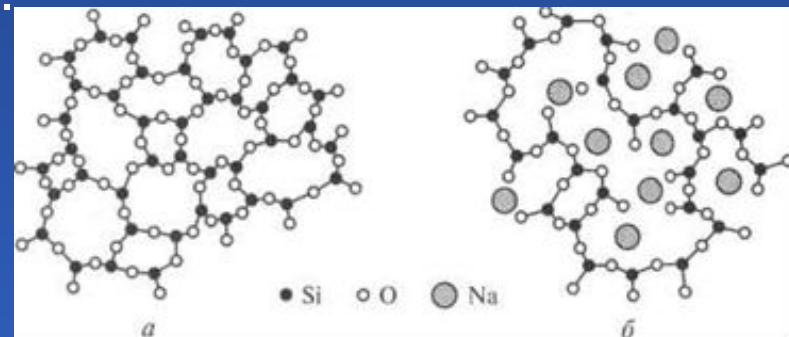
Неорганическое стекло

Неорганическое стекло – химически сложный, аморфный, макроскопически изотропный материал, обладающий свойствами хрупкого тела. Получается после охлаждения расплава смеси неорганических соединений (оксидов). Стекло не является физической смесью оксидов, при варке компоненты вступают в химическое взаимодействие, в результате возникает **химическое соединение сложного состава**.

Аморфное состояние стекла связано с особенностями ковалентной связи между атомами в оксидах, которая характеризуется *насыщенностью и направленностью*, что приводит только в ближнему порядку в расположении атомов.

Для стекла характерны:

- Изотропность
- Температурный интервал размягчения
- Высокая вязкость в области температуры размягчения (на десять порядков больше, чем у расплавов металлов)



Состав стекла

Стеклообразователи – оксиды, образующие структурный скелет стекла. Это оксиды Si, B, Al, P, Ge, As:

SiO_2 – силикатное стекло, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ – алюмосиликатное, $\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ – боросиликатное и т.д.

Модификаторы – для придания стёклам особых свойств, упрощения технологии производства, удешевления:

Оксиды щелочных металлов уменьшают T размягчения, оксиды Cr, Fe, Co меняют цвет, V_2O_5 делает стекло электропроводным, PbO меняет коэффициент преломления, AgBr придаёт фототропность и т.д.

Компенсаторы подавляют негативное действие модификаторов

Классификация стекла

По **химическому составу**:

силикатное, алюмосиликатное, боросиликатное, алюмоборосиликатное и др.

В зависимости **от содержания модификаторов**:

- щелочные
- бесщелочные.

По **назначению**:

- строительное (оконное, стеклоблоки),
- бытовое (стеклотара, посуда)
- техническое (оптическое, электротехническое, химическое и др.)

По **оптическим свойствам**:

прозрачное, окрашенное, бесцветное и рассеивающее свет.

Свойства стекла

- плотность – 2200 – 6500 кг/м³ (для стекол с оксидами свинца – до 8000 кг/м³);
- коэффициент теплопроводности – 0,7–15 Вт/(м·К);
- температурный коэффициент линейного расширения:
 - для кварцевых стекол – $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
 - для строительных стекол – $9,0 \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- Теоретическая прочность – 10-12 ГПа
- $\sigma_{\text{раст}} = 30\text{--}90 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{сж}} = 500\text{--}2000 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{изг.}} = 50\text{--}150 \text{ МПа}$.
- ударная вязкость – 1,5–2,5 кДж/м²;
- модуль сдвига - $(2\text{--}3) \cdot 10^4 \text{ МПа}$;
- модуль Юнга - $(7\text{--}7,5) \cdot 10^4 \text{ МПа}$;
- коэффициент Пуассона - 0,184–0,26;
- твердость 5–7 ед. по Моосу;
- удельное электросопротивление – $10^{12}\text{--}10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{см}$;
- диэлектрическая проницаемость – 3,5–16;
- химическая стойкость;
- высокие оптические свойства.

Стекло поддается механической обработке: его можно пилить циркулярными пилами с алмазной набивкой, обтачивать победитовыми резцами, резать алмазом, шлифовать, полировать.

Повышение прочности стекла

Низкая прочность стекла объясняется наличием на поверхности сетки микроскопических трещин, возникающих при остывании (низкий коэффициент теплопроводности и большой ТКЛР приводят к формированию поверхностном слое растягивающих напряжений).

Уменьшение площади поверхности – применение композитов со стекловолокном малого диаметра для кварцевого листового стекла $\sigma_B = 30\text{--}90$ МПа, для кварцевого стекловолокна $\sigma_B = 5000\text{--}6000$ МПа).

Модифицирование поверхности:

- Химическое травление ($\sigma_B = 2000$ МПа),
- Ионный обмен ($\sigma_B = 1000$ МПа),
- Закалка ($\sigma_B = 1500$ МПа),
- Нанесение полимерной плёнки

Модификация внутренней структуры – частичная управляемая кристаллизация, получение ситаллов.

Применение стекла

Электротехническое стекло обладает высокими значениями удельного электросопротивления, большой электрической прочностью, низким значением диэлектрических потерь и сравнительно высокой диэлектрической проницаемостью.

Как **диэлектрик** стекло используют для колб осветительных ламп и радиоламп, в электровакуумных устройствах, для изоляторов, для герметизации интегральных схем. **Электропроводящие** (полупроводниковые) стекла: халькогенидные и оксидные ванадиевые – находят применение в качестве термисторов, фотосопротивлений.

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

Применение стекла

Транспортное стекло. В машиностроении стекло эффективно применяется как конструкционный материал при условии нейтрализации хрупкости.

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

Разновидностями транспортного стекла являются: применяемые для остекления в транспортных средствах, скафандрах.

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

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

Эти стёкла применяются для остекления в транспортных средствах, скафандрах.

Применение стекла

Светотехническое стекло. Оптические свойства стекол зависят от их окраски, которая определяется химическим составом и состоянием поверхности. Оптические изделия должны иметь изотропную, свободную от напряжений структуру, которую получают отжигом, и гладкие полированные поверхности.

Обычное неокрашенное листовое стекло пропускает до 90%, отражает примерно 8% и поглощает около 1% видимого и частично инфракрасного света; ультрафиолетовое излучение поглощается почти полностью. Кварцевое стекло является прозрачным для ультрафиолетового излучения.

Светорассеивающие стекла содержат в своем составе фтор.

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

Применение стекла

Термостойкое и тугоплавкое стекло.

«Пирекс» – термостойкое стекло на основе SiO_2 (80,5%) с повышенным содержанием B_2O_3 (12%), Na_2O (4%), а также оксидами алюминия, калия и магния.

«Мазда» – тугоплавкое стекло на основе SiO_2 (57,6%) с оксидами алюминия (25%), кальция (7,4%), магния (8%) и калия. «Пирекс» и «Мазда» используются для изготовления изделий, использующихся при повышенных температурах эксплуатации: оболочки термометров, смотровые стекла и др.

Легкоплавкое стекло. Эти стекла изготавливают на основе PbO (70%) с добавлением B_2O_3 (20%) или V_2O_5 (68,8%) с добавлением ZnO (28,6%) и Na_2O (2,6%); используются для изготовления эмалей, глазури и припоев для спаивания стекла.

Применение стекла

Строительное стекло .

Листовое стекло изготавливают из стеклянной массы, в состав которой входят 71–73% SiO_2 , 13,5–15% Na_2O , до 10% CaO , до 4% MgO и до 2% Al_2O_3 . Листовое стекло вырабатывают трех сортов и в зависимости от толщины шести размеров (марок): 2; 2,5; 3; 4; 5 и 6 мм. Это основной вид стекла, используемый для остекления оконных и дверных проемов, витрин, наружной и внутренней отделки зданий.

Облицовочное стекло применяют для отделки фасадов и внутренних помещений здания. Требования: высокая декоративность, атмосферостойкость и долговечность.

Стеклоблоки – полые блоки из двух отформованных половинок, сваренных между собой. Светопропускание – не менее 65%, светорассеяние – около 25%. Применяются для заполнения световых проемов в наружных стенах и устройства светопрозрачных покрытий и перегородок;

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

Стеклопрофилит – крупногабаритные строительные панели из профильного стекла, изготавливаемые методом непрерывного проката коробчатого, таврового, швеллерного и полукруглого профилей. Применяется для устройства светопрозрачных ограждений зданий и сооружений.

Применение стекла

Стекловолокно – материал, получаемый из расплавленной массы бесщелочного алюмоборосиликатного стекла, а также высокопрочного стекла на основе оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO .

Диаметр стекловолокна - от 0,1 до 300 мкм.

Форма сечения - круг, квадрат, прямоугольник, треугольник, шестиугольник.

По длине волокно делится на штапельное (от 0,05 до 2–3 м) и непрерывное. Плотность стекловолокна - 2400–2600 кг/м³.

Прочность на растяжение - до 6000 МПа.

Стекловолокно имеет высокие тепло-, электро- и звукоизоляционные свойства, оно термо- и химически стойко, негорюче, не гниет.

Из стекловолокна изготавливают стекловату, ткани и сетки, а также нетканые материалы в виде жгутов и холстов, стекломатов.

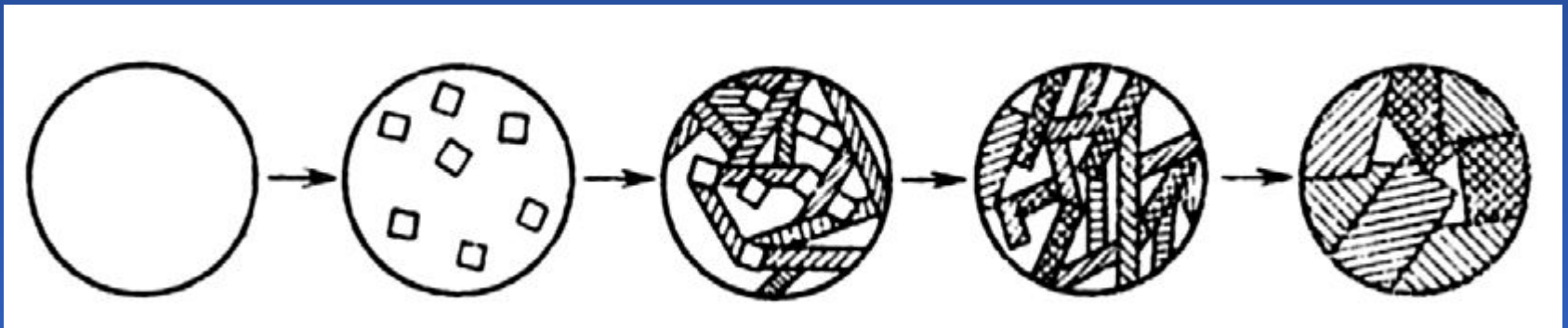
Ситаллы

Ситаллы (стекло+кристалл) – частично закристаллизованные стёкла, получаемые регулируемой кристаллизацией стекломатериала при повышенных температурах. В объёме материала формируются микрообласти кристаллического строения размером до 1 мкм, концентрация их может достигать 50% по объёму.

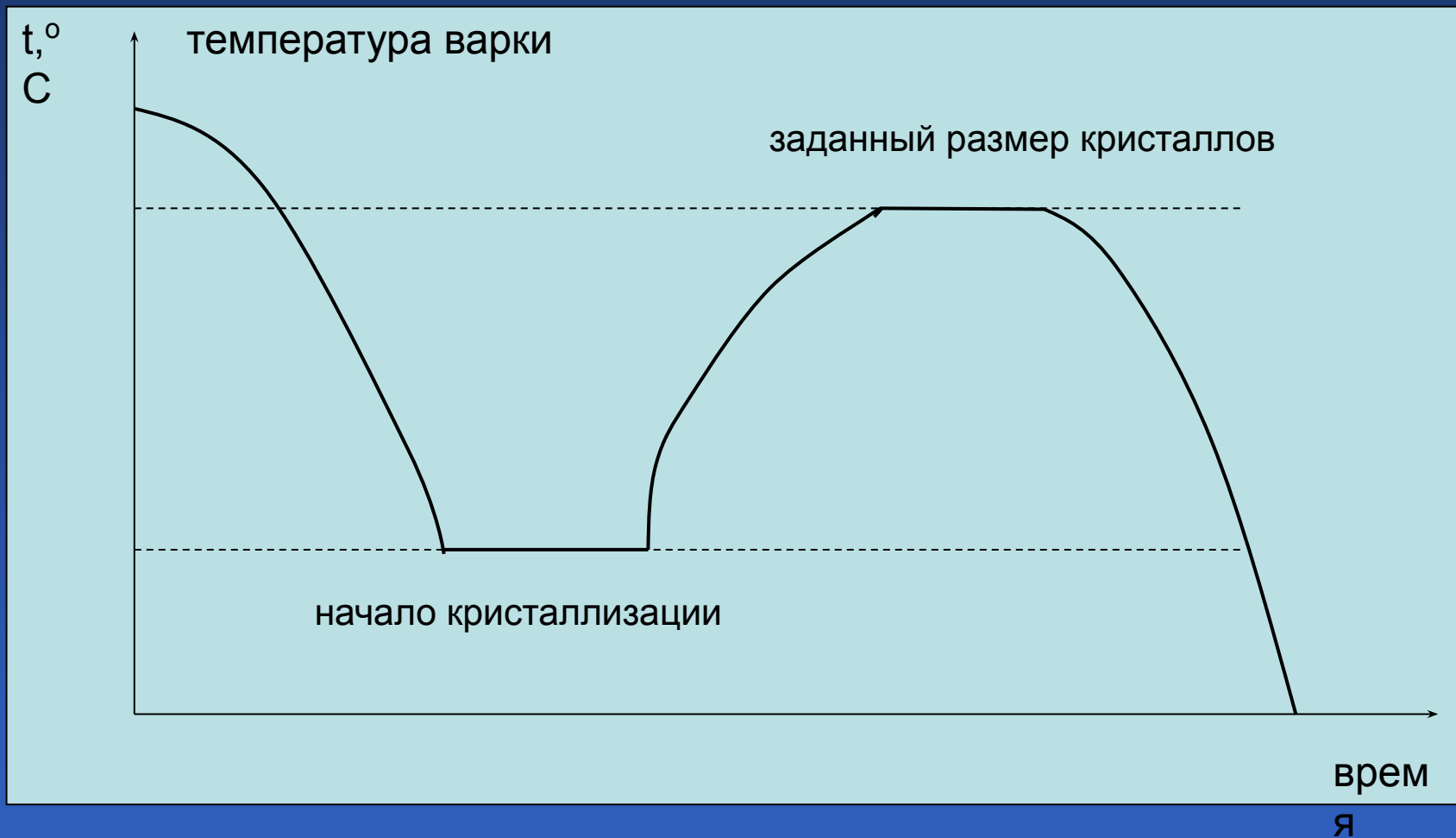
Состав ситаллов:

оксиды – Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO и др.;

нуклеаторы (катализаторы кристаллизации) – мелкие частицы Au, Pt, соли Au, Ag, Cu, оксиды тугоплавких металлов. Нуклеаторы являются центрами кристаллизации и должны иметь кристаллическую решетку, подобную выделяющимся из стекла кристаллическим фазам.



Получение ситаллов



Свойства ситаллов

плотность - 2400–2950 кг/м³;
температура размягчения - 1250–1350 °С;
низкая теплопроводность - 2–7 Вт/(м·К);
ТКЛР - $(7–300) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
 $\sigma_{\text{сж}} = 7–2000 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{в}} = 112–160 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{изг}} = 7–350 \text{ МПа}$;
модуль Юнга - 84–141 ГПа;
хрупкость (при ударной вязкости 4,5–10,5 кДж/м²);
микротвердость – 7000– 10500 МПа;
высокая износостойкость;
термостойкость – 200–700°С (до 1100°С);
диэлектрические свойства;
химическая стойкость;
газонепроницаемость и нулевое водопоглощение.

По внешнему виду ситаллы чаще непрозрачны (темного, коричневого, серого, кремового и светлого цветов). Причина особо ценных свойств ситаллов заключается в их исключительной мелкозернистости и почти идеальной поликристаллической структуре. В них совершенно отсутствует пористость. Усадка материала при его переработке незначительна. Большая абразивная стойкость делает их малочувствительными к поверхностным дефектам.

Применение ситаллов

В строительстве применяют **шлакоситаллы** и **пеношлакоситаллы**.

В машиностроении:

Конструкционные:

- подшипники, детали двигателей, трубы жаростойкие плитки, лопасти компрессоров,
- детали химических насосов, реакторов, мешалок, запорных клапанов

Инструментальные:

- точные калибры металлорежущих станков, метрологические меры длины
- фильеры для вытягивания проволоки и синтетического волокна,
- абразивы для шлифования;

Радио- и электротехнические:

- подложки, оболочки, платы, антенны обтекателей и др.,

Фототехнические:

- сетчатые экраны телевизоров, дорожные знаки, зеркала телескопов.

Керамика

многокомпонентный гетерогенный материал, получаемый спеканием высокодисперсных минеральных частиц (глин, оксидов, бескислородных соединений).

Структура и свойства керамики определяются **выбором компонентов** и **элементами технологии** получения изделий. Структура технической керамики конструируется: исходя из условий эксплуатации изделия задается оптимальный тип структуры, который реализуется средствами технологии.

Технология производства керамических изделий:

Подготовка исходных порошков – дробление природных компонентов, агломерация продуктов химических реакций. Этот этап обеспечивает технологичность дальнейшего цикла.

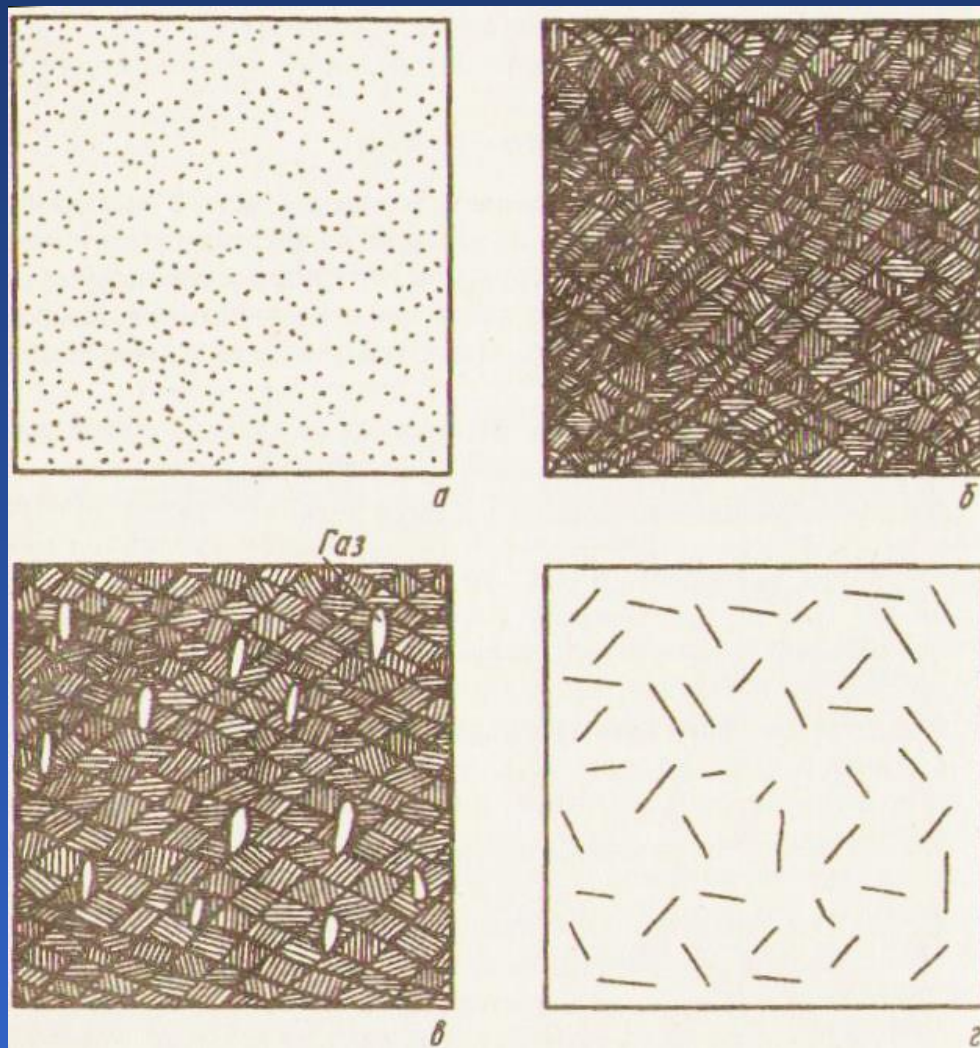
Смешивание компонентов. Обеспечивается однородность состава будущего изделия.

Формование. Обеспечивается форма будущего изделия. Создаётся структура будущего изделия.

Спекание (900-2000°C). Обеспечиваются физико-механические свойства.

Структура керамики

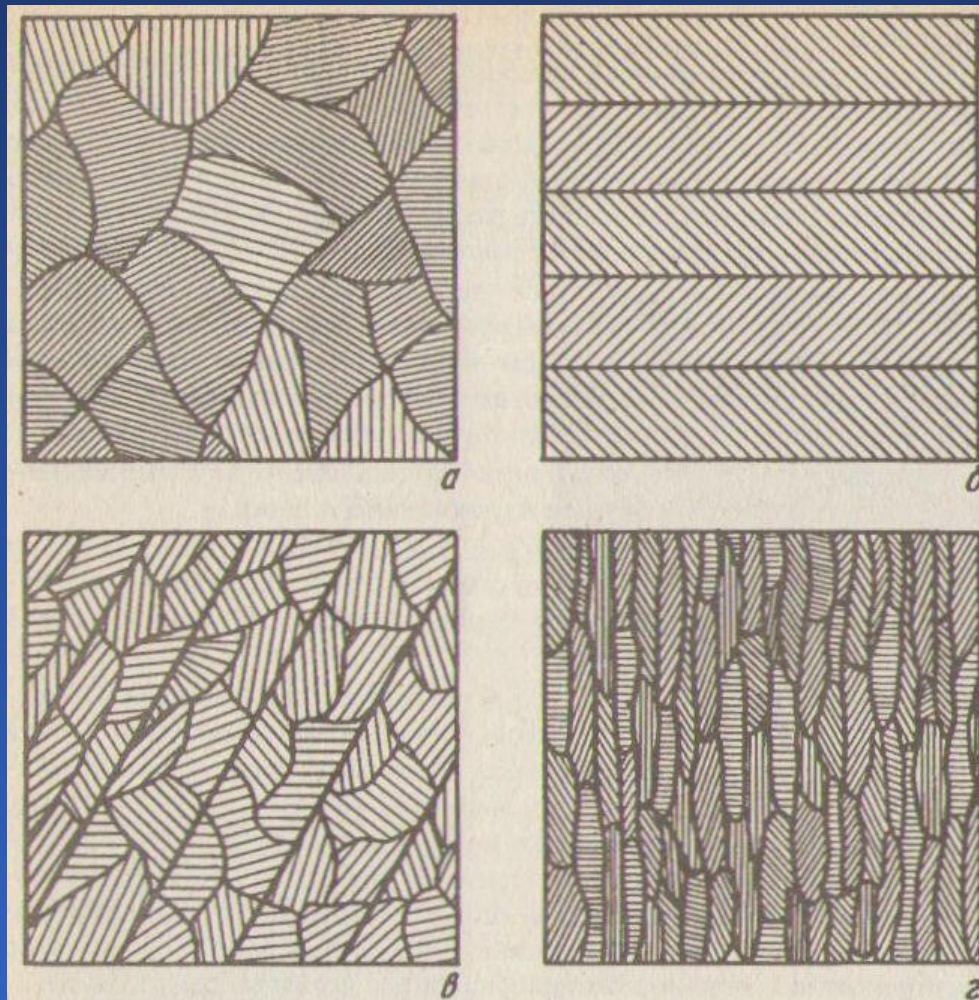
Макроизотропная



- а) микрокристаллическая
- б) зернистая
- в) пористая
- г) армированная

Структура керамики

Анизотропная



- а) крупнозернистая
- б) слоистая
- в) волокнистая
- г) ориентированная

Фазовый состав керамики

кристаллическая фаза (более 50%) – химические соединения и (или) твердые растворы. Кристаллическая фаза является основой керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других основных свойств;

аморфная фаза (1–40%) – прослойки стекла, химический состав которого отличается от кристаллической фазы. Стекловидная фаза ухудшает механическую прочность и тепловые показатели, но стеклообразующие компоненты облегчают технологию изготовления изделий;

газовая фаза – газы, находящиеся в порах. По структуре порового пространства различают керамику с открытыми и закрытыми порами. Наличие пор ведет к снижению механической и электрической прочности, росту электрических потерь.

Свойства керамических материалов

плотность - 1800–3900 кг/м³;

водопоглощение:

- для пористой керамики 6–20% по массе (12–40% по объему),
- для плотной – 1–5% по массе (2–10% по объему);

теплопроводность - 0,8–1,16 Вт/(м·К). (высокая теплопроводность у керамики на основе Al₂O₃ и BeO);

прочность: $\sigma_{\text{раст}} = 30\text{--}300$ МПа, $\sigma_{\text{сж}} = 3000$ МПа;

твердость, близкая к твердости алмаза;

высокая **хрупкость**;

высокое электрическое сопротивление, отличные диэлектрические свойства;

водо-, химическая, коррозионная и жаростойкость.

Недостатком керамики является высокая усадка при спекании – 20–25% и выше, что создает трудности с обеспечением точных размеров изделия. Обработка готовых изделий затруднена, так как спеченная керамика обладает высокой твердостью, режется с трудом и только абразивами.

Классификация керамики

По назначению: строительная и техническая.

Строительную керамику производят из природного минерального сырья – каолина, белых глин, кремнезема, кварца, полевого шпата, вспучивающихся глин, кирпичных глин.

Техническая керамика производится из особо чистых порошков оксидов (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BeO , CaO и др.) и бескислородных соединений (SiC , TiB_2 , ZrB_2 , BN , Si_3N_4 , MoSi_2).

Строительная керамика

- кирпич, фасадные керамические изделия, керамические плитки для внутренней облицовки, санитарно-технические изделия
- дорожный кирпич
- теплоизоляционная керамика
- огнеупорная керамика
- кислотоупорная керамика

Техническая керамика на основе оксидов

Корундовая керамика (Al_2O_3) обладает высокой прочностью, которая сохраняется при высоких температурах, химически стойка, отличный диэлектрик.

Применяется: резцы, используемые при больших скоростях резания, калибры, фильеры для протяжки стальной проволоки, детали высокотемпературных печей, подшипники печных конвейеров, детали насосов, свечи зажигания в двигателях внутреннего сгорания. Керамику с плотной структурой используют в качестве вакуумной, пористую — как термоизоляционный материал. В корундовых тиглях проводят плавление различных металлов, оксидов, шлаков.

Корундовый материал *микролит* (ЦМ-332) по свойствам превосходит другие инструментальные материалы, его плотность до 3960 кг/м^3 , $\sigma_{\text{сж}}$ до 5000 МПа, твердость 92—93 НРА и красностойкость до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Из микролита изготавливают резцовые пластинки, фильеры, насадки, сопла, матрицы и др.

Техническая керамика на основе оксидов

Керамика на основе ZrO_2 инертна, имеет низкий коэффициент теплопроводности. Она используется для изготовления огнеупорных тиглей для плавки металлов и сплавов, как тепловая изоляция печей, аппаратов и реакторов.

Керамика на основе MgO и CaO стойка к действию основных щелочных металлов, Их применяют для изготовления тиглей, кроме того, MgO используют для футеровки печей, пирометрической аппаратуры и т. д.

Керамика на основе BeO отличается высокой теплопроводностью и термостойкостью. BeO обладает способностью рассеивать ионизирующее излучение высоких энергий, имеет высокий коэффициент замедления тепловых нейтронов, применяется для изготовления тиглей для плавки некоторых чистых металлов, в качестве вакуумной керамики в ядерных реакторах.

Керамика на основе ThO_2 и UO_2 имеет высокую температуру плавления, но обладает высокой плотностью и радиоактивна. Эти виды керамики применяют для изготовления тиглей для плавки родия, платины, иридия и других металлов, в конструкциях электропечей, для тепловыделяющих элементов в энергетических реакторах.

Бескислородная техническая керамика

Бескислородные соединения отличаются высокими огнеупорностью (2500—3500 °С), твердостью (иногда как у алмаза) и износостойкостью по отношению к агрессивным средам.

Материалы обладают высокой хрупкостью. Сопротивление окислению при высоких температурах (окалиностойкость) карбидов и боридов составляет 900—1000 °С, несколько ниже оно у нитридов. Силициды могут выдерживать температуру 1300—1700 °С

Карборунд - карбид кремния SiC обладает высокой жаростойкостью (1500-1600 °С), высокой твердостью, устойчивостью к кислотам и неустойчивостью к щелочам; применяется в качестве нагревательных стержней, защитных покрытий графита и в качестве абразива.

Бориды TiB_2 , ZrB_2 обладают металлическими свойствами, они износостойки, тверды, стойки к окислению. Применяют для изготовления термопар, работающих при температуре выше 2000 °С в агрессивных средах, труб, емкостей, тиглей.

Бескислородная керамика

Нитрид бора α -BN («белый графит») имеет графитоподобную структуру. Это мягкий порошок, используется как огнестойкий смазочный материал. Спеченный нитрид бора применяется в качестве материала обтекателей антенн и электронного оборудования летательных аппаратов.

β -BN (эльбор) - алмазоподобный нитрид бора с кубической структурой. Плотность эльбора 3450 кг/м³, температура плавления 3000 С. Он является заменителем алмаза, стоек к окислению до 2000 °С (алмаз начинает окисляться при температуре 800 °С).

Нитрид кремния Si_3N_4 устойчив на воздухе и в окислительной атмосфере до 1600 °С. По удельной прочности при высоких температурах превосходит все конструкционные материалы, а по стоимости он дешевле жаропрочных сплавов в несколько раз. Нитрид кремния прочный, износостойкий, жаропрочный материал. Он применяется в двигателях внутреннего сгорания (головки блока цилиндров, поршни и др.), стоек к коррозии и эрозии, не боится перегрева теплонагруженных деталей.

Дисилицид молибдена (MoSi_2) окислостоек, не реагирует с расплавленным Pb, Sn, Na. Применяется в качестве стабильного электронагревателя в печах при температуре 1700 °С в течение нескольких тысяч часов. Из спеченного MoSi_2 , изготавливают лопатки газовых турбин, сопловые вкладыши двигателей; его используют как твердый смазочный материал для подшипников, для защитных покрытий тугоплавких металлов от высокотемпературного окисления.

Свойства оксидной керамики

Окси-ды ¹	Темпе-ратура плавления, °С	Плот-ность (теорети-ческая), кг/м ³	Предел прочности, МПа			Модуль упру-гости, ГПа	по твердость по Моосу	Кoeffи-циент линей-ного рас-ширения, α, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Кoeffициент теплопроводности ² , Вт/(м·К)	Удельное электри-ческое сопротивление (объем-ное), Ом·см	Стойкость к тепловому удару	Стойкость к эрозии
			при рас-тяжении	при из-гибе	при сжа-тии							
Al ₂ O ₃	2050	3 990	260	150	3000	382	9	8,4	36,2—6,08 (100—1600 °С)	10 ¹⁶	Высокая	Высокая
ZrO ₂	2700	5 600	150	230	2100	172	7—8	7,7	1,95—2,44 (100—1400 °С)	10 ⁴ (1000 °С)	Низкая	»
BeO	2580	3 020	100	130	800	310	9	10,6	218,6—151,1 (100—1600 °С)	10 ¹⁴	Высокая	Средняя
MgO	2800	3 580	100	110	1400	214	5—6	15,6	34,4—6,57 (100—1600 °С)	10 ¹⁵	Низкая	»
CaO	2570	3 350	—	80	—	—	4—5	13,8	13,8—8,37 (100—400 °С)	10 ¹⁴	»	»
ThO ₂	3050	9 690	100	—	1500	140	7	10,2	10,4—3,34 (100—1000 °С)	10 ¹³	Низкая	Высокая
UO ₂	2760	10 960	—	—	980	164,5	6	10,5	9,8—3,4 (100—1000 °С)	10 ⁹ (800 °С)	—	—

¹ Стойкость к окислению средняя.

² В скобках указана температура испытания.

Свойства бескислородной керамики

Название	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при 20 °С, МПа			Модуль упругости, ГПа	Твердость по Моосу	Коэффициент линейного расширения, α , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
			при растяжении	при изгибе	при сжатии				
Карбид кремния SiC	2600	3200	155	—	2250	394	9,2—9,5	5,2	16,7 (200—1400)
Диборид титана TiB ₂	2980	4520	140	246	1350	—	—	8,1	—
Диборид циркония ZrB ₂	3040	6090	—	—	—	—	—	6,88	—
Нитрид бора BN «белый графит»	2350	2340	50—110 (25); 0,7—1 (1000)	50—110	500—600	8,65 (25); 1,16 (1000)	1—2	7,51	15—12,3 (300—1000)
Нитрид кремния Si ₃ N ₄	1780— 1820	3200	—	160	—	317	—	2,75	30
Дисилицид молибдена MoSi ₂	2030	6240	281 (980)	473 (980)	1130 (20); 340 (1400)	430	—	8,3	48,5 (900)

Примечание. В скобках указана температура применения, °С.

Композиционные материалы (КМ)

КМ - искусственно созданные материалы, состоящие из двух или более компонентов, различающихся по составу и разделенных межфазной границей. КМ имеют новые свойства, спроектированные заранее.

Компонент, непрерывный во всем объеме композиционного материала, называется **матрицей**.

Компонент прерывистый, разделенный в объеме композиционного материала, называется **наполнителем** (армирующим компонентом).

Матрица придает требуемую форму изделию, воспринимает и равномерно перераспределяет внешнюю нагрузку на элементы наполнителя, защищает арматуру от механических повреждений и других воздействий среды. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения КМ и ее эксплуатационные свойства: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу.

Классификация композиционных материалов

По материалу матрицы:

- композиты с металлической матрицей (Al, Mg, Ti);
- композиты неметаллической матрицей (полиамиды, фторопласты, фенолформальдегидные, кремнийорганические и эпоксидные смолы, углерод, керамика).

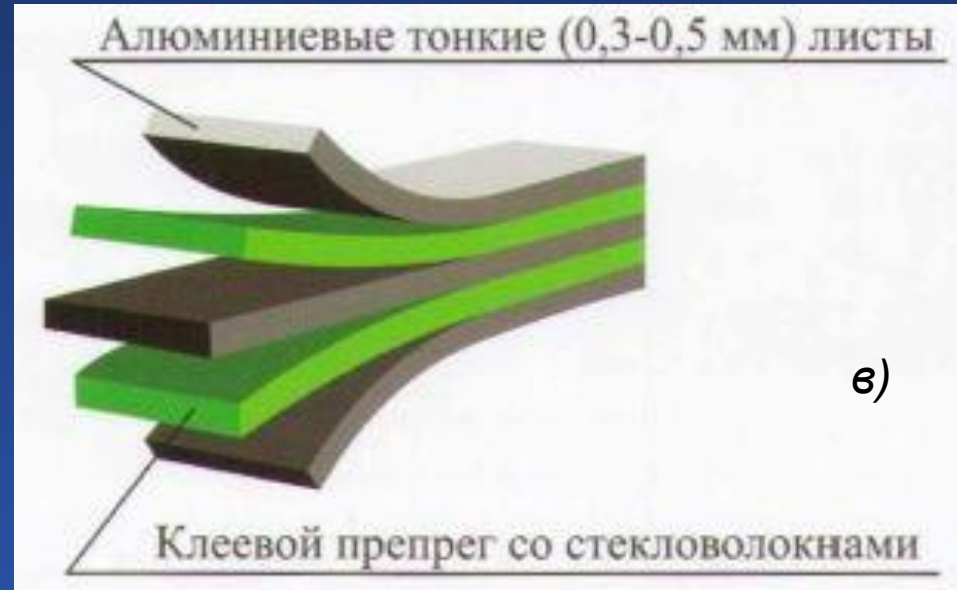
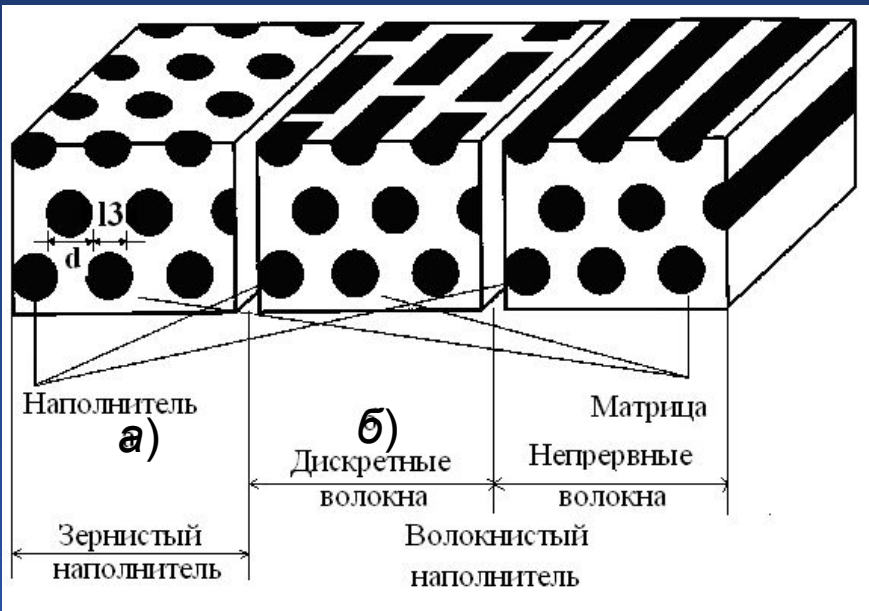
По виду наполнителя:

- с тонкодисперсными частицами (дисперсионно-упрочненные КМ);
- композиты, упрочненные волокнами (волокнистые КМ);
- слоистые КМ.

По структуре:

- изотропные;
- анизотропные.

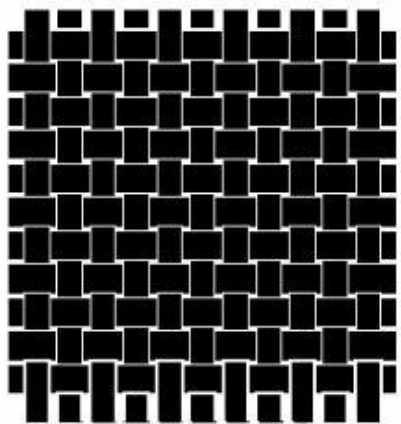
Схемы строения композиционных материалов



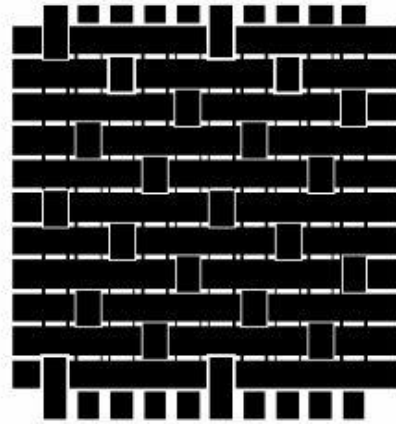
a – дисперсно-упрочненные; *б* – волокнистые; *в* – слоистые

Волокна делят на *дискретные* с $l/d \approx 10 \dots 10^3$, где l – длина волокна, d – диаметр волокна и с *непрерывным* волокном, в которых $l/d \rightarrow \infty$. Дискретные волокна располагаются в матрице хаотично. Диаметр волокон 0.1...100 мкм

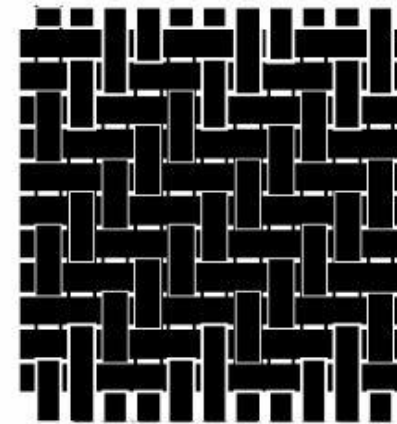
Классификация конструктивных тканей



ПОЛОТНЯНОЕ



АТЛАСНОЕ



САРЖЕВОЕ



Дисперсно-упрочненные КМ

Матрица в них является основным элементом, несущим нагрузку, а дисперсные частицы тормозят в ней движение дислокации.

Высокая прочность достигается при размере частиц 10...500 нм при среднем расстоянии между частицами 100...500 нм и равномерном их распределении в матрице. Оптимальное содержание второй фазы не превышает 5...10 % (об.).

Использование в качестве упрочняющих фаз стабильных тугоплавких соединений (оксиды тория, гафния, индия) сложные соединения оксидов и РЗМ), не растворяющихся в матричном металле, позволяет сохранить высокую прочность материала до 0.9...0.95 Тпл. Поэтому такие материалы применяют как жаропрочные.

Дисперсно-упрочненные КМ с металлической матрицей

Сплавы САП на основе Al (спеченный алюминиевый порошок). САП состоит из Al и дисперсных чешуек Al_2O_3 от 6...9% (САП-1), до 13...18% (САП-3). Плотность этих материалов равна плотности Al; они не уступают ему по коррозионной стойкости; по длительности прочности они превосходят деформированные алюминиевые сплавы. САП-1: $\sigma_B = 300$ МПа, $\delta = 8\%$. САП-3: $\sigma_B = 400$ МПа, $\delta = 3\%$.

Сплавы ВДУ на основе Ni. Наиболее высокую жаропрочность имеют сплавы ВДУ-1 (Ni, упрочнённый ThO_2), ВДУ-2 (Ni, упрочнённый HfO_2) и ВДУ-3 (Ni + 20% Cr, упрочнённый ThO_2). При температуре 1200°C сплав ВДУ-1 имеет $\sigma_{100} \approx 75$ МПа, а ВДУ-3 имеет $\sigma_{100} \approx 65$ МПа.

Применяются в авиации для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюр, панелей) и двигателей (лопаток компрессора и турбины); в космической технике для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей.

Свойства САП

Материал	Содержание Al_2O_3 , %	σ_B , МПа	$\sigma_B/(\gamma g)$, кМ	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	E , ГПа	$E/(\gamma g) \cdot 10^{-3}$, кМ
САП-1	6 – 8	300	11	220	7	67	2,1
САП-2	9 – 12	350	13	280	5	71	2,6
САП-3	13 – 17	400	15	320	3	76	2,8
САП-4	18 – 22	450	17	370	1,5	80	2,9

Микросферостеклотекстолиты

- конструкционные материалы на различных связующих с температурой эксплуатации до 400°С, плотностью 0,6-0,9 г/см³ и высокими диэлектрическими характеристиками. Используются для изготовления слабонагруженных изделий конструкционного и радиотехнического назначения, а также в качестве негорючих отделочных материалов в авиастроении, судостроении и других областях техники.

МСТ-5 - для объектов с температурами эксплуатации до 350°С.

МСТ-6П - для носовых обтекателей больших размеров, панелей, перегородок и др., например, крупногабаритных радиопрозрачных конструкций самолетов наземного и морского базирования.

МСТ-10П - характеризуется низким тепловыделением и рекомендован для изготовления элементов интерьера пассажирских самолетов.

Свойства микросферостеклотекстолитов:

- тип связующего - эпоксидное, фенольное;
- плотность - 0,43-0,9 г/см³;
- прочность при изгибе 110-260 МПа;
- диэлектрическая проницаемость - 2,21-2,44;
- тангенс угла диэлектрических потерь - 0,007-0,017;
- температура эксплуатации 80-300°С.

Волокнистые композиционные материалы

отличаются от обычных сплавов более высокими значениями σ_B и σ_{-1} (на 50...100 %), модуля упругости (E), коэффициента жесткости (E / ρ) и пониженной склонностью трещинообразованию, волокна в них практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение. Прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы.

Для упрочнения Al, Mg и их сплавов применяют борные и углеродные волокна, проволоку из высокопрочных сталей.

Для армирования Ti и его сплавов применяют молибденовую проволоку, волокна сапфира.

Перспективными упрочнителями для высокопрочных и волокнистых высокомодульных композитов являются нитевидные кристаллы из оксида и нитрида Al, карбида и нитрида Si, карбида бора и др.

СВОЙСТВА ВОЛОКОН

Материал волокна	Диаметр волокна, мкм	σ_B , ГПа	E, ГПа	ρ , г/см ³
Сталь	150	3,5	200	7,9
Стекло	10	4,0	85	2,5
Кевлар	15	4,5	150	1,4
Углерод:				
высокопрочный	7	5,5	300	1,8
высокомодульный	7	3,0	650	2,0
Карборунд	120	3,0	430	3,2
Бор	100	3,5	400	2,6
Нитевидные кристаллы:				
корунда	—	30	1000	3,8
карборунда	—	40	800	3,2

Физико-механические свойства КМ с металлической матрицей

Материал	Содержание волокна, %	Плотность, г/см ³	Предел прочности при растяжении, МПа при		Усталостная прочность на базе 10 ⁷ циклов, МПа	Длительная прочность, за 100 ч при 400 °С, МПа	Кэф. линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С
			При 20 °С	При 400 °С			
Алюминий – стальная проволока (КАС-1)	40	4,8	1600	800	350	450	11,8
Алюминий – борное волокно (ВКА-1)	50	2,65	1150	850	600	650	6,0
Магний – борное волокно (ВКМ-3)	45	2,2	1250	900	550	600	6,5
Никель – вольфрамовая проволока (ВКН-1)	50	–	700 при 1100 °С	530	–	150 при 1100 °С	–
Алюминий – угольное волокно (ВКУ-1)	30–40	2,3	700–800	600–700	–	–	–
Магний – угольное волокно	30–40	1,8	700–800	600–700	–	–	–

Препреги

Препреги — это материалы-полуфабрикаты.



Препреги — волокнистые материалы, заранее пропитанные точно определенным количеством равномерно распределенного связующего и переработанные таким образом, чтобы максимально реализовать физико-механические свойства армирующего материала и обеспечить воспроизводимость свойств отверженного композита.



ПРЕПРЕГ

**АРМИРУЮЩИЙ
МАТЕРИАЛ**

СВЯЗУЮЩЕЕ

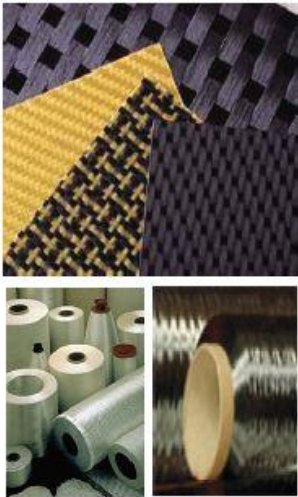
СТЕКЛОВОЛКНА
УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА
БОРНЫЕ ВОЛОКНА
АРАМИДНЫЕ ВОЛОКНА
БАЗАЛЬТОВЫЕ ВОЛОКНА
и ДР.

**ТЕРМОРЕАКТИВНЫЕ
СМОЛЫ**

ТЕРМОПЛАСТЫ

ЭПОКСИДНЫЕ
ПОЛИЭФИРНЫЕ
ФЕНОЛЬНЫЕ
ПОЛИИМИДНЫЕ и ДР.

ПОЛИКАРБОНАТ
ПОЛИАМИДЫ
ПОЛИСТИРОЛ и ДР.



Препреговая технология позволяет получить монолитные изделия сложной формы при минимальной инструментальной обработке.

Волокнистые КМ с неметаллической матрицей

Карбоволокониты (углепластики) - композиции, состоящие из полимерного связующего и упрочнителей в виде углеродных волокон.

Конструкционные углепластики обеспечивают:

- высокие упруго-прочностные характеристики при низкой плотности (1,55-1,58 г/см³);
- регулируемую степень анизотропии и упруго-прочностных характеристик;
- высокую стойкость к усталостным и динамическим нагрузкам;
- стойкость к агрессивным средам;
- малые значения ТКЛР вдоль волокон.



Углепластики **КМУ-4э/0,1-2м, КМУ-4Т- 2м, КМУ-7Т, КМУ-4-2М-3673, КМУ-4-2М-3606, КМУ-7-3606, КМУ-11-М-3606** на основе эпоксидных связующих ЭНФБ-2М, ВС-2526К, ЭДТ-69(Н)М и однонаправленных и условно однонаправленных углеродных наполнителей Элур-П, УОЛ-300 (российские) и ткани фирмы «Porher Ind.» (импортные):

- прочность при растяжении от 900 до 1800 МПа,
- прочность при сжатии от 900 до 1100 МПа;
- модуль упругости при растяжении 110-140 ГПа;
- толщина монослоя 0,11-0,22 мм



Волокнистые КМ с неметаллической матрицей

Бороволокниты - композиции полимерного связующего и упрочнителя - борных волокон. Отличаются высокой прочностью при сжатии, сдвиге и срезе, низкой ползучестью, теплопроводностью и электропроводимостью. **КМБ-1к** и **КМБ-2к** предназначены для длительной работы при температуре 200°С.. Изделия из бороволокнита применяют в авиационной технике.



Волокнистые КМ с неметаллической матрицей

Стекловолокниты (стеклопластики) конструкционного и радиотехнического назначения обеспечивают:

- высокие радиотехнические характеристики за счет снижения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь и их стабильности при длительном воздействии повышенных температур и влажности, работоспособность изделий в широкой полосе радиочастот;
- снижение массы конструкции и трудоемкости изготовления в 1,5—2 раза по сравнению с металлическими;
- кратковременную эксплуатацию до рабочих температур +1200°С;
- высокую пожаробезопасность конструкций;
- плотность 1,5-2 г/см³.

Высокопрочные стеклопластики **ВПС-30, ВПС-33, ВПС-34** - стеклопластики на основе эпоксидных связующих и высокопрочных стеклотканей Т-10-14(80), Т-10(ВМП)-14::

- прочность при растяжении 220- 2000 МПа и прочность при сжатии 340-1000 МПа зависят от типа применяемого стекловолокнистого армирующего наполнителя;
- прочность при изгибе 335-1000 МПа.

Рекомендуется для изготовления самолетных, вертолетных деталей конструкционного радиотехнического назначения - крыло, обшивки, панели и силовые элементы фюзеляжа, створки, люки и др.), обеспечивает высокие значения межслоевой прочности при изгибе и трансверсальном отрыве.

Волокнистые КМ с неметаллической матрицей

Органоволокниты (органопластики) - КМ, состоящие из полимерного связующего и упрочнителей в виде синтетических волокон. Конструкционные и функциональные органопластики обеспечивают:

- стойкость к динамическим и виброакустическим нагрузкам, эрозионным повреждениям, агрессивным средам;
- стойкость к низко- и высокоскоростному ударному воздействию;
- плотность 1,32-1,35 г/см³.

Высокопрочные органопластики **Органит 12Т(М)-Рус, Органит 16Т-Рус, Органит18Т-Рус, ВКО-19** - органопластики на основе ткани (равнопрочной по основе и утку) из нитей Русар и эпоксидных связующих различных марок.

Температура эксплуатации для органопластиков от -60 до +80°С.

Изготавливают слабо- и средненагруженные конструкции: форкиль, обшивки зализа и носков крыла самолетов, обшивки планера и хвостовых отсеков несущих винтов вертолетов и другие детали авиационной техники.

Свойства высокопрочных органопластиков:

- прочность при растяжении - 670-880 МПа;
- модуль упругости при растяжении - 31-40 ГПа;
- относительное удлинение при растяжении - 2,2-2,5 %;
- прочность при сжатии 175-210 МПа.

Свойства ВКМ на неметаллической матрице

КМ	γ , т/м ³	σ_b , МПа	$\sigma_b/(\gamma g)$, кМ	δ , %	E , ГПа	$E/(\gamma g) \cdot 10^{-3}$, кМ	σ_{-1} , МПа (на базе 10^7 циклов)
Углеволок-:							
ниты:							
КМУ-1л	1,4	650	46	0,5	120	8,6	300
КМУ-1у	1,47	1020	70	0,6	180	12,2	500
КМУ-1в	1,55	1000	65	0,6	180	11,5	350
КМУ-2в	1,3	380	30	0,4	81	6,2	135
Бороволок-:							
ниты:							
КМБ-1к	2	900	43	0,4	214	10,7	350
КМБ-2к	2	1000	50	0,3	260	13	400
КМБ-3к	2	1300	65	0,3	260	12,5	420
Органоволок-							
ниты с упроч-							
нителем:							
эластичным	1,15 – 1,3	100 – 190	8 – 15	10 – 20	2,5 – 8,0	0,22 – 0,6	100
жестким	1,2 – 1,4	650 – 700	50	2 – 5	35	2,7	–
Стекловоло-	2,2	2100	96	–	70	3,2	–
ниты							

Интеллектуальные КМ

Интеллектуальные («умные») материалы способны контролировать напряженно-деформированное состояние в условиях воздействия внешней среды (нагрузок, температур) и адаптироваться (приспосабливаться) к этим воздействиям, например, путем изменения формы для снижения возникающих в нем напряжений. Такие материалы могут применяться и устанавливаться в наиболее ответственных конструкциях или в труднодоступных для контроля участках. Для осуществления этих функций в структуру материала встраиваются сенсоры - тензорезисторные, оптоволоконные, пьезоэлектрические элементы, которыми могут служить армирующие элементы, входящие в состав композиционного материала.

Интеллектуальные КМ первого поколения **АКМ-1, АКМ-2** - углепластики для самоадаптирующихся конструкций, в которых используется эффект возникновения крутящих напряжений при изгибающей нагрузке, возникающей в аэродинамическом потоке и приводящих к изменению формы поверхности, подъемной силы на крыло и снижению напряженности конструкции из-за неравновесной структуры композиционного материала. Материал АКМ-1 применен в конструкции панелей крыла самолета с обратной стреловидностью «Беркут», обеспечив стабилизацию углов атаки и повышение его маневренности.

Слоистые металлополимерные КМ

Металлопластики состоят из чередующихся тонких листов металлических сплавов (Al или Ti) и слоев полимерных композитов (органо-, угле- или стеклопластиков). Высокие характеристики прочности и вязкости разрушения достигаются благодаря армированию высокопрочными волокнами и использованию компонентов с взаимодополняющими свойствами (металла и полимерного композита).

Применение: элементы конструкций, работающие в условиях усталостного нагружения с повышенными требованиями к надежности и живучести (силовые обшивки планера самолетов, зоны соединения разнородных материалов). Для конструкций из металлопластиков характерны повышенные демпфирующие, звуко- и теплоизоляционные характеристики, ударостойкость, огнестойкость, стойкость к воздействию молнии.

Металлополимерные композиты обеспечивают:

- снижение скорости роста усталостной трещины - в 5-100 раз;
- повышение виброакустической выносливости - в 10 раз;
- снижение массы деталей - на 10-15%.

ВИАМ производит **алюмопластик (СИАЛ), алюмоорганопластик (АЛОР), титаноорганопластик (ТИОР), алюмоуглепластик (АЛКАР),**

Материалы, используемые при изготовлении самолёта СУ-25

Материалы	Процент от массы самолёта
алюминиевые сплавы Д-16, В-95, АК4-1, ВАЛ-10, АМr3 и АМr6	60
стали ВНС-2, 30ХГСА и 12Х18Н10Т	19
титановые сплавы ОТ4-1, ВТ20, ВТ5Л	13,5
магниевые сплавы МА8, МА14Т, МЛ54	2
КМ и другие материалы	5,5