

Электротехническое и конструкционное материаловедение

Лектор

Яковенко Светлана Равиловна

Кафедра Техники высоких напряжений

Ауд. Э - 312

Литература

- Колесов, С.Н. Материаловедение технология конструкционных материалов : Учеб. для вузов / С.Н. Колесов, И. С. Колесов. — М. : Высш. шк., 2004. — 519 с. : ил.
- Г.П. Фетисов и др. Материаловедение и технология металлов. – М. Высшая школа . 2001.
- Материаловедение. Учебник для вузов. под ред. Б.Н. Арзамасова – Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- Богородицкий, Н.П., Пасынков, В.В., Тареев, В.М.. Электротехнические материалы. Изд.7. Л. : Энергоатомиздат, 1985. — 352 с. : ил.
- Воинов, В.Н., Рудный, В.В. Руководство к лабораторным работам по курсу “Электротехнические материалы”. Екатеринбург, издание УПИ, . Часть 1, 32 с. : ил.; часть 2, 32 с. : ил.
- Штофа Ян Электротехнические материалы в вопросах и ответах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 255 с.с ил.4. Электротехнический справочник. / Под ред. Ю.В.Корицкого и др. М.: Энергоатомиздат.1986. 584 с.с ил.
- Техника высоких напряжений. / Под ред. Л.В. Разевига. М.: Госэнергоатом-издат.1976. 488 с.с ил.
- Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Учебник для вузов. / Под ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд.; переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат,1986. 368 с.с ил.
- Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. / Пер.с нем.М. Бейер, В. Бек, К. Меллер, В. Цаенгель; Под ред. В. П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.с ил.

Введение

Материалы, применяемые в электротехнике можно подразделить на две группы:

1. Конструкционные (КМ)

Конструкционные материалы – материалы, применяемые для несущих конструкций и вспомогательных узлов и деталей.

2. Электротехнические (ЭТМ)

ЭТМ – материалы для применения в технике с использованием их определенных свойств по отношению к электромагнитному полю

Классификация материалов

I. Конструкционные материалы

1. Металлы и их сплавы
 - 1) Технические металлы
 - a) Черные металлы: сталь и чугун (85%)
 - b) Цветные металлы: медь, алюминий, никель, свинец, цинк, олово и их сплавы (15%)
 - 2) Редкие металлы: ртуть, натрий, магний, серебро, золото, платина, кобальт, хром, молибден, тантал, вольфрам и др.
3. Композиционные материалы
4. Неметаллические соединения
 - 1) Полимеры
 - 2) Пластмассы

II. Электротехнические материалы

(по поведению в электрическом поле)

1. Диэлектрики – основное свойство диэлектриков – способность к поляризации. В диэлектриках возможно существование электростатических полей.
2. Полупроводники – отличительное свойство – сильная зависимость проводимости от концентрации и вида примесей, а также от внешних энергетических воздействий.
3. Проводники – основное электрическое свойство – сильно выраженная проводимость

Значение удельного сопротивления

Электротехнические материалы можно классифицировать по величине удельного сопротивления

	Ом.см	Ом.м	Примечания
Диэлектрики	$10^9 - 10^{20}$	$10^7 \div 10^{18}$	$\rho > 10^8 \text{ Ом.м.}$
Полупроводники	$10^{-3} - 10^8$	$10^{-5} \div 10^9$	
Проводники	$10^{-6} \div 10^{-4}$	$10^{-8} \div 10^{-5}$	$\rho < 10^{-5} \text{ Ом.м}$

Для классификации материалов и оценки их свойств используют группы показателей (или характеристик материалов).

Характеристики материалов зависят от множества факторов и могут меняться в процессе эксплуатации

Факторы, влияющие на свойства материалов

- Температура
- Давление
- Влажность
- Амплитуда и частота напряжения электрического поля
- Химические реагенты
- Различные виды излучений

ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

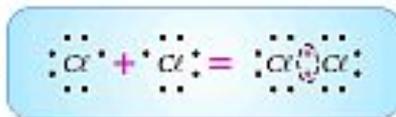
Основные свойства материалов

1. физические
 - магнитные
 - электрические
 - тепловые: теплопроводность- теплоёмкость, температура плавления, кипения
 - плотность и д. р.
2. химические
характеризует специфику межатомного воздействия материалов с другими материалами и окружающей средой (коррозия).
3. механические
 - прочность
 - твёрдость
 - пластичность
 - вязкость
4. технологические свойства
 - литейные свойства
 - ковкость
 - свариваемость
 - обрабатываемость
5. специальные
 - жаропрочность
 - жаростойкость
 - сопротивляемость коррозии
 - износостойкость

Физико-химические свойства

Строение внешних электронных оболочек атомов определяет виды связей в молекулах. Вид химической связи определяется степенью электроотрицательности элементов. Виды связей определяют физические и химические свойства вещества.

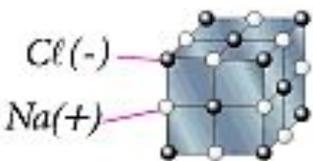
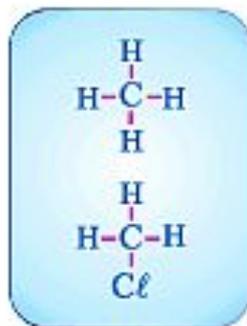
I Ковалентная (химическая связь). Молекулы образуются из атомов за счет объединения их внешних валентных электронов.



Молекулы могут быть:

1. Нейтральными
(O_2 , N_2 , Cl_2 , CH_4)

2. Полярными
(CH_3Cl)



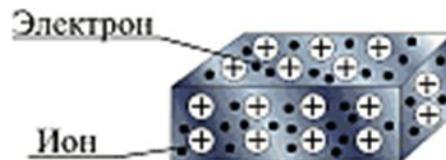
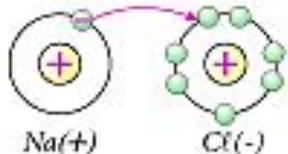
II Ионная связь

Вещества имеют кристаллическую решётку ($NaCl$)

Вещества с ионной связью бывают:

1) с плотной упаковкой ионов ($NaCl$)

2) с неплотной упаковкой ($CaCl$)



III Металлическая (химическая) связь. Между узлами с ионами находятся свободные (коллективизированные) электроны (это металлы и их сплавы).



IV Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса) Вещества состоят из отдельных молекул и связаны слабыми молекулярными силами.

(графит, парафин, мышьяк, фосфор, H_2 , N_2)



Электроотрицательность

- Энергия ионизации $W_{и}$ – количество энергии, которое нужно затратить, чтобы перевести нейтральный атом (молекулу) в положительно заряженный ион
- Энергия сродства $W_{ср}$ – количество энергии, которое выделяется при присоединении электрона к нейтральному атому, т.е энергия превращения нейтральной энергии в отрицательный ион

$$\text{ЭО} = W_{и} + W_{ср}$$

Электрoтрицательность

Период	Подгруппа																
	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa		IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIb	
1															H 2,2		
2	Li 1,0	Be 1,6											B 2,0	C 2,6	N 3,0	O 3,5	F 4,0
3	Na 0,9	Mg 1,2											Al 1,6	Si 1,9	P 2,2	S 2,6	Cl 3,1
4	K 0,8	Ca 1,0	Sc 1,3	Ti II 1,5 IV 1,6	V III 1,6 IV 1,7 V 1,9	Cr II 1,6 III 1,7 IV 1,9 VI 2,2	Mn II 1,6 III 1,7 IV 1,9 VII 2,3	Fe II 1,8 III 1,9	Co 1,9 2,0	Ni 1,9 2,0	Cu I 1,8 II 2,0	Zn 1,6	Ga 1,7	Ge 2,0	As 2,1	Se 2,5	Br 2,9
5	Rb 0,8	Sr 1,0	Y 1,2	Zr II 1,4 IV 1,5	Nb III 1,6 V 1,8	Mo IV 1,8 VI 2,1	Tc V 1,9 VII 2,2	Ru II 2,0 IV 2,1 VI 2,2	Rh 2,0 2,1 2,2	Pd 2,1 2,2 2,3	Ag 1,9	Cd 1,7	In 1,8	Sn II 1,8 IV 2,0	Sb III 1,9 V 2,2	Te 2,3	I 2,6
6	Cs 0,7	Ba 0,9	La 1,2	Hf II 1,3 IV 1,5	Ta III 1,5 V 1,7	W IV 1,8 VI 2,1	Re V 1,9 VII 2,2	Os II 2,0 IV 2,1 VI 2,3	Ir 2,1 2,2 2,3	Pt 2,1 2,2 2,3	Au I 2,0 III 2,3	Hg 1,8	Tl I 1,4 III 1,9	Pb II 1,9 IV 2,1	Bi III 2,0 V 2,2	Po 2,2	At 2,3
7	Fr 0,7	Ra 0,9	Ac 1,1	Актиноиды				Th IV 1,3	Pa IV 1,3 V 1,5	U IV 1,4 V 1,6 VI 1,8	Np IV 1,4 V 1,6 VI 1,8						

Строение и свойства материалов

Агрегатное состояние вещества зависит от соотношения энергии теплового хаотического движения и энергии взаимодействия молекул



стальной выключатель

I Газообразное

Воздух, азот, газы и т.д.

II Жидкое

Нефтяные масла, кремнийорганические жидкости и т.д.



маслонаполненный кабель

- I. Газообразное состояние $W_T \gg W_B$
- II. Жидкость - $W_T \approx W_B$
- III. Твердые - $W_T \ll W_B$
 - кристаллическое строение
 - аморфное строение
 - полимерные молекулы



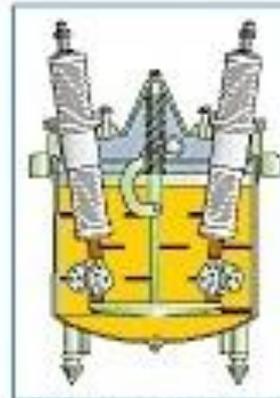
керамический изолятор

III Твёрдое

Проводники, органические диэлектрики и др.

IV Плазма

Равновесное состояние свободных электронов и ионов.



стальной выключатель

4 агрегатных состояния вещества

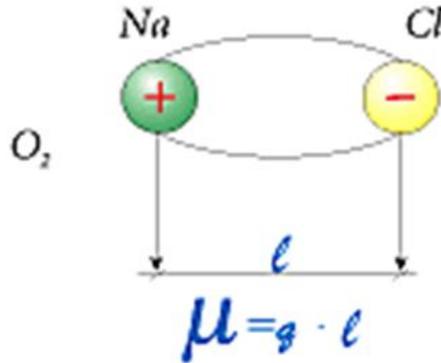
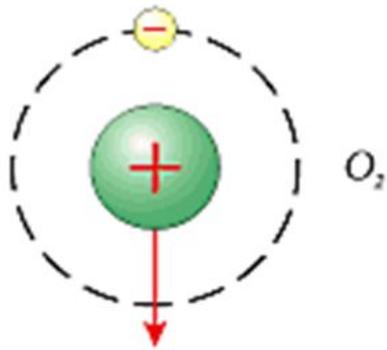
I Газы

Энергия связи меньше энергии теплового хаотического движения

Молекулы газа могут быть:

1) нейтральными

2) полярными или дипольными



II Жидкости



Энергия связи равна энергии теплового хаотического движения

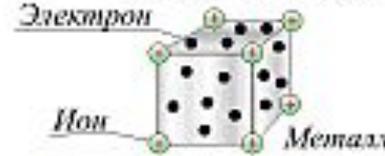
1. Диэлектрики состоят из нейтральных и слабополярных молекул.

2. Проводники состоят из растворов или расплавов ионных соединений.

III Твёрдое тело

Энергия связи больше энергии теплового хаотического движения

По структуре твёрдые тела бывают:



1. Кристаллические
Большинство твёрдых тел имеют кристаллическую решётку.



стекло

2. Аморфные
Эти тела изотропны.



фарфор

3. Смешанные
Они имеют две фазы:
а) стекловидную и
б) кристаллическую.

Твёрдые вещества имеют две структуры



1. Монокристаллическую -
единый целый кристалл ($NaCl$)



Микроструктура электрометаллической стали.

2. Полукристаллическую -
плотные группы мелких беспорядочно сросшихся кристаллов (металлы и их сплавы).

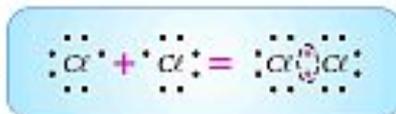
IV. Плазма - полностью ионизированный газ

Физико-химические свойства

Определяются в том числе видами химических связей в веществе

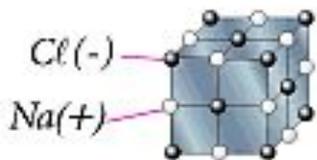
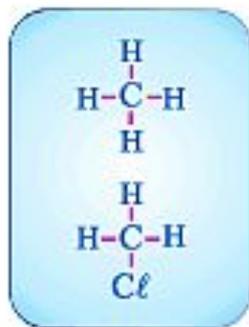
Строение внешних электронных оболочек атомов определяет виды связей в молекулах

I Ковалентная (химическая связь). Молекулы образуются из атомов за счет объединения их внешних валентных электронов.



Молекулы могут быть:
1. Нейтральными ($\text{O}_2, \text{N}_2, \text{Cl}_2, \text{CH}_4$)

2. Полярными (CH_3Cl)



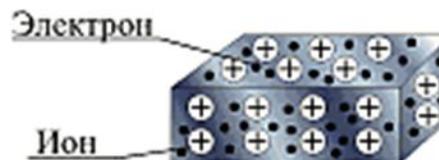
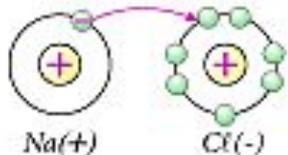
II Ионная связь

Вещества имеют кристаллическую решётку (NaCl)

Вещества с ионной связью бывают:

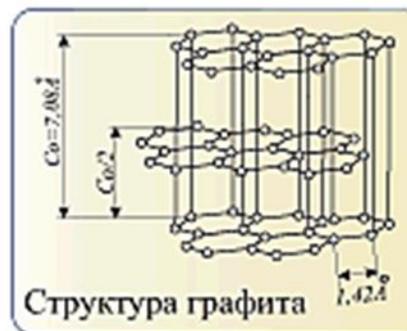
1) с плотной упаковкой ионов (NaCl)

2) с неплотной упаковкой (CaF_2)



III Металлическая (химическая) связь.

Между узлами с ионами находятся свободные (коллективизированные) электроны (это металлы и их сплавы).



IV Молекулярная связь

(связь Ван-дер-Ваальса) Вещества состоят из отдельных молекул и связаны слабыми молекулярными силами.

(графит, парафин, мышьяк, фосфор, H_2, N_2)



Электролизатор И-1066В



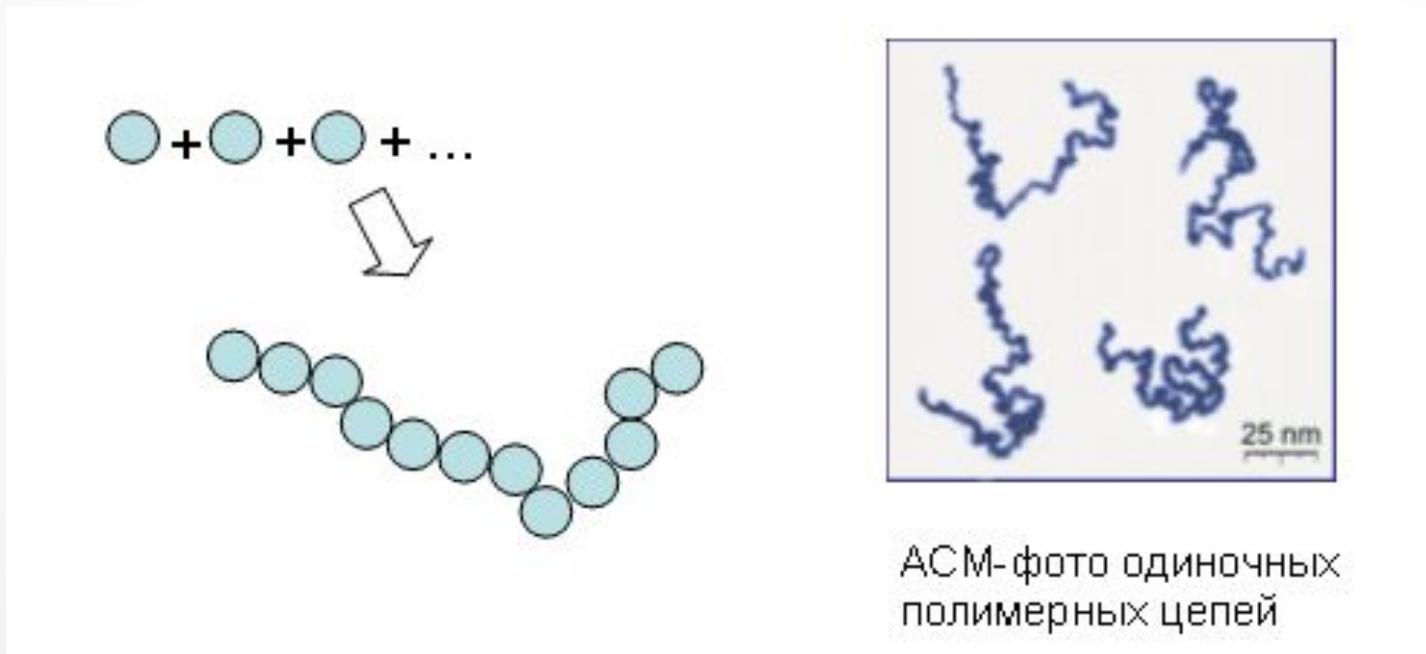
Щелочная графитовая

Твердое состояние

- **Кристаллическое тело** – наблюдается ближний и дальний порядок расположения частиц
- **Аморфное тело** – только ближний порядок
- **Полимеры** – особая структура с большой протяженностью молекул, асимметричностью, цепным строением и гибкостью

Полимеры

- Полимеры – это соединения, получаемые путем многократного повторения различных групп атомов, называемых «мономерами», соединенных в длинные макромолекулы химическими или координационными связями



АСМ-фото одиночных полимерных цепей

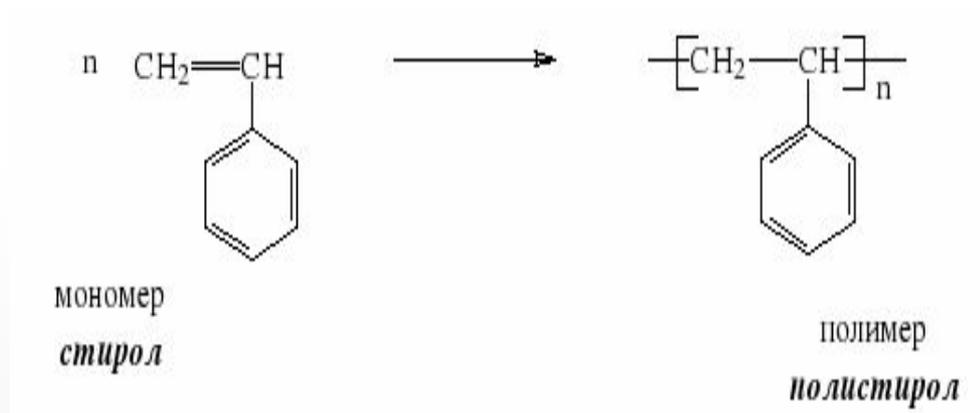
Молекулы полимеров состоят из звеньев с количеством повторов n , который называется степенью полимеризации. Различают:

- **мономер** – исходный продукт, звено (группа атомов), из которого состоит полимер, степень полимеризации **$n=1$**
- **олигомер** – низкомолекулярный продукт, группа атомов, состоящая из звеньев с низкой степенью полимеризации **$n=10$**
- **полимер** – высокомолекулярный продукт, многократно повторенный мономер, степень полимеризации **$n=100$ и больше**

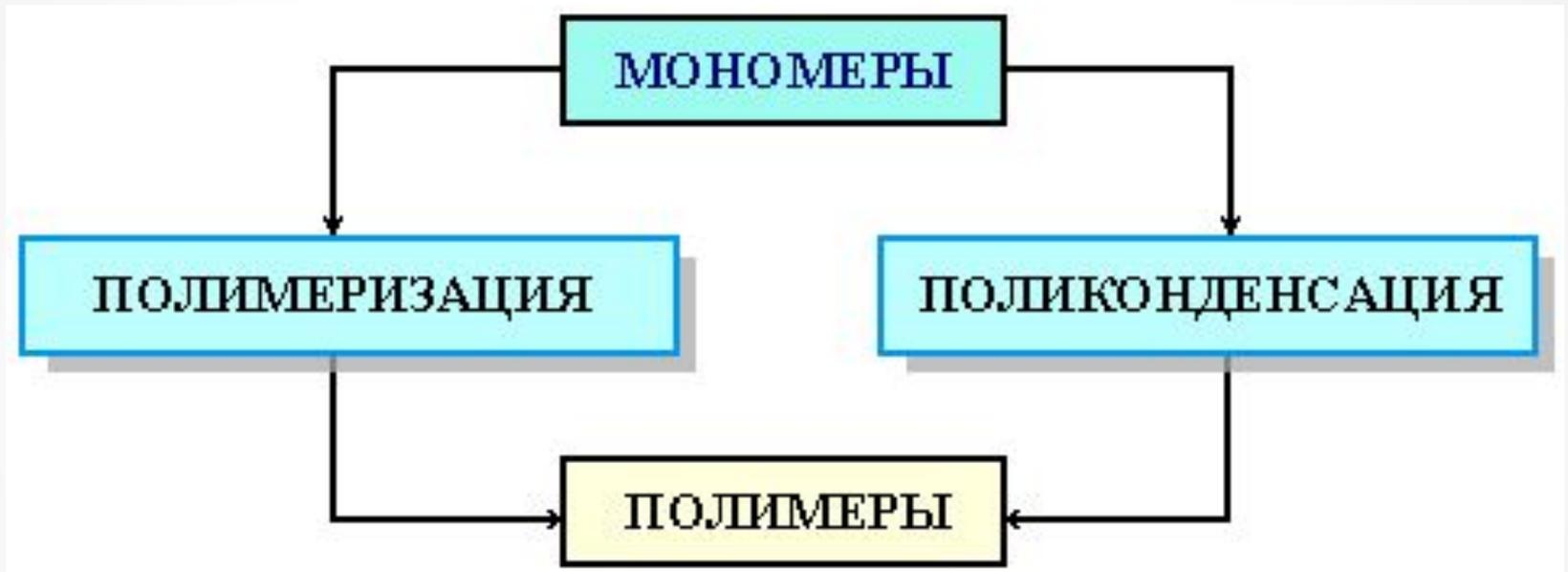
(В переводе с греческого поли – много; олигос – мало, немного, несколько; моно – один).



- Процесс превращения мономеров в полимер называется полимеризацией, а в олигомер соответственно – олигомеризацией.
- Процесс превращения смеси двух или более видов мономеров в полимер, называется сополимеризацией.



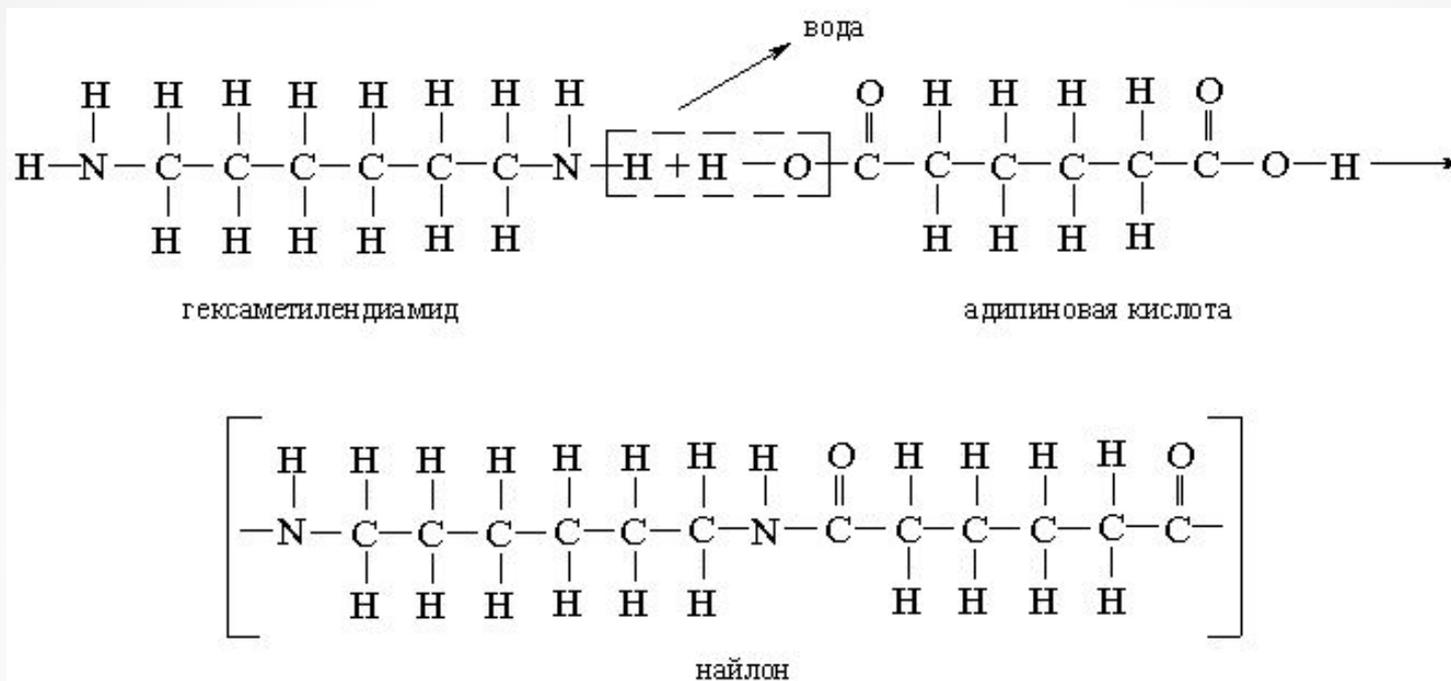
Получение полимеров



Получение полимеров: полимеризация и поликонденсация

- Многократное присоединение молекул мономеров или **полимеризация** происходит **без выделения побочных низкомолекулярных продуктов**
- Полимеризация, в ходе которой многократно повторяется процесс конденсации (взаимодействия) друг с другом функциональных групп мономеров, называется **поликонденсацией**.
- При поликонденсации **выделяются побочные низкомолекулярные соединения**, такие как вода H_2O , хлористый водород HCl , формальдегид CH_2O , аммиак NH_3 и другие.

Пример реакции поликонденсации



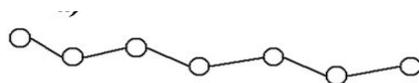
В реакции конденсации водородный атом одного мономера и OH-группа другого отщепляются с образованием молекулы воды.

Выделение побочных продуктов в случае изготовления электротехнических материалов обычно нежелательно, так это может ухудшать электротехнические свойства материалов

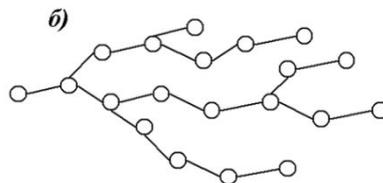
Строение молекул полимеров

В зависимости от форм, получающихся при реакции создания полимеров различают следующие структуры:

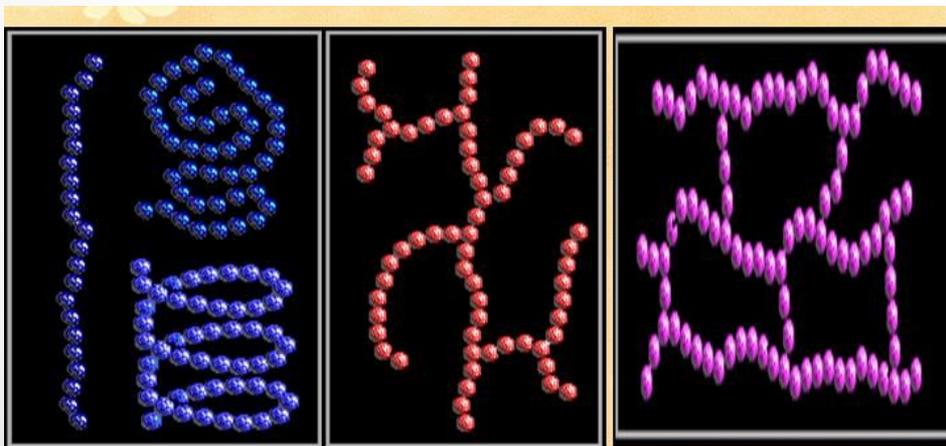
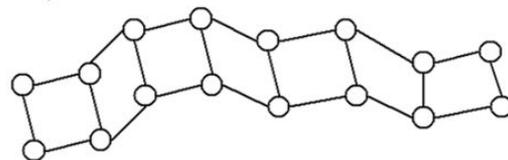
- линейная



- разветвленная



- пространственная



линейная

разветвленная

пространственная

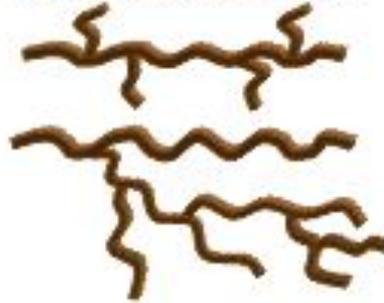


Различные типы макромолекул

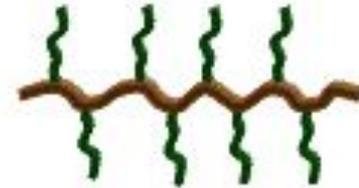
Линейные



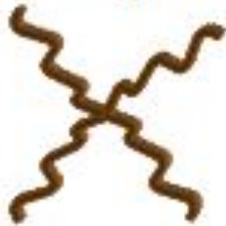
Разветвленные



Гребнеобразные



Звездообразные



Поликатенановые



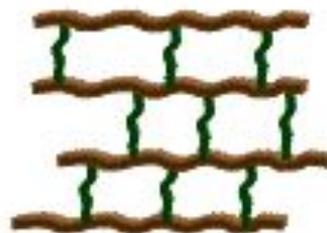
Полиротаксаны



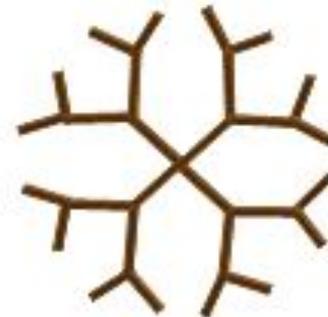
Лестничные



Полимерные сетки



Дендритные



Термопластичность и терморреактивность

- **Термопласты.** Линейные или слегка разветвленные полимеры. Они могут многократно размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении. При этом химических изменений не происходит.
- **Реактопласты** (терморреактивные, или термоотверждающиеся, пластмассы). Имеют молекулы, образующие трехмерную сетку.

При охлаждении они превращаются в твердые неплавящиеся тела, которые невозможно снова размягчить без химического разложения. Необратимое затвердевание вызывается химической реакцией сшивки цепей.

- Все линейные полимеры термопластичны, а все сшитые сетчатые полимеры реактопластичны (терморреактивны).
- Структура мономерных единиц и их функциональных групп позволяют предсказать тип пластмассы, получаемой при полимеризации.

Свойства пластмасс сильно зависят от их структуры: термопласты менее твердые, но проще в переработке;

реактопласты тверже, но при превышении температуры выше критической

- необратимо разрушаются

Особенности физического состояния полимеров

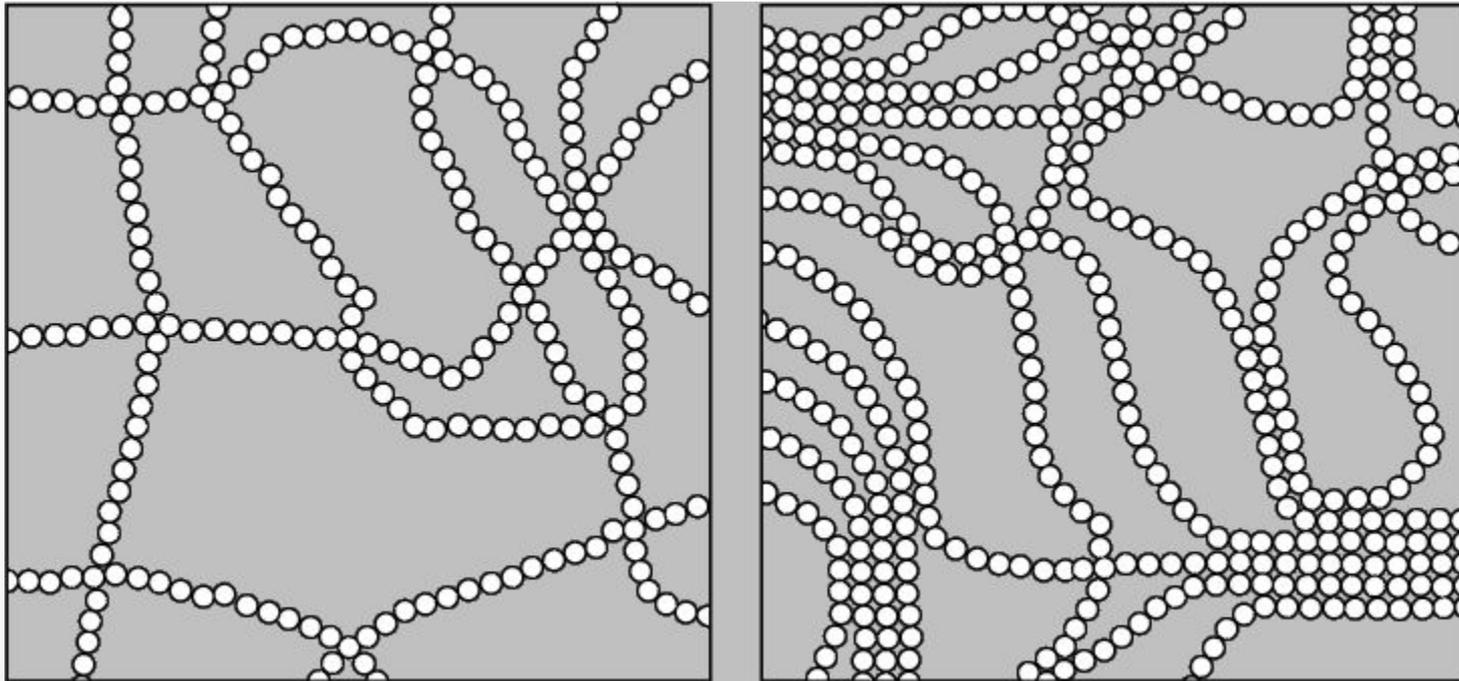
Кристаллизующиеся полимеры можно перевести в твердое аморфное состояние. В этом случае следует различать три физических (не фазовых) состояния полимерного вещества: **стеклообразное, высокоэластичное и вязкотекучее.**

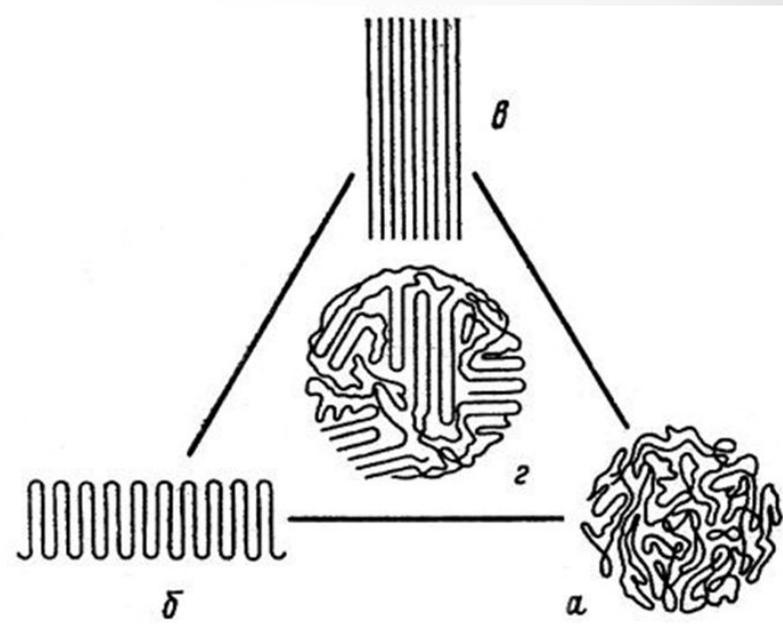
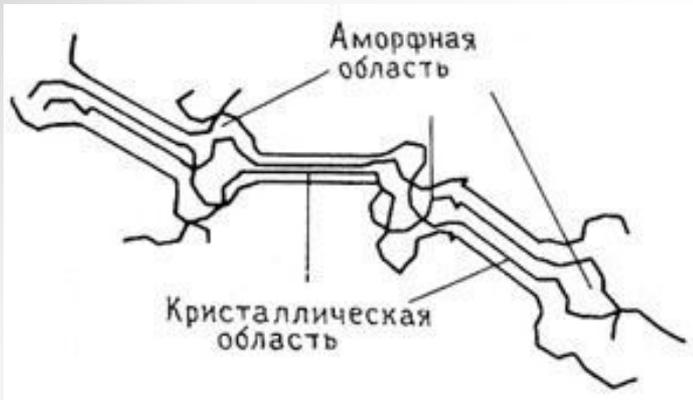
- В **стеклообразном** состоянии происходит колебательное движение атомов, входящих в состав цепи, но отсутствует перемещение звеньев и цепи, как единого целого (конструкционный материал, для изоляции)
- В **высокоэластичном** состоянии происходит колебательное движение звеньев (крутильные колебания), в результате цепи полимера приобретают способность изгибаться (в этом состоянии находятся оплетки кабелей)
- В **вязкотекучем** состоянии подвижностью обладает вся макромолекула как единое целое (состояние переработки)
- Температура перехода из стеклообразного в высокоэластичное состояние называется **температурой стеклования T_c**
- Температура перехода из высокоэластичного в вязкотекучее состояние, называется **температурой текучести T_T** .
- **Температура хрупкости** – температура, при которой ухудшаются механические свойства и наступает хрупкое разрушение образца. (Температура хрупкости всегда ниже температуры стеклования)
- Температуры **плавления, стеклования, текучести, хрупкости** определяют температурные режимы эксплуатации и переработки полимеров.
- Регулирование температуры перехода полимера из одного физического состояния в другое возможно введением **пластификаторов**

Надмолекулярная структура полимеров

- Аморфный полимер

Кристаллический полимер





Отдельные кристаллиты — это жесткие структуры. Возможны три предельные формы: статистический клубок (а), складчатая цепь (б) и выпрямленная цепь (в)

- Структура полимера может меняться за счет термической обработки и введения искусственных зародышей кристаллизации

Схема кристаллической решетки

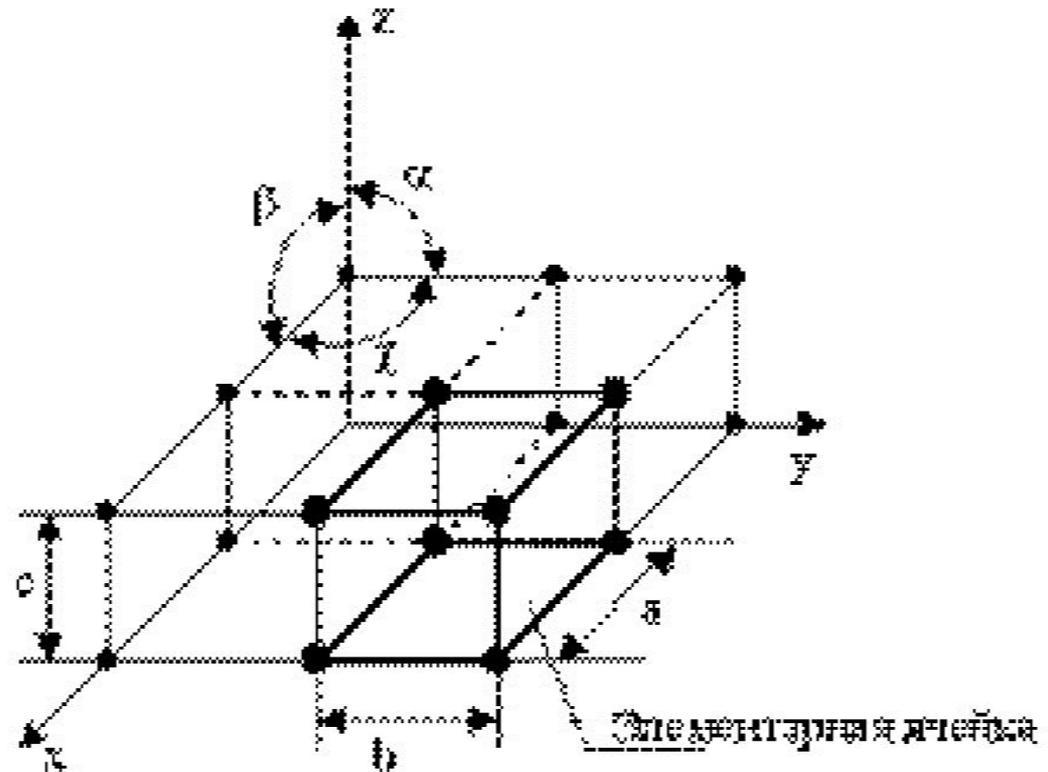
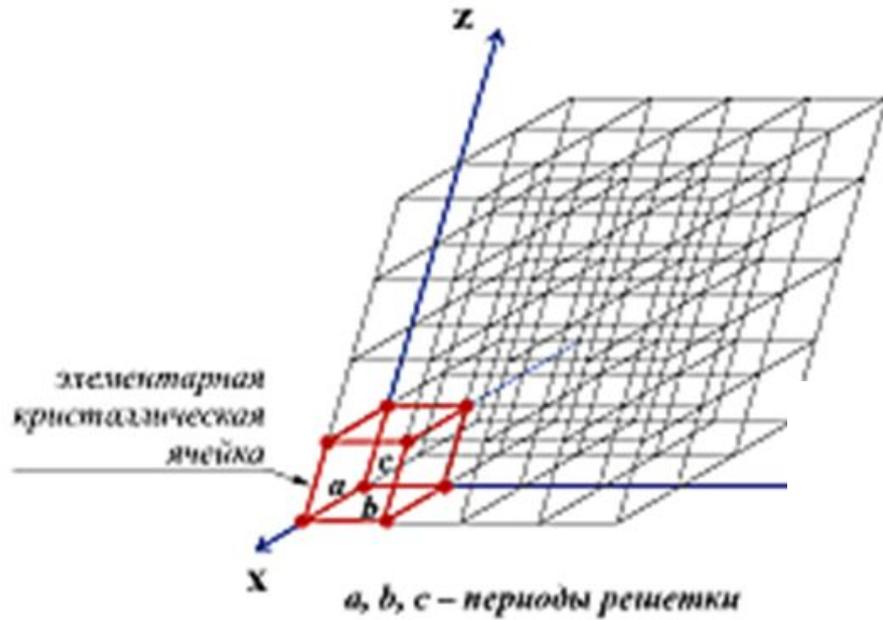


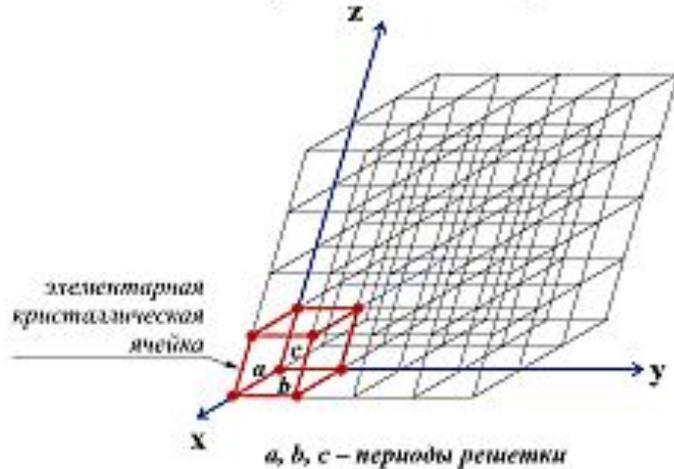
Схема кристаллической решетки

- *Элементарная ячейка* – элемент объема из минимального числа атомов, многократным повтором которого можно построить весь кристалл.
- Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла. Основными параметрами кристалла являются:
 - **размеры ребер элементарной ячейки:** a , b , c – периоды решетки – расстояния между центрами ближайших атомов. В одном направлении выдерживаются строго определенными.
 - **координационное число (K)** указывает на число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома в решетке.
 - **базис решетки** количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.
 - **плотность упаковки атомов в кристаллической решетке** – объем, занятый атомами, которые условно рассматриваются как жесткие шары. Ее определяют как отношение объема, занятого атомами к объему ячейки (для простой кубической решетки – 0,52, объемно-центрированной кубической решетки – 0,68, для гранецентрированной кубической решетки – 0,74) или число атомов, приходящееся на одну ячейку решетки.

Кристаллическое строение и свойства металлов

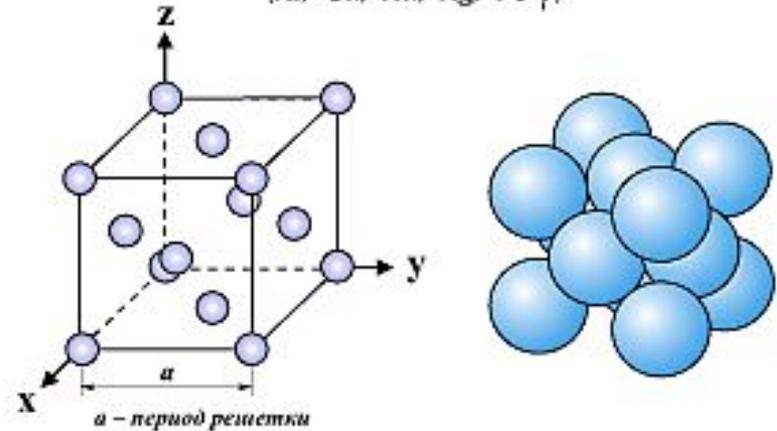
Кристаллические решетки металлов

Схема кристаллической решетки

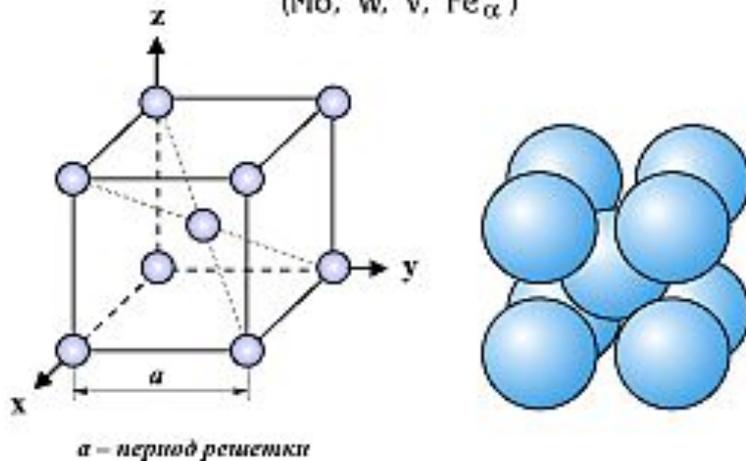


Кристаллические решетки металлов

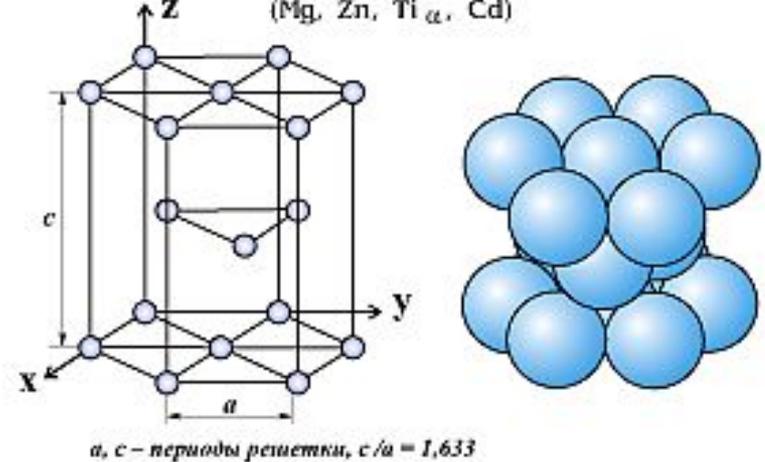
Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК)
(Al, Cu, Au, Ag, Fe γ)



Решетка объемноцентрированная кубическая (ОЦК)
(Mo, W, V, Fe α)



Решетка гексагональная плотноупакованная (ГП)
(Mg, Zn, Ti α , Cd)

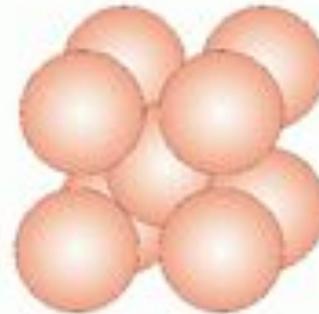
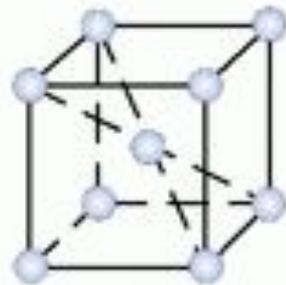


Анизотропия

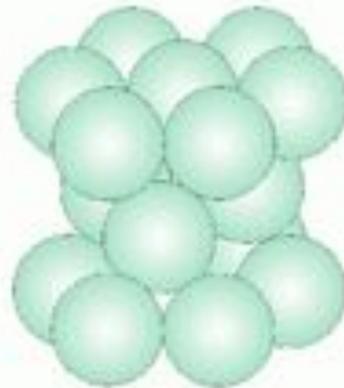
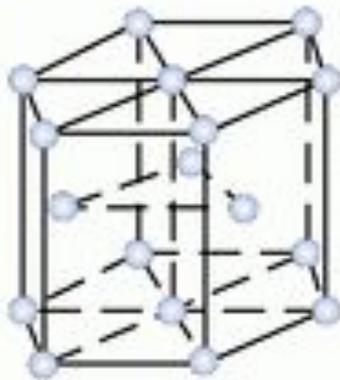
- **Анизотропия** - различность свойств по различным направлениям в кристалле

Аллотропия

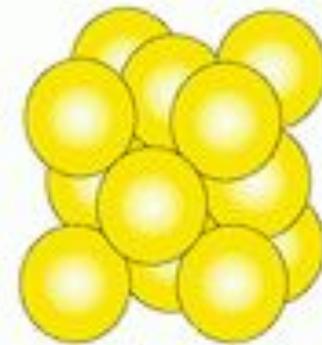
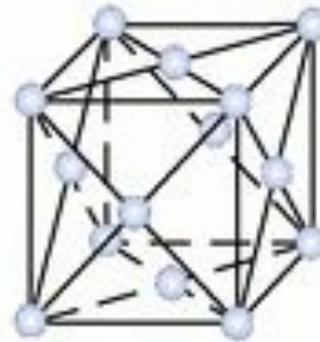
- **Аллотропия** - способность изменять кристаллическое строение при определённой температуре, перестраивая тип элементарной ячейки.
- Другое название-полиморфизм
- Fe $t_1=911^\circ\text{C}$ – ОЦК \rightarrow ГЦК $t_2=1392^\circ\text{C}$ \rightarrow
- ОЦК до $t_3=1539^\circ\text{C}$ - (t плавления)



Объемно-центрированного куба (ОЦБ)



Гексагональная плотноупакованная (ГПУ)



Гранецентрированного куба (ГЦК)

Дислокационная структура и прочность металлов

Понятие о дефектах кристаллической решетки

1. Точечные дефекты

- Вакансии
- Внедрение
- Примесное внедрение

2. Линейные дефекты

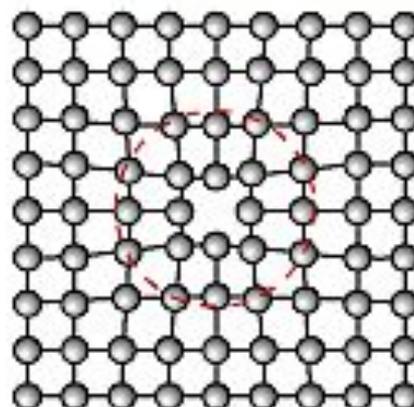
- Краевые
- винтовые

3. Поверхностные дефекты

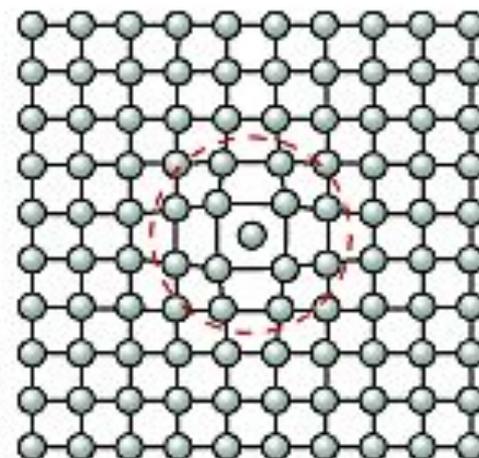
- Дислокация – поверхностный дефект кристалла
- (т.е дислоцированный по границе зерна)

- Основное свойство – легкая подвижность и активное взаимодействие между собой и с любыми дефектами решетки

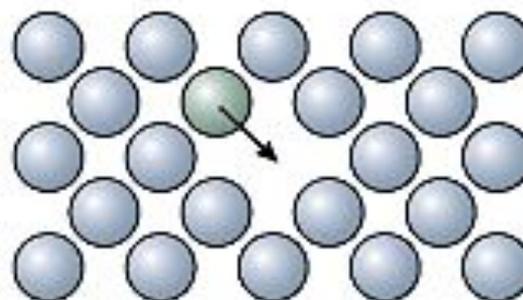
Точечные дефекты кристаллической решетки



Вакансия - это угол кристаллической решетки, не занятый атомом.

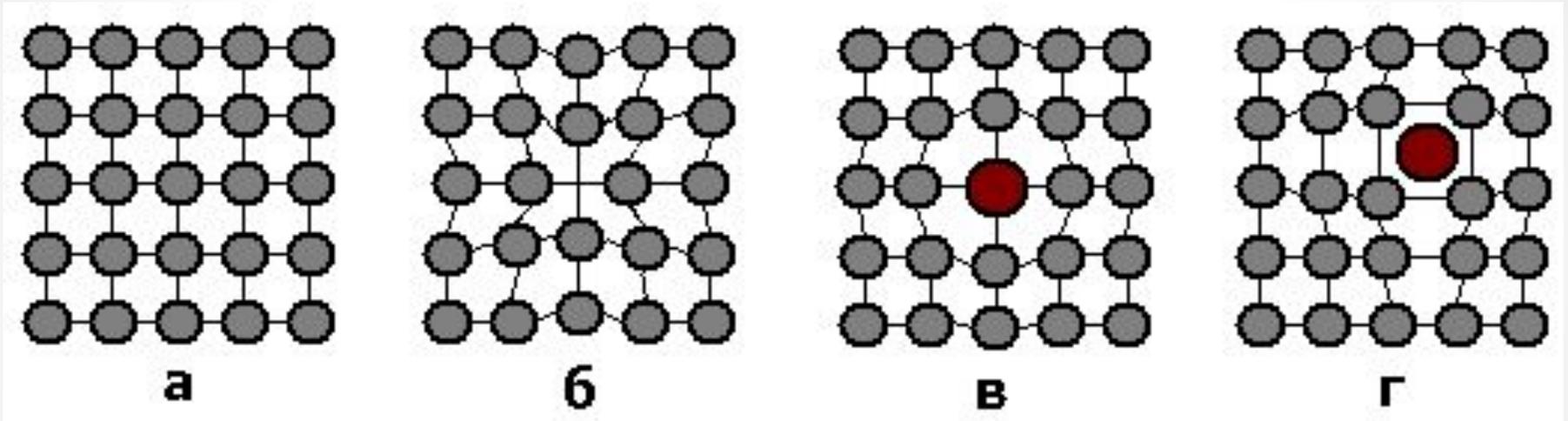


Межузельный атом - это атом, расположенный в межузельном пространстве кристаллической решетки.



В металлах диффузия преимущественно осуществляется вакансионным механизмом, при котором перемещающийся атом в своем движении меняет местами с вакансией

Точечный дефект



- б. вывих
- в. Примесное замещение
- Г. примесное внедрение

Линейный дефект

Краевая
дислокация

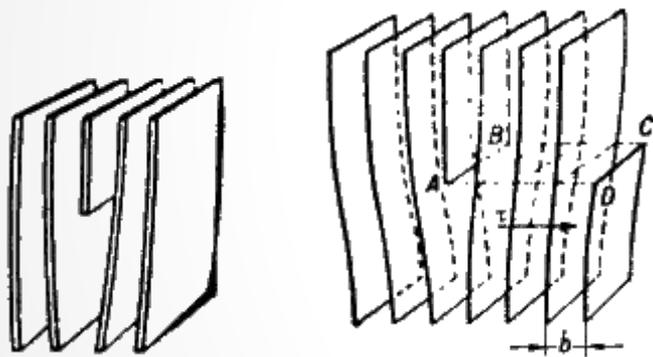
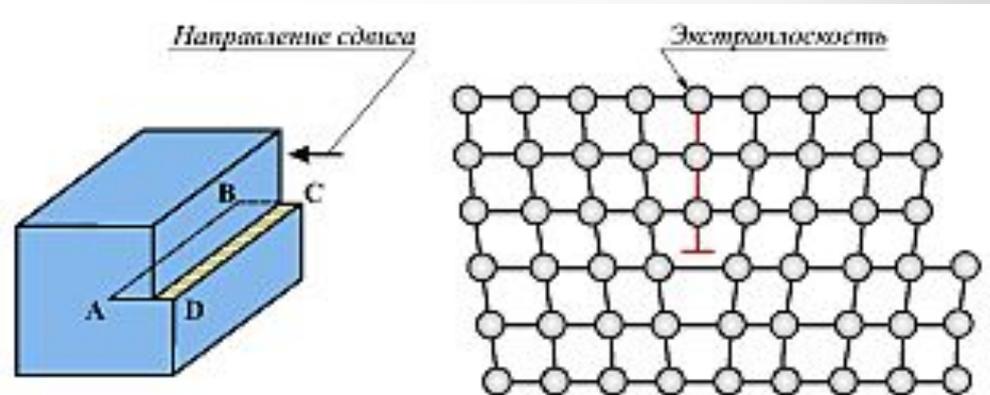
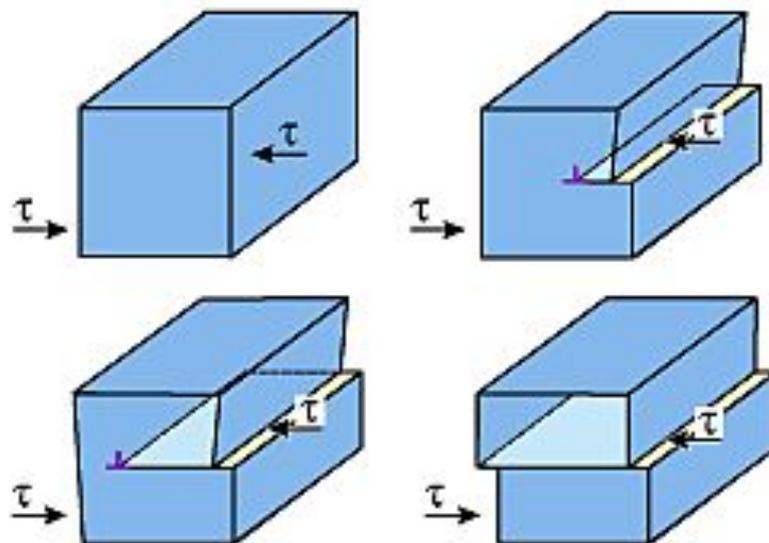
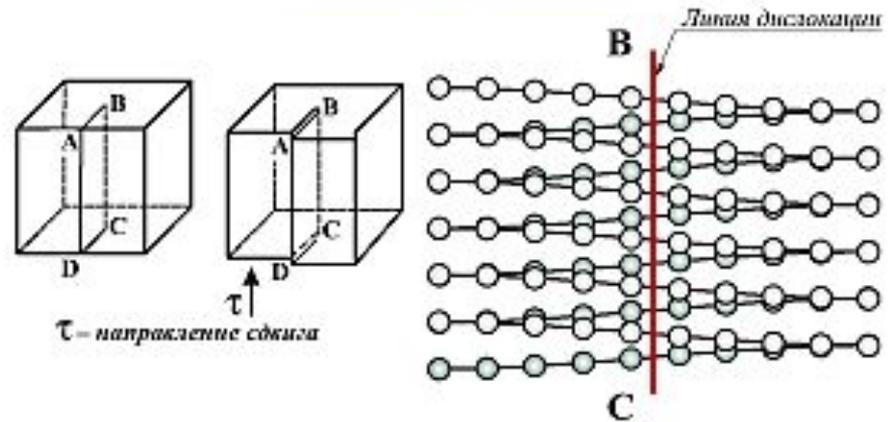


Схема движения краевой дислокации

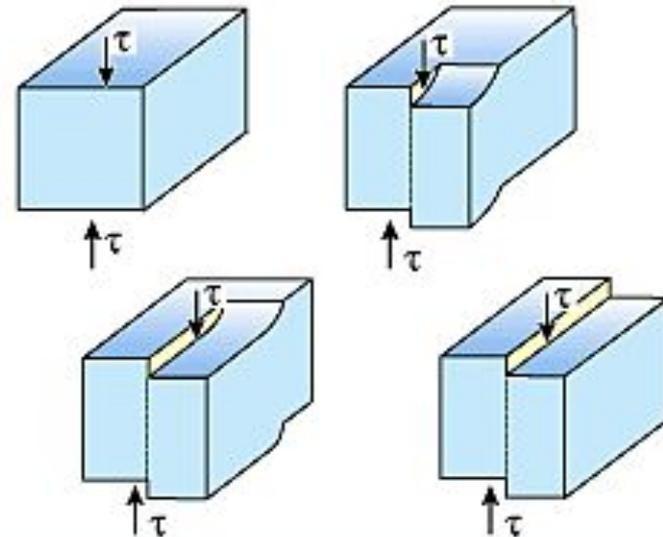


Линейный дефект

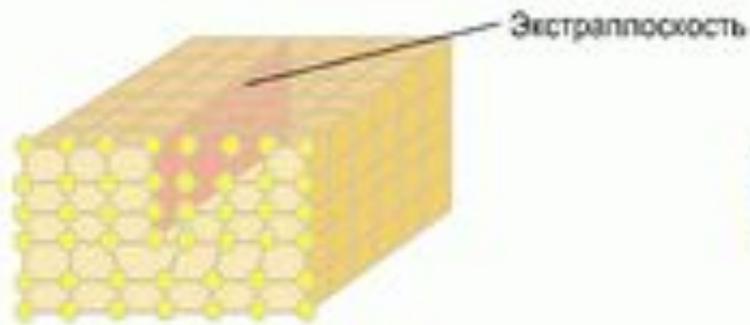


Винтовая дислокация

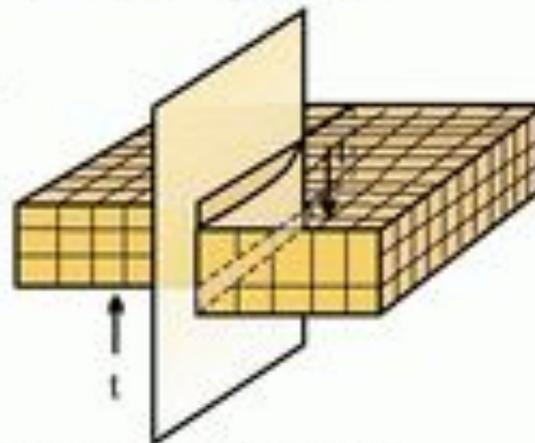
Схема движения винтовой дислокации



Линейные дефекты кристаллического строения

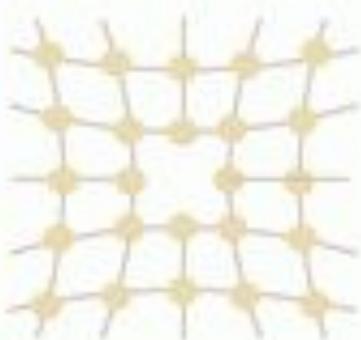


Краевая дислокация



Винтовая дислокация

Точечные дефекты кристаллического строения



Вакансия



Дислоцированный атом



Примесные атомы



Поверхностные дефекты

Границы зерен
Схема поликристаллического
тела

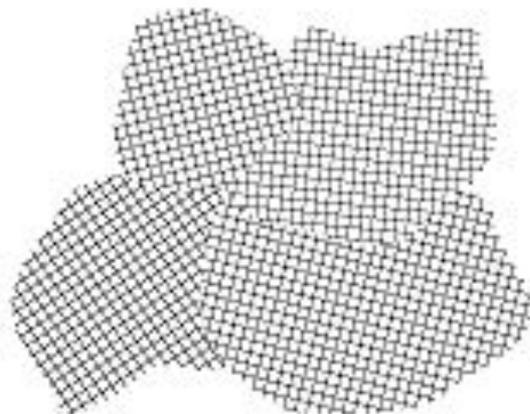
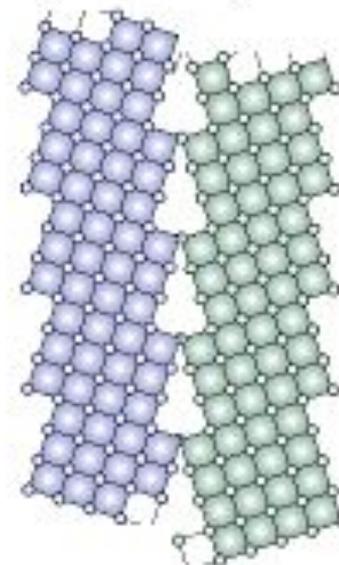


Схема строения
границы зерна



Микроструктура железа

Зерно



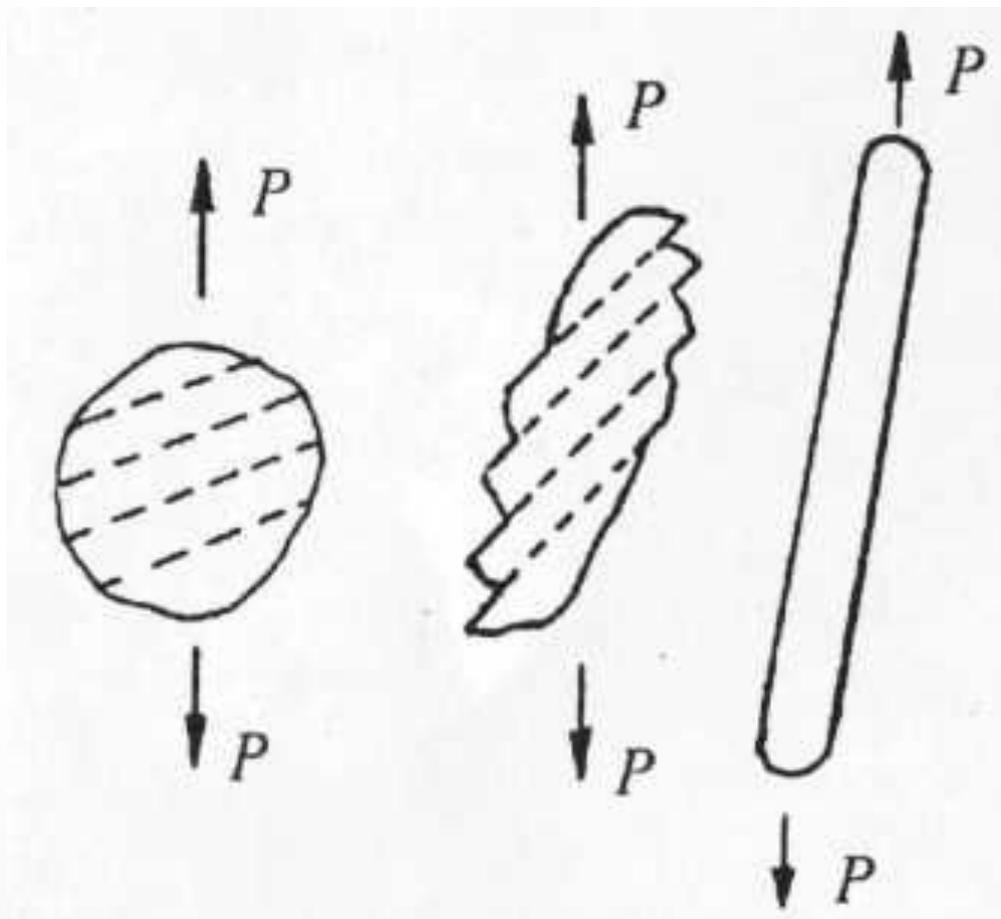
x 150

Дислокации внутри зерна



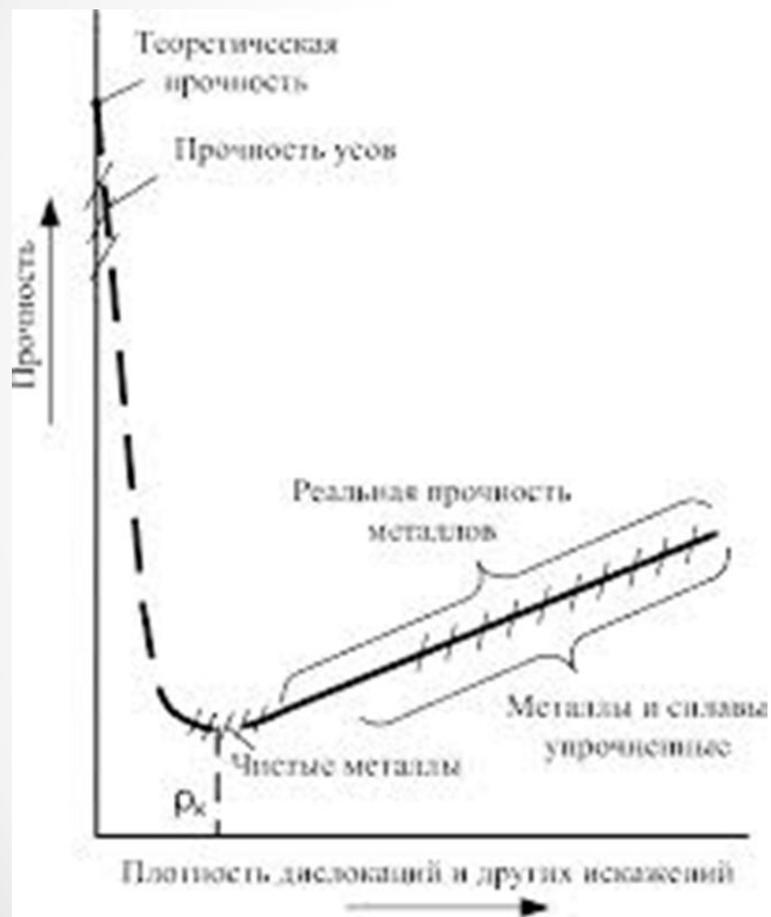
x 15000

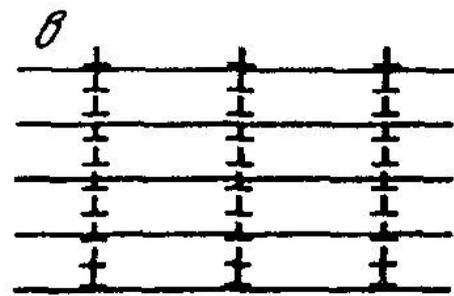
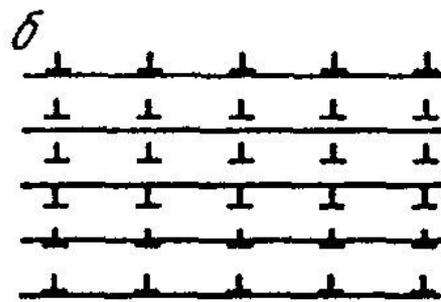
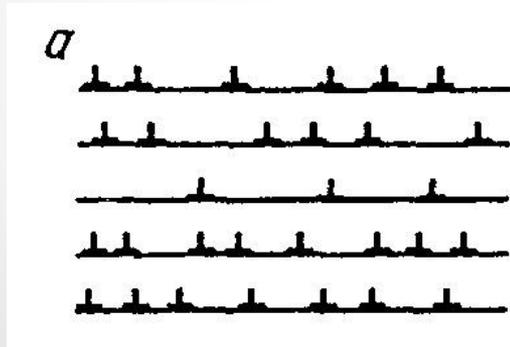
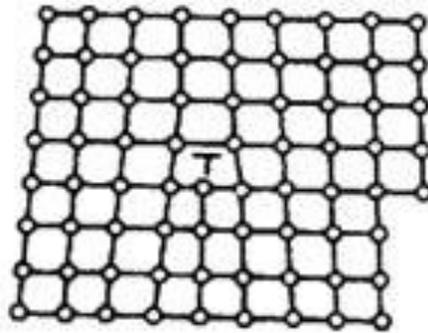
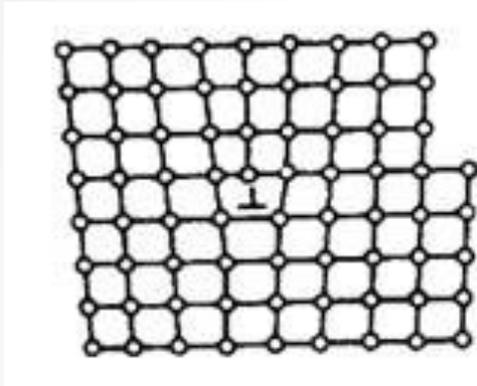
Дислокационные механизмы упругоэластической деформации



СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

1. Регулирование плотности дислокаций
2. Регулирование взаимного положения дислокаций
3. Взаимодействие между атомами внедрения и дислокациями (сталь – С и N)
4. Создание дефектов упаковки кристаллической решетки.
5. Включение стопоров





Технологические операции для упрочнения металлов

- Чтобы увеличить прочность металла, необходимо либо уменьшить число дефектов за счет получения монокристалла, либо увеличить число дефектов, ограничивая их подвижность.
- Известны следующие способы решения этих задач:
 - **Легирование** – введение специальных примесей, которые будут взаимодействовать с дислокациями и затруднят их продвижение.
 - **Закалка**, то есть нагрев выше температуры фазового превращения, выдержка и контролируемое быстрое охлаждение, которое приводит к росту дефектов, уменьшению размеров зерен, и, следовательно, к росту границ зерен, которые непроходимы для дислокаций.
 - **Наклеп**.