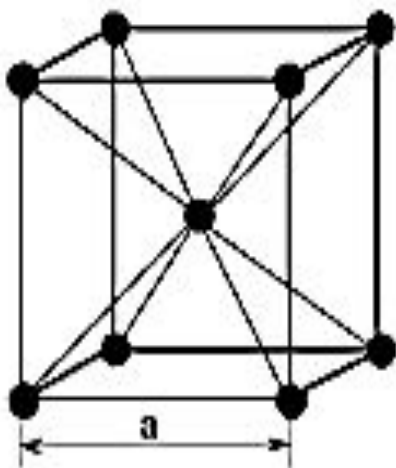


# Лекция № 1

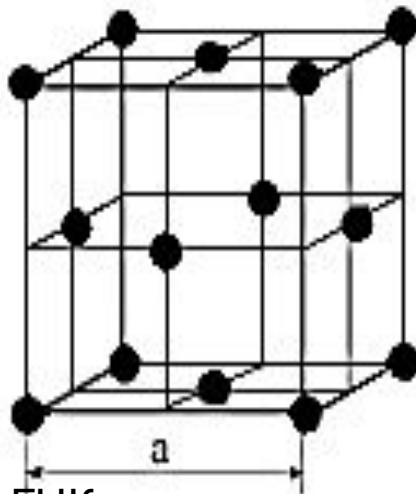
**Атомно-кристаллическая структура металлов. Механизм образования структуры металлов**

# Три типа строения кристаллических решеток

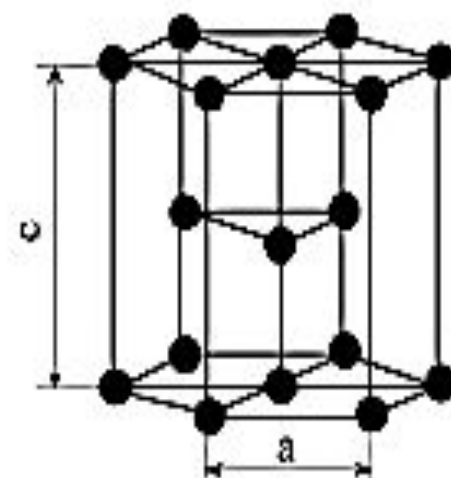
1. Кубическая объемноцентрированная (**ОЦК**)
2. Кубическая гранецентрированная (**ГЦК**);
3. Гексагональная плотноупакованная (**ГПУ**).



ОЦК



ГЦК

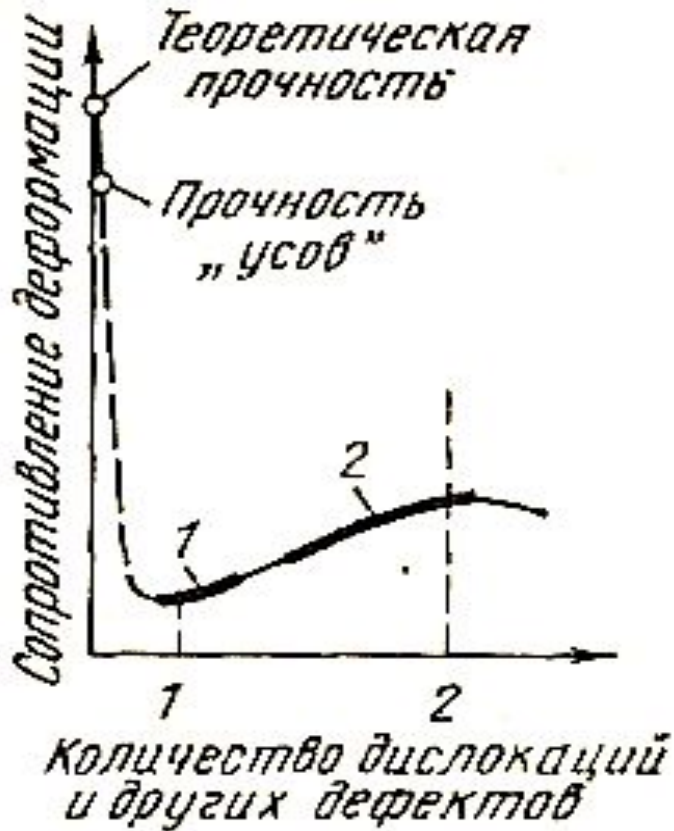


ГПУ

Основными характеристиками кристаллических решеток являются:

- 1) **период решетки  $a$  и  $c$**  - расстояния между центрами ближайших атомов. Для большинства металлов период решетки составляет 0,1 - 0,7 нм;
- 2) **координационное число** - число атомов, находящихся на ближайшем и равном расстоянии от данного атома. Чем оно выше, тем больше плотность упаковки атомов. Для кубической ячейки координационное число обозначается буквой **K**, а гексагональной - **Г**.
- 3) **базис** - это количество атомов, приходящееся на одну элементарную ячейку. обозначается буквой  $n$ .

# Теоретическая и реальная прочность твердых тел

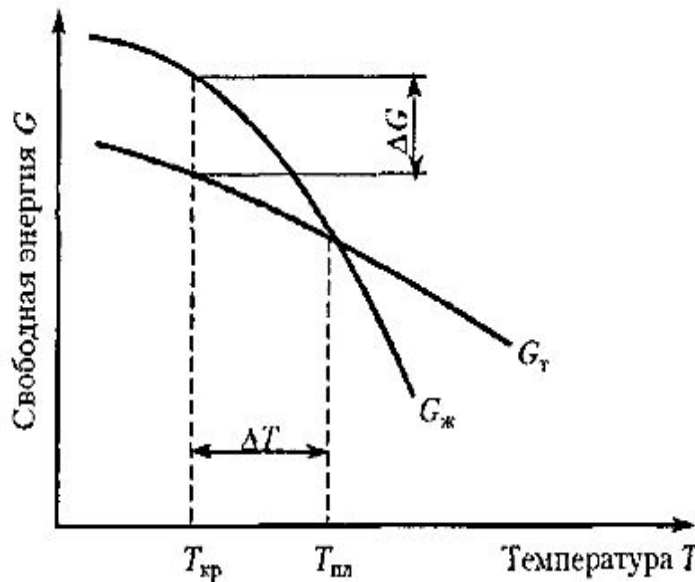


Зависимость прочности от количества дислокаций и других дефектов кристаллической решетки (схема И. А. Одингга)

- 1 — чистые, отожженные металлы;
- 2 — сплавы, упрочненные легированием, термической обработкой, пластической деформацией (наклеп) и т.п.

«Усы» представляют собой монокристаллы, выращенные в специальных условиях методом разложения или восстановления соответствующих химических соединений, путем конденсации паров чистых металлов при соответствующих температурах в среде водорода или инертного газа, или методом электроосаждения металлов из растворов на очень маленькие электроды.

# Энергетические условия и механизм процесса кристаллизации с классической точки зрения



Переход из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется **первичной кристаллизацией**.

Разность между температурой  $T(пл)$  и  $T(кр)$  называется **степенью переохлаждения**. Чем больше степень переохлаждения, тем больше разность свободных энергий и больше скорость кристаллизации.

При температурах, близких к температуре плавления, в жидком металле возможно образование небольших группировок, в которых атомы упакованы так же, как в твердом металле. Такие группировки называются **фазовыми флуктуациями**.

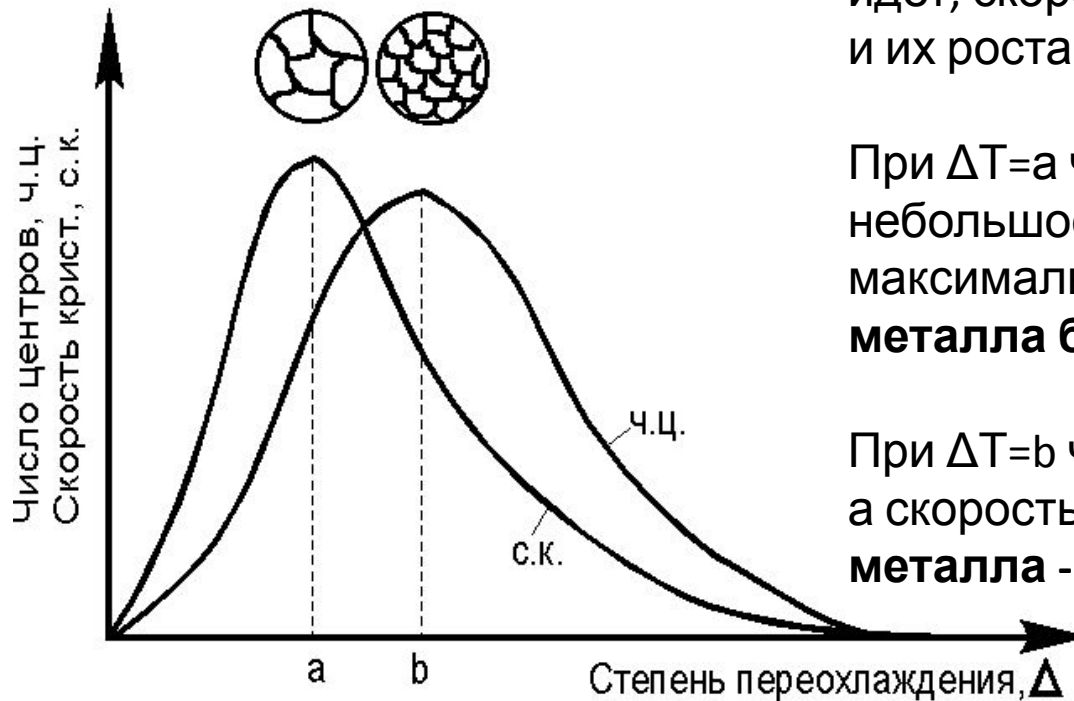
Фазовые флуктуации, имеющие размер выше критического, способны расти путем присоединения к себе атомов из жидкого расплава, называются **зародышами, или центрами кристаллизации**.

# Зависимость Таммана

При  $\Delta T=0$  процесс кристаллизации не идет, скорости образования зародышей и их роста равны нулю.

При  $\Delta T=a$  число центров кристаллизации небольшое, а скорость их роста максимальна. **В этом случае структура металла будет крупнозернистой.**

При  $\Delta T=b$  число центров - максимально, а скорость их роста мала. **Структура металла - мелкозернистая.**

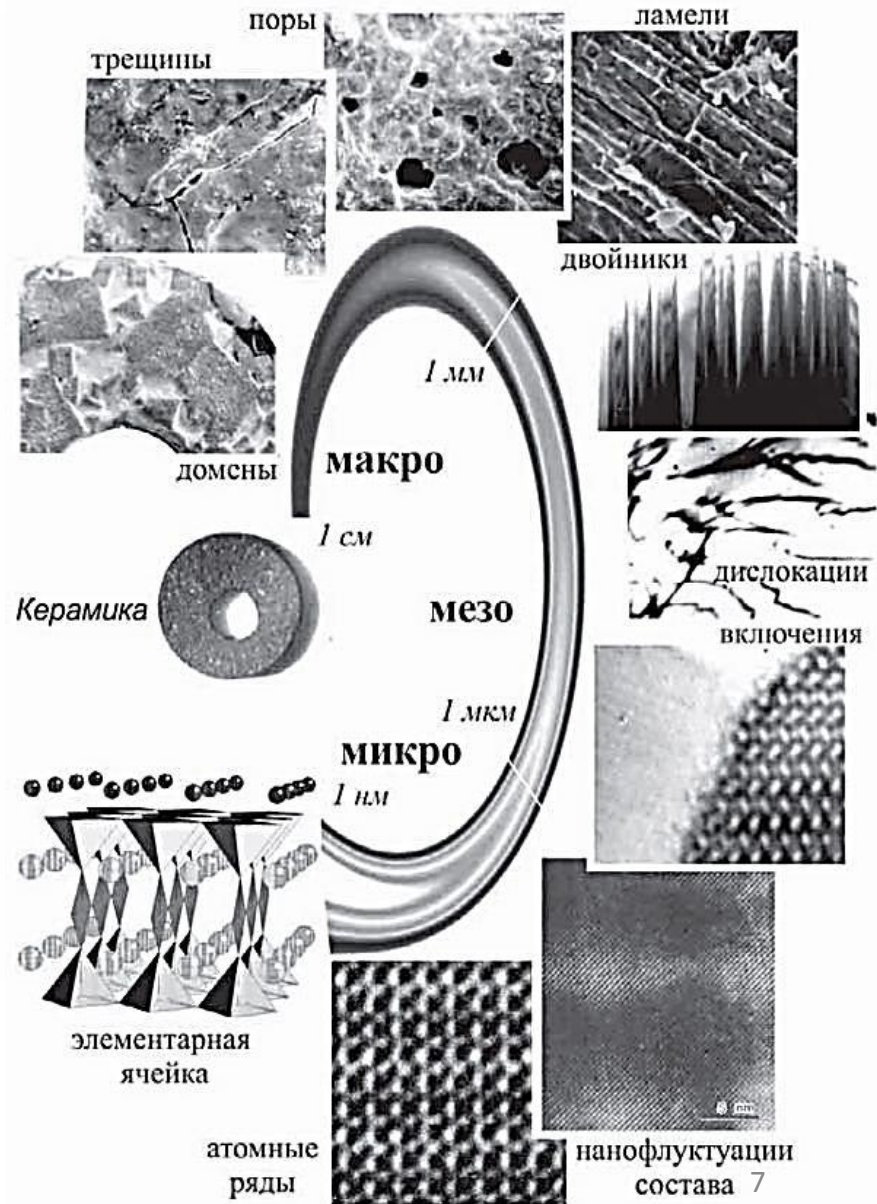


При больших степенях переохлаждения  $\Delta T=c$  скорость кристаллизации и число центров равны нулю. Подвижность атомов уже недостаточна для того, чтобы осуществлялась их их перестройка из хаотического расположения в жидкости в правильное в кристалле. **Структура металла - аморфная.**

# Лекция № 2

**Классификация и иерархия реальных структур материалов и их дефектов.**

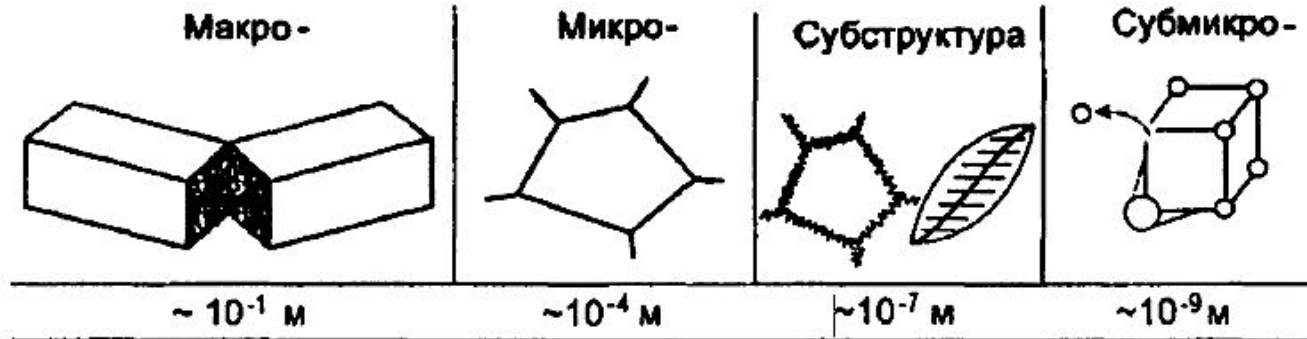
# Шкала увеличений и реальные структуры материалов



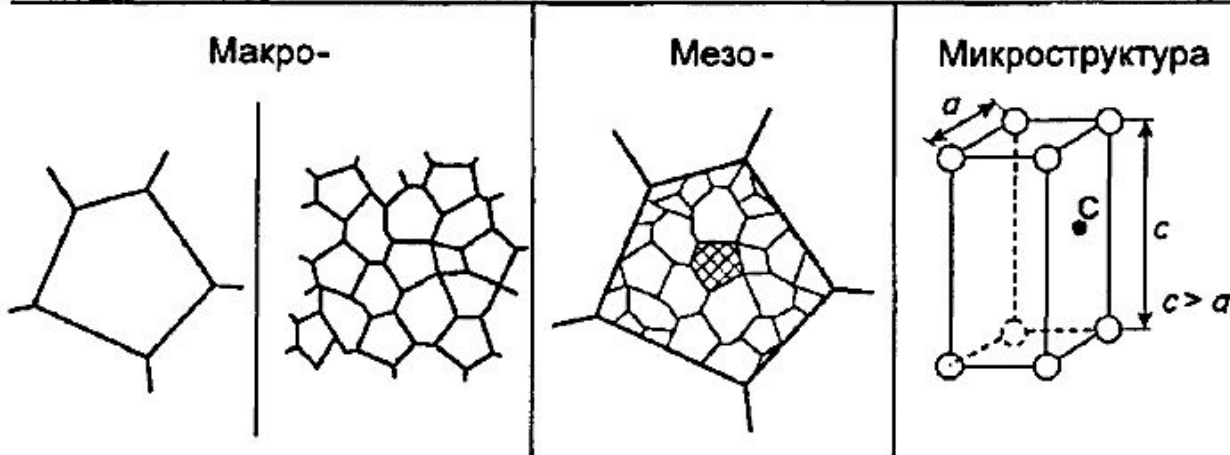
# Классификация реальных структур материалов и их дефектов.

## Иерархия структур материалов

В металлографии размерный ряд дефектов традиционно подразделяют на 4 группы



Классификация по результатам последних достижений науки - новый подход (интеграция физики, механики, материаловедения)





## Три основных вида искажений, которые легли в основу классификации дефектов структуры проф. Н. Н. Давиденкова

- **напряжения I рода** (они уравниваются в объеме всего образца, детали и приводят к изменению угла отражения рентгеновских лучей);
- **напряжения II рода** (они уравниваются в объеме зерна или субзерна и расширяют угловую область отражения рентгеновских лучей);
- **напряжения III рода** (они уравниваются в объеме элементарной ячейки кристаллической решетки и вызывают уменьшение интенсивности отражения рентгеновских лучей).

Согласно современным микроскопическим представлениям, дефекты в кристаллах подразделяют на четыре группы:

- нульмерные, или точечные;
- одномерные, или линейные;
- двухмерные, или поверхностные;
- трехмерные, или объемные.

*Точечные дефекты* — главным образом это вакансии, смещенные атомы, атомы внедрения и атомы замещения, имеют нульмерность, т. е. весьма малые размеры (1-5 Å) во всех направлениях, вызывают внутренние напряжения III рода по классификации Н. Н.

Давиденкова.

*Линейные дефекты* (к ним относятся краевые и винтовые дислокации) одномерны, имеют малые размеры в поперечнике и значительные размеры в длину.

*Поверхностные дефекты* — границы зерен, субзерен, фрагментов, ячеек, блоков и полигонов двумерны, имеют малые размеры по толщине и значительные на поверхности.

Линейные и поверхностные дефекты приводят к появлению внутренних напряжений II рода.

*Объемные дефекты* состоят из пор, трещин, неметаллических включений. Данные дефекты трехмерны и вызывают напряжения I рода.

Такое подразделение дефектов структуры на одно-, двух- и трехмерные объекты является весьма условным, учитывая **фрактальный характер дефектов** реальной структуры материалов. **Реальные поверхностные и объемные дефекты имеют дробную размерность.**

# Топологическая размерность дефектов реальной структуры на примере углеродных материалов

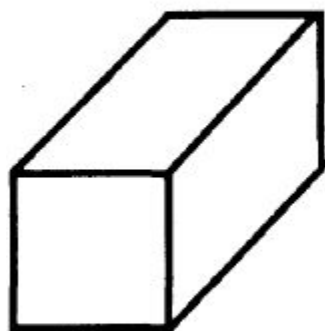
Элементы реальной структуры материалов,  
мерность элементов

Топология: **3** – объем  
Углерод: Алмаз

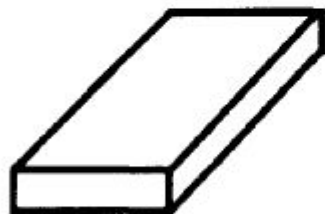
**2** – поверхность  
Графит

**1** – линия  
Бакитьюб

**0** – точка  
Бакиболл

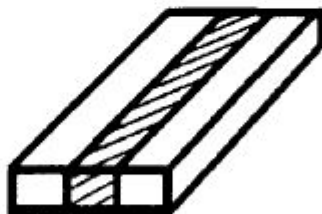


Объемы зерен, субзерен, блоков, фрагментов

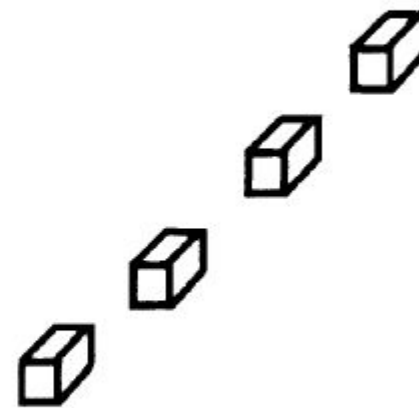


Поверхностные дефекты, границы зерен

1 – 100 нм



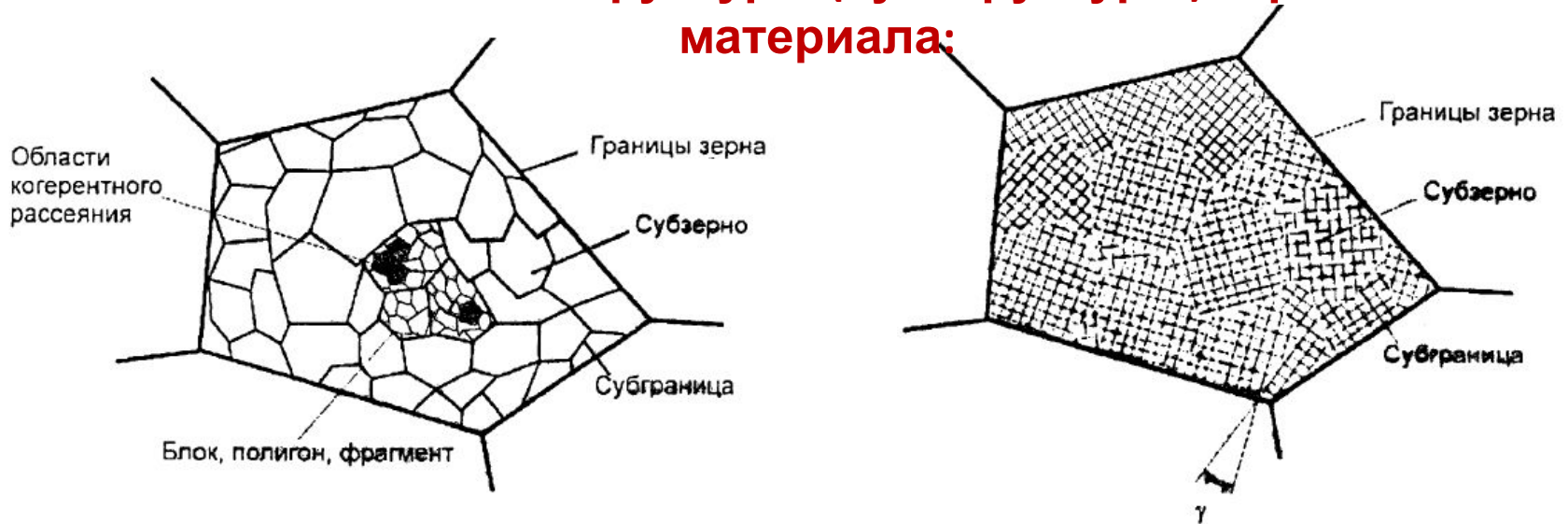
Линейные дефекты, дислокации



Точечные дефекты, вакансии, смещенные атомы

# Генезис и морфология структуры материалов

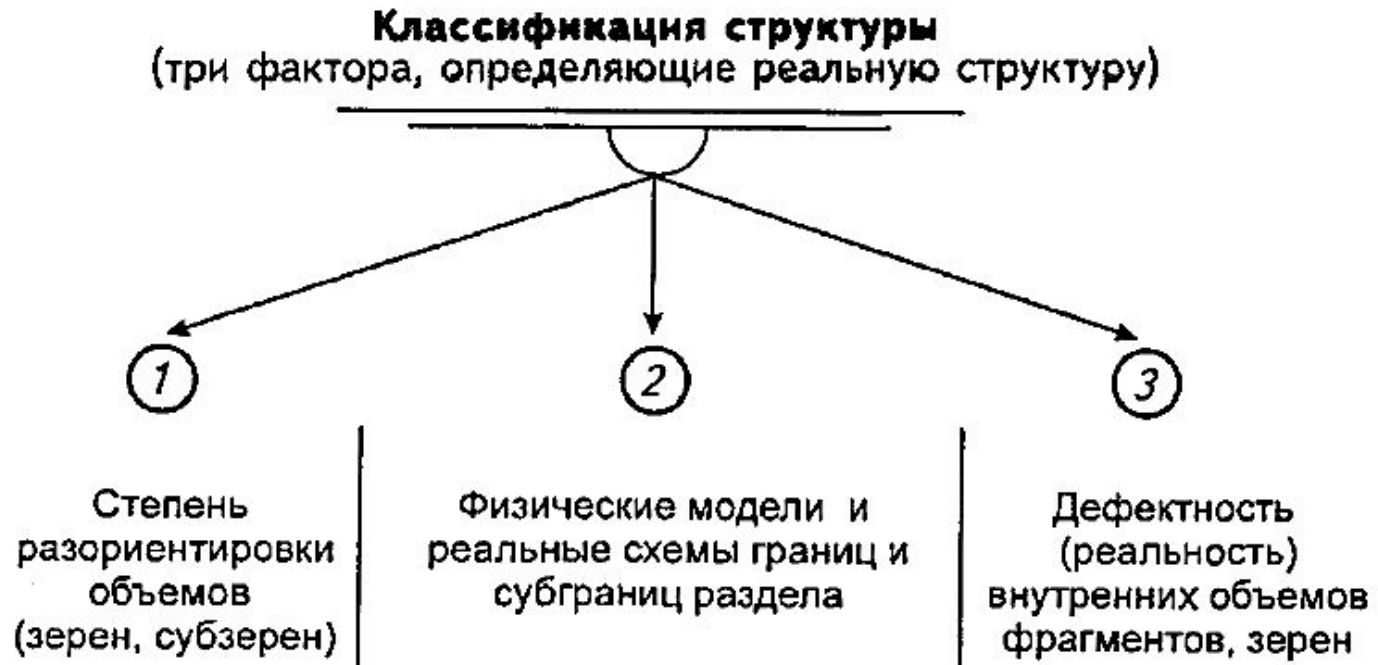
## Схема мезоструктуры (субструктуры) зерна материала:



## Группы дефектов реальной структуры материалов на макро-, мезо- и микроструктурном уровнях:

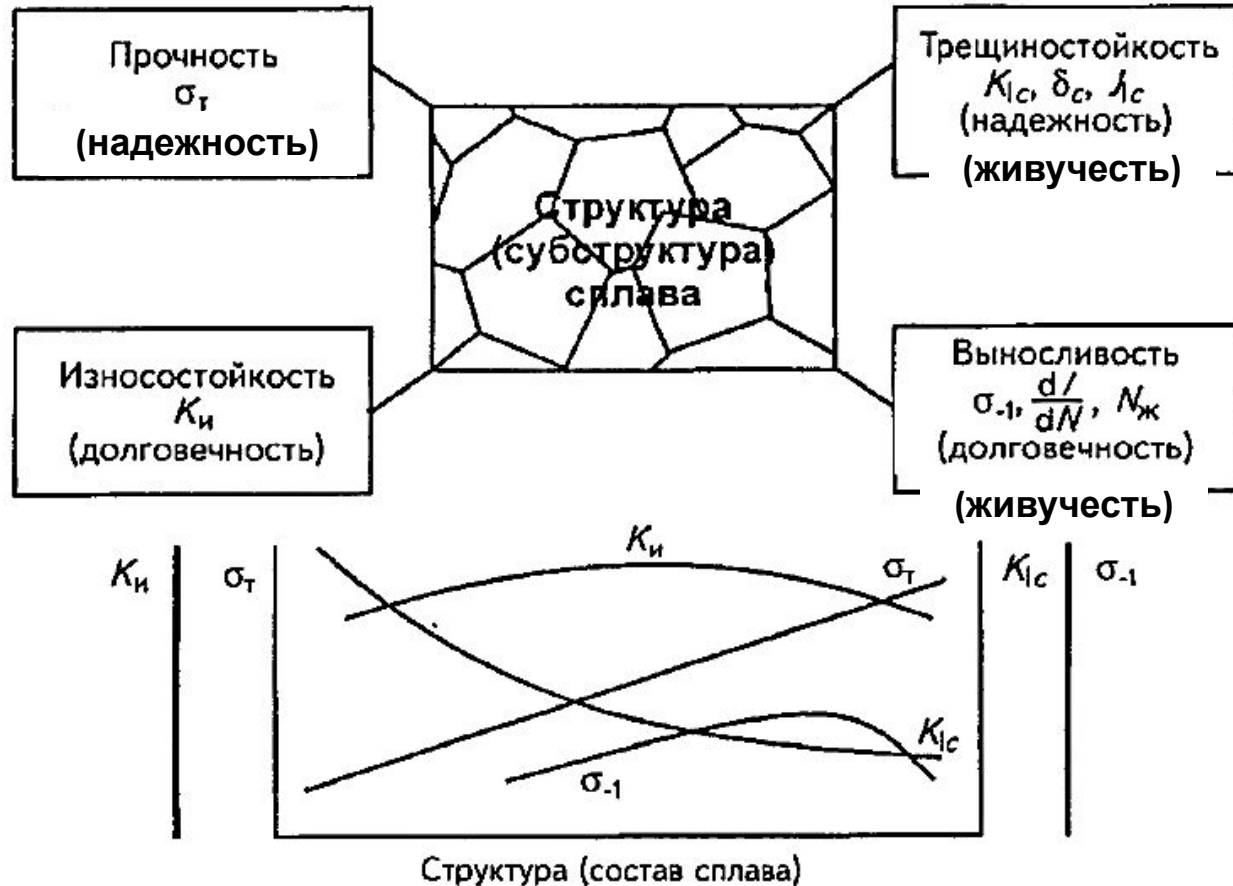
- **макродофекты** (особая направленная форма зерен – дендриты, полиэдры, искривленные границы зерен, тройные границы зерен);
- **мезодофекты** (сложная форма фрагментов, ячеек, блоков, полигонов, дисклинации, субграницы);
- **микродофекты** (точечные дефекты: вакансии и дислоцированные ионы, степень упругой искаженности элементарной ячейки кристаллической решетки).

# Факторы (1-3), определяющие реальность (дефектность) структуры, в отличие от идеальных представлений



# Связь структуры со свойствами материала

Зависимость главных характеристик механических свойств материала от его структуры



$\sigma_T$  - предел текучести;  $\sigma_{-1}$  - предел выносливости;  $K_{1c}$  - критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины;  $\delta_c$  — деформационный критерий трещиностойкости;  $J_{1c}$  — энергетический критерий трещиностойкости;  $dI/dN$  — скорость распространения усталостной трещины; - живучесть материала (число циклов нагружения образца до разрушения);

# Лекция № 3

Всеобщность иерархического  
принципа при создании  
систем. Фрактальность и  
фракталы

# Всеобщность иерархического принципа при создании систем

**Иерархия** – это принцип, определяющий распределение элементов системы по уровням в зависимости от общности функций (свойств) этих элементов и силе оказываемого влияния на другие элементы.

Стандартное иерархическое взаимодействие между элементами системы осуществляется в порядке от высшего к низшему.

Иерархический принцип устройства характерен для всей материи как таковой.

В микро- и мезоскопическом масштабе это выглядит следующим образом:

- 1) кварки образуют элементарные частицы;
- 2) элементарные частицы образуют атомы химических элементов;
- 3) атомы образуют молекулы;
- 4) молекулы образуют ансамбли надмолекулярных структур различного уровня.

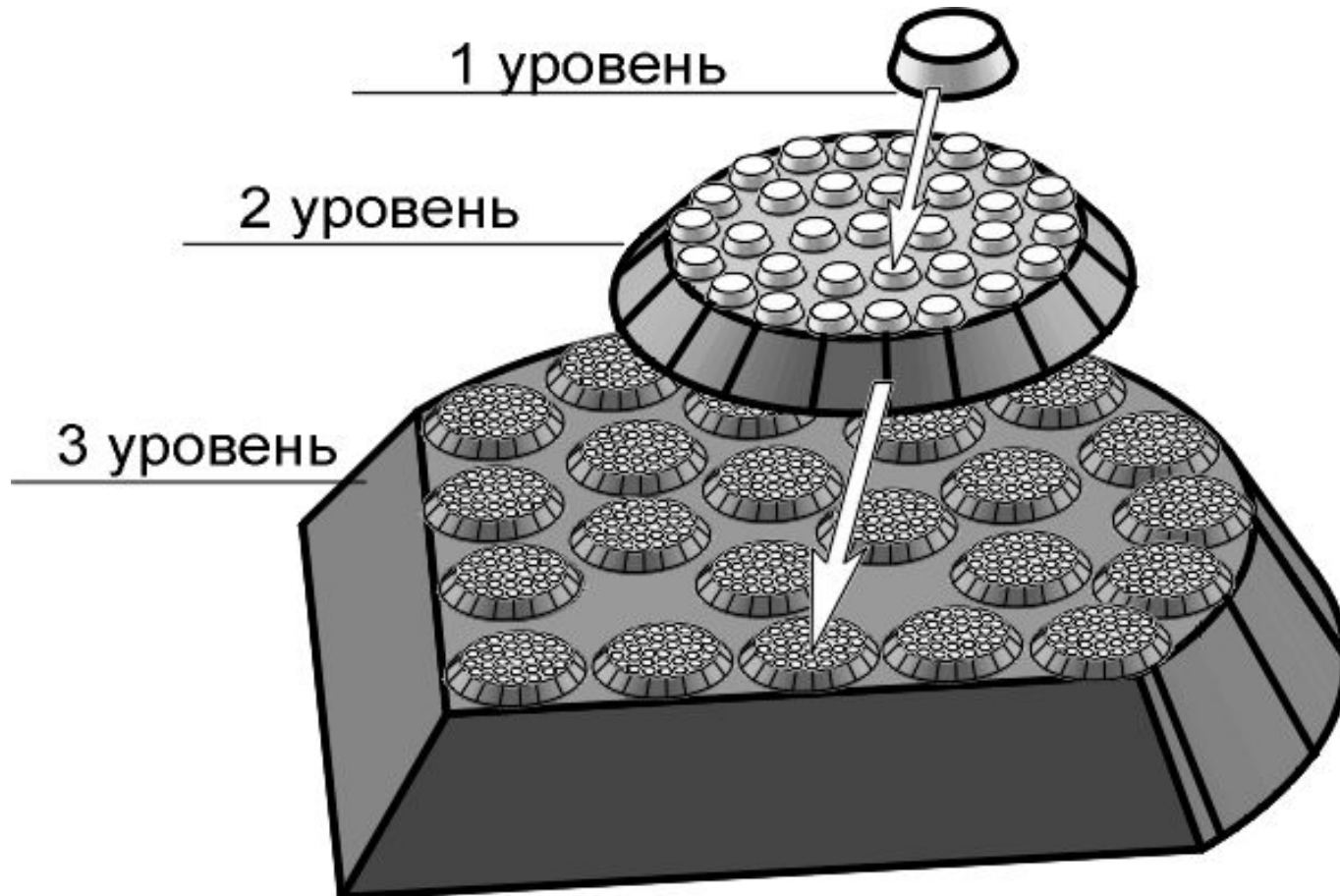
В космическом масштабе:

- 1) планеты и звезды образуют планетные системы и звездные скопления;
- 2) из планетных систем и звездных скоплений формируются галактики;
- 3) галактики, в свою очередь, образуют скопления галактик.

**Причина всеобщности иерархического принципа организации сложных систем**, с точки зрения кибернетики, объясняется следующим образом: усложняя организацию физического мира, природа действует по методу проб и ошибок. Одни и те же элементы воспроизводятся ею во многих экземплярах, которые, однако, не вполне тождественны оригиналу, а отличаются от него



# Схема построения иерархической системы, которая включает в себя три иерархических уровня



# Фрактальность и критерии фрактальности.

## Фрактальные структуры

*Фракталы – понятие, которое возникло в конце 80-х годов благодаря работам Бенуа Мандельброта. Согласно его собственному пробному определению, **фрактал** – это структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому.*

**Фрактал** - бесконечно самоподобная геометрическая фигура, каждый фрагмент которой повторяется при уменьшении масштаба.

**Регулярный фрактал** - искусственный модельный фрактал, сгенерированный по специальным алгоритмам. Для него характерно точное самоподобие - это идеальная модель.

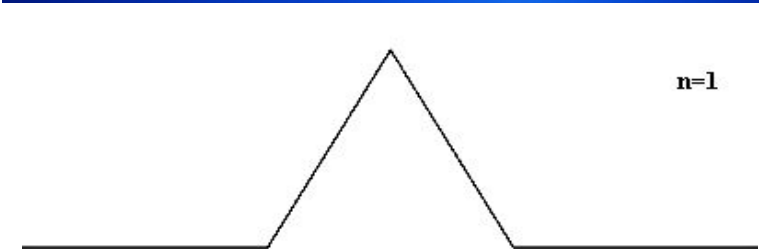
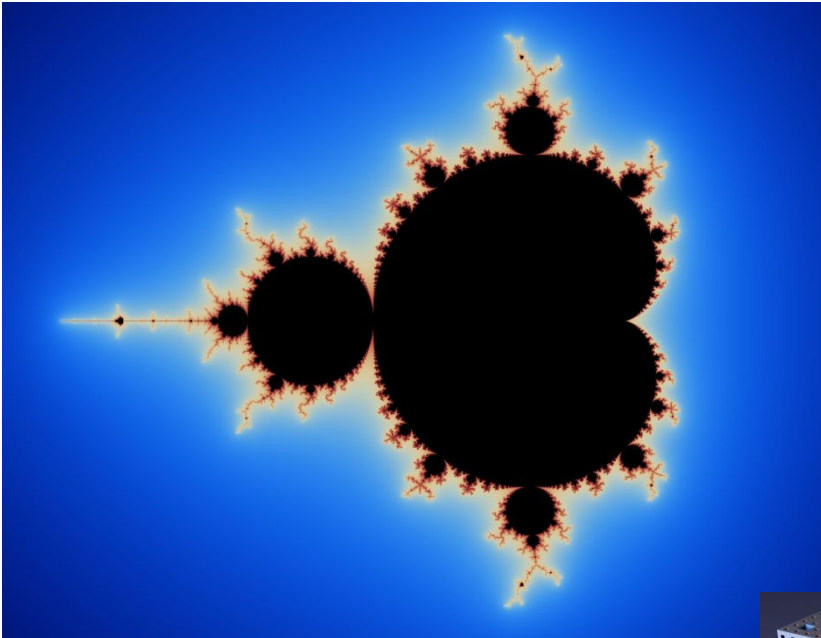
**Мультифрактал** - сложная фрактальная структура, которая получается с помощью нескольких последовательно сменяющих друг друга алгоритмов.

**Для описания фрактала требуется всего три параметра:**

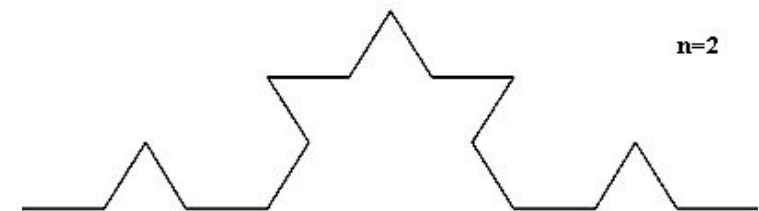
- фрактальная размерность  $D$ ,
- размеры первичного блока ( $R_{\text{тин}}$ ) и объекта в целом.

**Фрактальная размерность (дробная размерность)** – количественная характеристика фрактала. Она позволяет количественно описывать различные структуры, отличающиеся высокой сложностью, содержащие большое количество точечных, линейных, поверхностных и объемных дефектов.

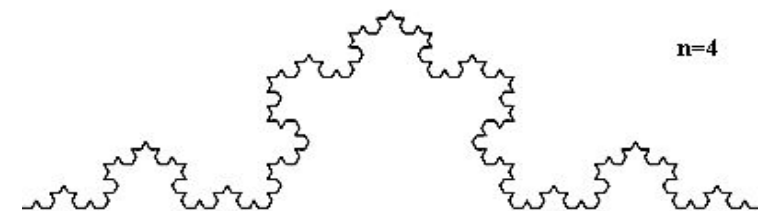
Под **фрактальным кластером** понимают систему взаимодействующих частиц, которая обладает свойством масштабного самоподобия в интервале размеров  $r$ , где  $R \ll r \ll R_0$ . Здесь  $R_0$  – масштабная единица измерения линейного



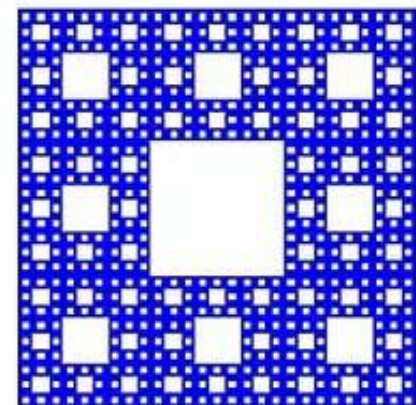
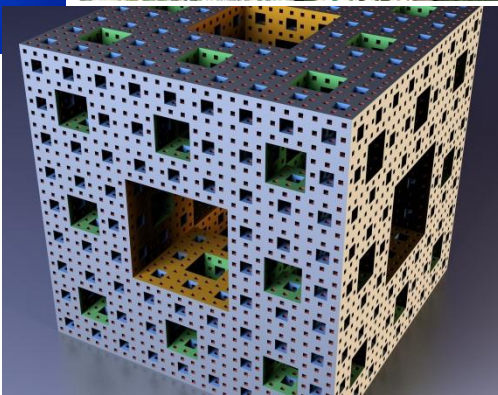
n=1



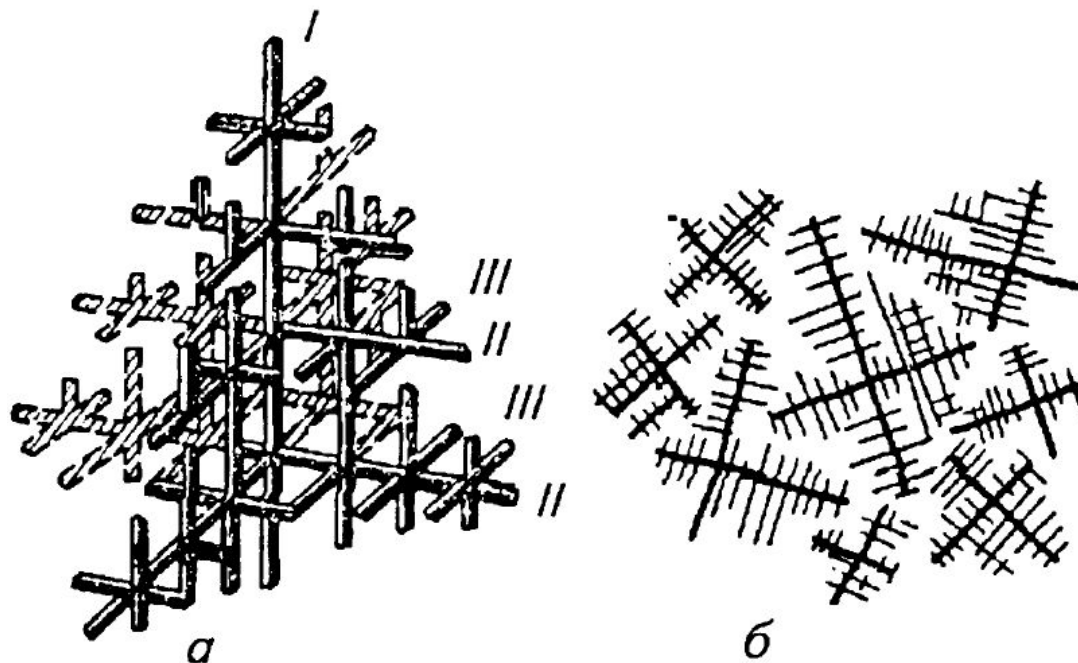
n=2



n=4



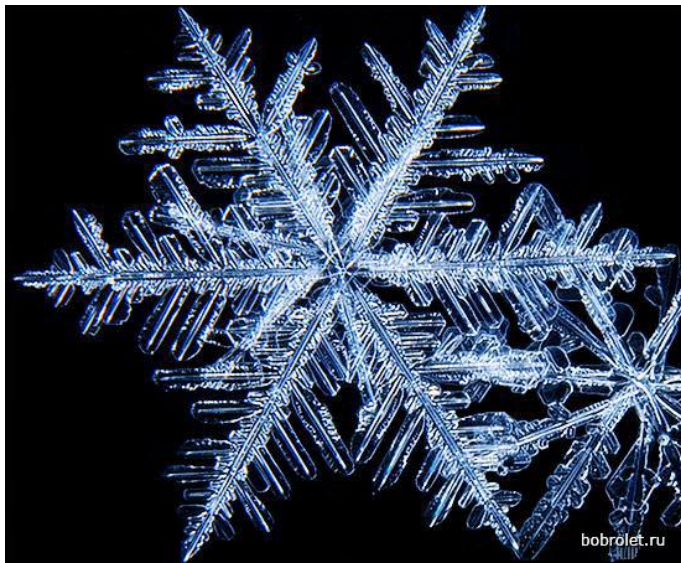
Пример самоподобного фрактала - дендрит, возникающий при первичной кристаллизации всех металлов и сплавов.



**Рис. 1.11.** Схема дендритного кристалла (*a*) и схема роста дендритов (*б*) при кристаллизации жидкости:

*I* – первичная ось дендрита; *II* – вторичные оси;  
*III* – третичные оси и т.д.

ДЕНДРИТЫ - минеральные агрегаты (иногда кристаллы) древовидной формы. Образуются в результате быстрой кристаллизации по тонким трещинам или в вязкой среде. Характерны для самородных элементов (Au, Ag, Cu), оксидов марганца, льда и пр.



а



б

Реальная (а) и компьютерная (б) снежинки

Физический смысл определения фрактальной размерности регулярных фракталов сводится к следующему.

Прямая линия представляет собой множество точек в пространстве: при любом изменении масштаба мы получаем то же самое множество точек. Кроме того, параллельное смещение линии не изменяет множество. Это означает, что прямая инвариантна относительно переноса и изменения масштаба, т.е. обладает свойством самоподобия.

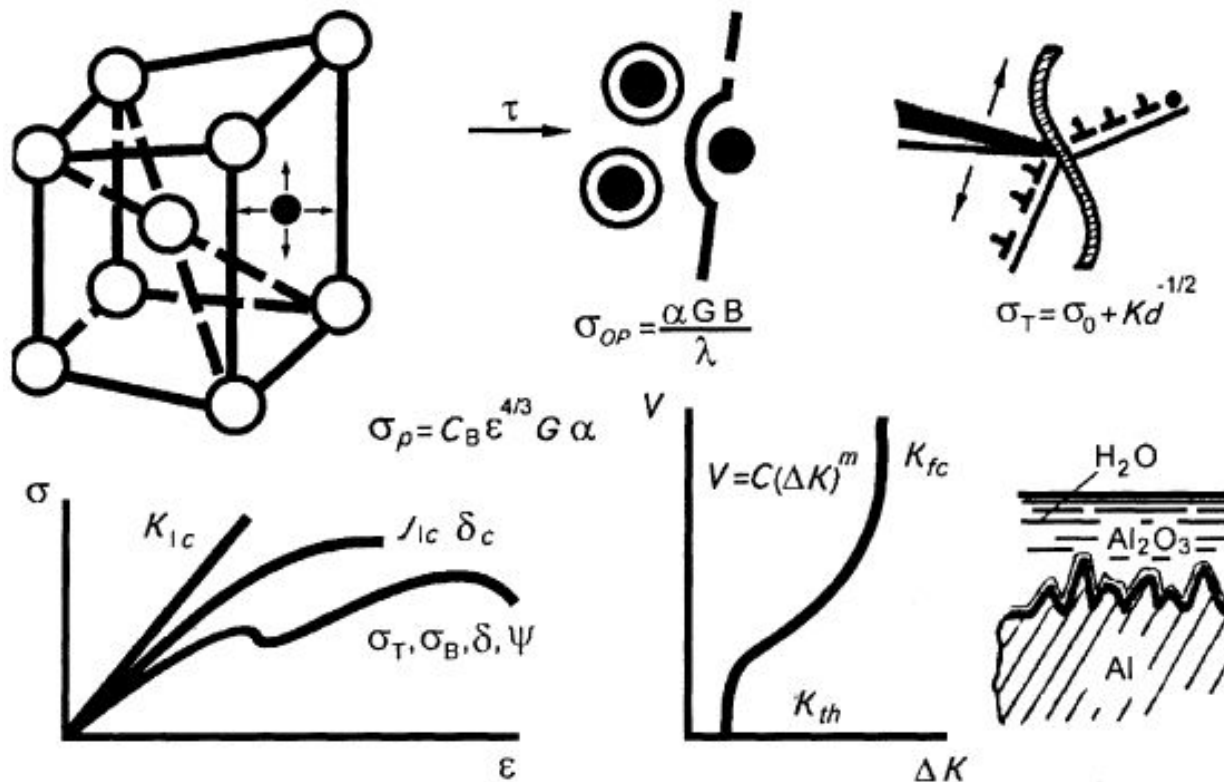
Размерность подобия  $d$  для прямых, плоскостей и кубов равна, соответственно, 1, 2 и 3.

Реальная снежинка представляет собой дендритный кристалл льда.

Описания снежинки с помощью фрактальной геометрии потребуются всего лишь три параметра: фрактальная размерность  $D$ , размеры первичного блока ( $R_{\text{тин}}$ ) и снежинки в целом ( $R_{\text{max}}$ ).

Фрактальная размерность компьютерной и реальной снежинки одинакова ( $D = 1,71$ ).

# Зависимость свойств материалов от структуры



- **верхний ряд** — примеры моделей дефектов микро- и мезоструктуры материала (слева направо) упругая деформация кристаллической решетки растворенными, примесными атомами, торможение движущейся дислокации дисперсными избыточными фазами (частицами), торможение дислокационных нагромождений границами зерен;

- **нижний ряд** — примеры, отражающие изменение некоторых физико-механических свойств под воздействием структурных дефектов верхнего ряда.

# Фрактальная модель образования критических зародышей

К настоящему времени найдены термодинамические соотношения, которые устанавливают функциональную связь между такими величинами, как:

- работа образования критического зародыша  $W_c$  при кристаллизации из расплава;
- критического радиуса  $r_c$  зародыша;
- поверхность критического зародыша  $S_c$ ;
- степень пересыщения при охлаждении расплава.

Однако такие соотношения не позволяют получить численную оценку этих величин, и до настоящего времени ничего не известно о структуре вещества критического зародыша новой фазы.

**Можно предположить, что структура вещества, составляющая структуру новой конденсированной фазы, в процессе кристаллизации из расплава – фрактальна и является фрактальным кластером.**

Эта гипотеза подтверждается:

- 1) **Одно из основных свойств фрактальной структуры: захватывать большое пространство с использованием малого количества элементов.** Это становится возможным за счет создания ажурной сильноразветвленной структуры. Такое хищническое поведение фракталов при захвате кристаллов делает понятным тот факт, почему вообще в кристаллизирующей системе происходит преодоление энергетического барьера при образовании зародыша.
- 2) С другой стороны, чтобы частицы новой фазы могли участвовать в хаотичном тепловом движении необходимо их **седиментационная устойчивость, т.е. низкая скорость оседания на дно сосуда.** Фрактальные кластеры обладают достаточно большой седиментационной устойчивостью, по сравнению с плотным трехмерным кластером за счет меньшей плотности.
- 3) Меньшее по сравнению с плотным кластером количество частиц для его образования.
- 4) Фрактальная структура критического зародыша более реалистична с точки зрения статической вероятности столкновения небольшого количества частиц жидкой фазы.
- 5) И наконец, наиболее существенным фактором, благодаря которому кристаллизирующая система отдает предпочтение фрактальной структуре зародышей новой фазы, является тот факт, что **плотность частиц фрактального кластера уменьшается от центра к периферии, поэтому для него не существует поверхности раздела с окружающей средой, его структура плавно перетекает в окружающую среду.**

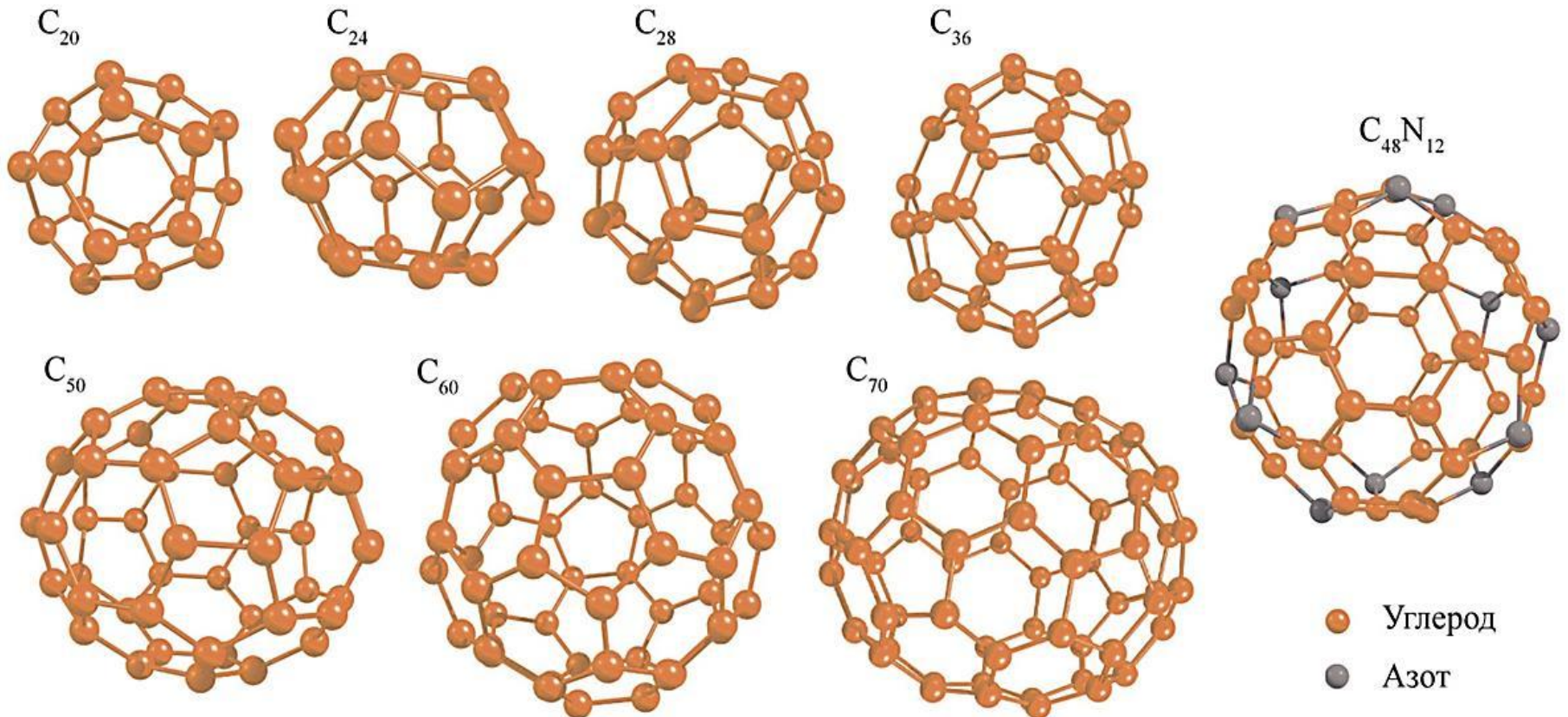
# Лекция №4

Фуллерены. Свойства фуллеренов.  
Фуллеренный механизм образования и  
разрушения структуры железо-  
углеродистых сплавов.  
Понятие о диссипативных структурах.



**Фуллерен** — аллотропная модификация углерода, часто называемая молекулярной формой углерода. Семейство фуллеренов включает целый ряд атомных кластеров  $C_n$  ( $n > 20$ ), представляющих собой построенные из атомов углерода замкнутые выпуклые многогранники с пяти- и шестиугольными гранями (за редкими исключениями).

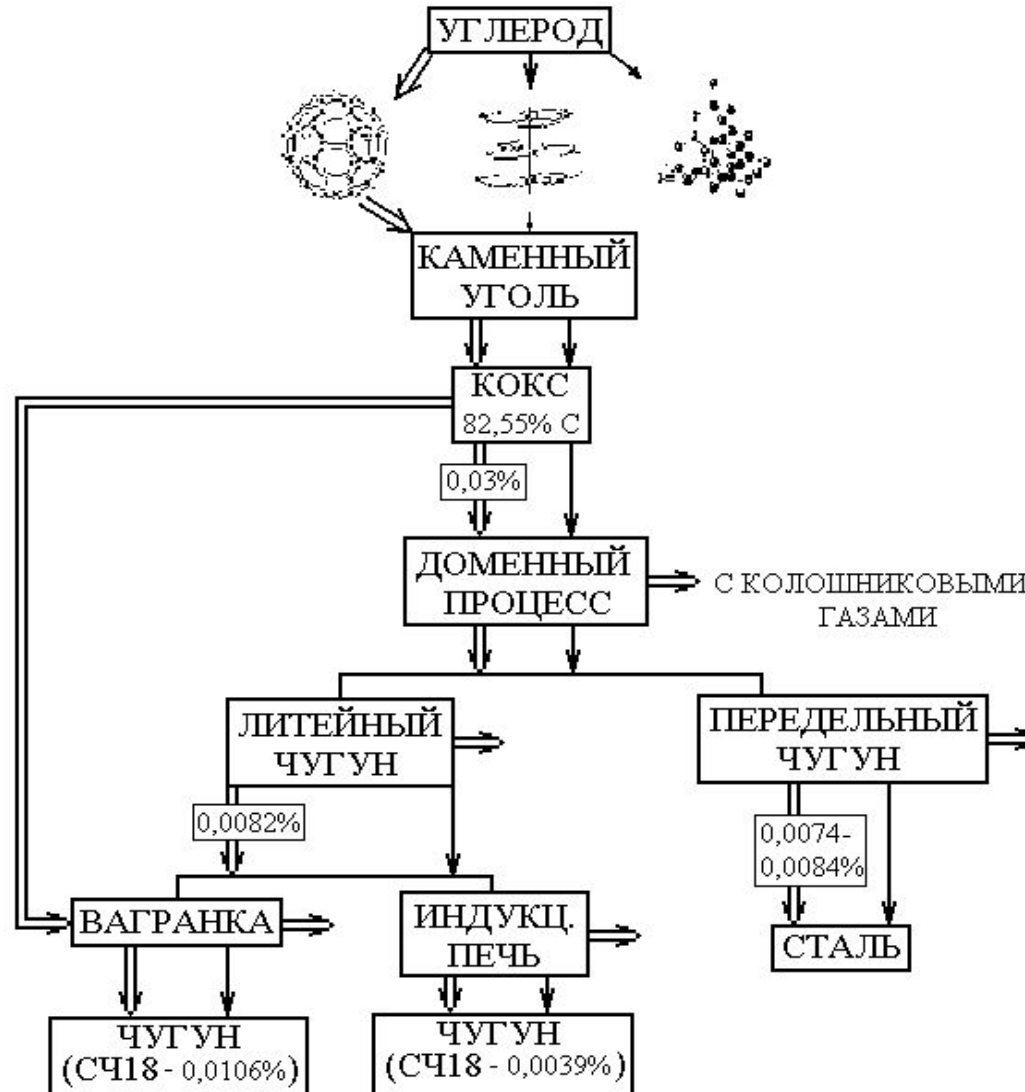
В незамещенных фуллеренах атомы углерода имеют координационное число 3 и находятся в  $sp^2$ -гибридном состоянии, образуя сферическую сопряженную ненасыщенную систему.



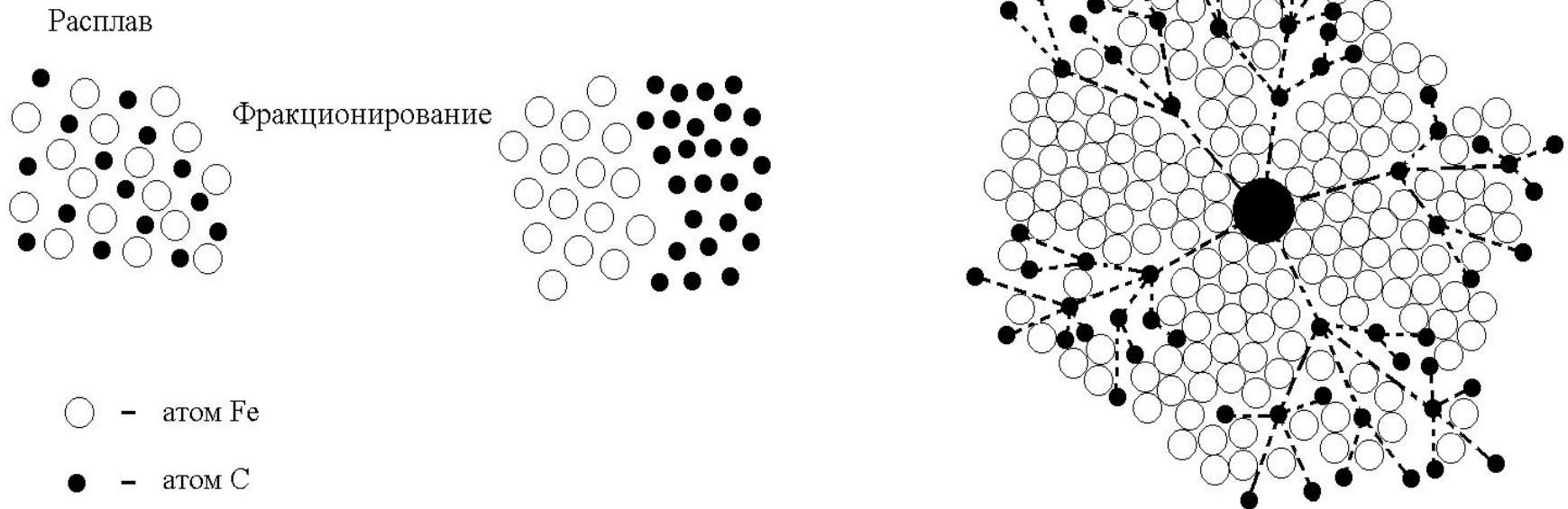
# Формирование структуры углеродистых сталей и чугунов

с учетом фуллеренов

Схема перехода фуллеренов во время последовательных стадий производства железо-углеродистых сплавов



# Фракционирование атомов железа и углерода по размеру и образование зерна феррита



# Лекция № 5

## Виды механического разрушения

## Виды и классификация разрушений

**Механическое разрушение** - любое изменение размера, формы или свойств материала конструкции, машины или отдельной детали, в результате которого она утрачивает способность удовлетворительно выполнять свои функции.

Основываясь на этом, **вид разрушения** можно определить как физический процесс или несколько взаимосвязанных между собой процессов, приводящих к разрушению.

*Проф. Старки (W. L. Starkey) из Университета шт. Огайо предложил **систему классификации всех возможных видов разрушения.***

Эта система основана на учете трех факторов:

- (1) характера разрушения,
- (2) причин разрушения,
- (3) места разрушения.

Подробно эти факторы определяются ниже. Каждый отдельный вид разрушения характеризуется тем, как проявлялся разрушение, что его вызывает и где оно происходит.

**По характеру разрушения** можно выделить четыре класса:

1. Упругая деформация.
2. Пластическая деформация.
3. Разрыв, или разделение на части.
4. Изменение материала:  
(А) металлургическое; (В) химическое; (С) ядерное.

**По причинам разрушения** можно определить четыре класса:

1. Нагрузки:  
(А) установившиеся; (В) неуставившиеся;  
(С) циклические; (D) случайные.
2. Время процесса:  
(А) очень малое; (В) малое; (С) продолжительное.
3. Температуры:  
(А) низкие; (В) комнатные; (С) повышенные.
4. Воздействия окружающей среды:  
(А) химические; (В) ядерные (радиационные).

**По месту разрушения** существует два типа разрушения:  
(А) объемное; (В) поверхностное.

# Основные виды механического разрушения:

1. **Упругая деформация**, вызванная действием внешних нагрузок и (или) температуры.
2. **Текучесть.**
3. **Вязкое разрушение.**
4. **Хрупкое разрушение.**
5. **Усталость:**
  - (А) многоцикловая; (В) малоцикловая и др.
7. **Коррозия:**
  - (А) химическая; (В) электрохимическая; (С) щелевая; (D) точечная (питтинговая); (Е) межкристаллитная; (F) эрозионная; (H) кавитационная; (I) водородное повреждение; (K) коррозия под напряжением.
8. **Износ:**
  - (А) адгезионный; (В) абразивный; (С) коррозионный; (D) поверхностный усталостный; (Е) деформационный; (F) ударный.
9. **Разрушения при ударе:**
  - (А) разрыв при ударе; (В) деформирование при ударе; (С) ударный износ; (Е) усталость при ударе.
10. **Фреттинг:**
  - (А) фреттинг-усталость; (В) фреттинг-износ; (С) фреттинг-коррозия.
11. **Ползучесть.**
12. **Радиационное повреждение.**
13. **Выпучивание.**

1) **упругая деформация** - деформация, возникающая под действием эксплуатационной нагрузки настолько велика, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенную ему функцию.

2) **текучесть** - наблюдается, когда пластическая необратимая деформация настолько велика, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенную ему функцию.

3) **вязкое разрушение** - наблюдается, когда пластическая деформация достигает такой величины, что элемент разделяется на две части. При этом разрушение происходит в результате процесса **зарождения, слияния и распространения внутренних пор, поверхность разрушения гладкая и волнистая.**

4) **хрупкое разрушение** происходит когда упругая деформация элемента из хрупкого материала достигает такой величины, что разрушаются первичные межатомные связи и элемент разделяется на две или более части. Внутренние дефекты и образующиеся трещины быстро распространяются до полного разрушения. **Соответственно поверхность разрушения - зернистая, неровная.**

5) **усталостное разрушение** - процесс изменения структур и свойств материала под действием циклических нагрузок (повторно-переменных напряжений), приводящих к появлению трещины, а затем и к полному разрушению элемента

6) **коррозия** - широкий класс вида разрушения при котором деталь или элемент конструкции утрачивает способность выполнять предназначенную ему функцию в результате химического или электрохимического взаимодействия.

Коррозия часто проявляется во взаимодействии с другими видами разрушения, особенно с износом и усталостью, значительно ускоряя ее.



7) **износ** - вид разрушения - при котором происходит постепенное изменение размеров элементов конструкции, в следствии удаления отдельных частиц с контактирующих поверхностей при их движении чаще всего скользящим друг относительно друга.

Износ является в основном результатом механического действия, которые состоит из сложного взаимодействия: локальных сдвигов, вдавливаний, свариваний металла, разрыва и других механизмов.

**а) адгезионный износ** происходит в результате действия высоких локальных давлений, свариваний между собой шероховатостей поверхностей, последующей пластической деформации, возникающих при их относительном перемещении, разрушения локальных сцеплений шероховатостей, удаления или переноса металла.

**б) абразивный износ** - вид разрушения при котором с поверхности металла удаляются частицы в результате режущего или царапающего действия неровностей более твердой поверхности из контактирующих поверхностей. Или же частиц, задержавшихся между поверхностями.

**в) усталостные износ (поверхностный)** - представляет собой износ вращающихся или скользящих друг относительно друга криволинейных поверхностей, при этом в результате действия циклических касательных напряжений на небольшой глубине у поверхности возникают сетки усталостных трещин, выходящих на поверхность, откалываются частиц металла и на поверхности образуются ямки.

**8) Разрушение при ударе** - происходит когда в результате действия неустановившихся нагрузок в деталях возникают такие деформации, что детали не в состоянии выполнять предназначенную функцию.

Разрушение происходит в результате взаимодействия волн напряжений и деформаций, являющихся действием динамического или внезапного приложения нагрузок. При этом взаимодействие волн может приводить к возникновению локальных напряжений и деформаций во много раз превышающих, возникающие при статическом приложении тех же самых усилий:

- Если возникающие напряжения деформации таковы, что происходит разрушение на 2 или более части, то это **разрыв при ударе**.
- Если удар приводит к возникновению недопустимых упругих ил пластических деформаций, то это разрушение называется **деформирование при ударе**.
- Если на повторных ударах возникают циклические упругие деформации в результате чего образуются сетки усталостных трещин, то процесс называется **усталостным износом при ударе**.

**9) Разрушение вследствие радиационного повреждения** означает, что при радиационном облучении происходит такое изменение свойств металла, что детали уже не в состоянии выполнять предназначенные им функции. Обычно это изменение связано с потерей деталями пластичности.

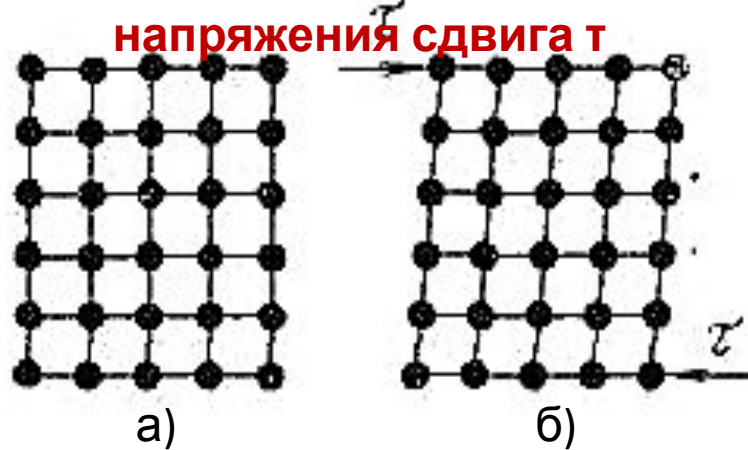
**10) Разрушение выпучиванием** - наблюдается когда при некоторой критической комбинации величины и (или) места , а также формы и размеров детали ее перемещения или прогибы внезапно резко увеличиваются при малом изменении нагрузки. Такое нелинейное поведение приводит к разрушению выпучиванием, если потерявшая устойчивость деталь уже не может выполнять своих функций.

**11) Фреттинг** может происходить на поверхности контакта двух твердых тел, прижатых друг к другу нормальной силой и совершающих относительно друг друга циклические движения малой амплитуды.

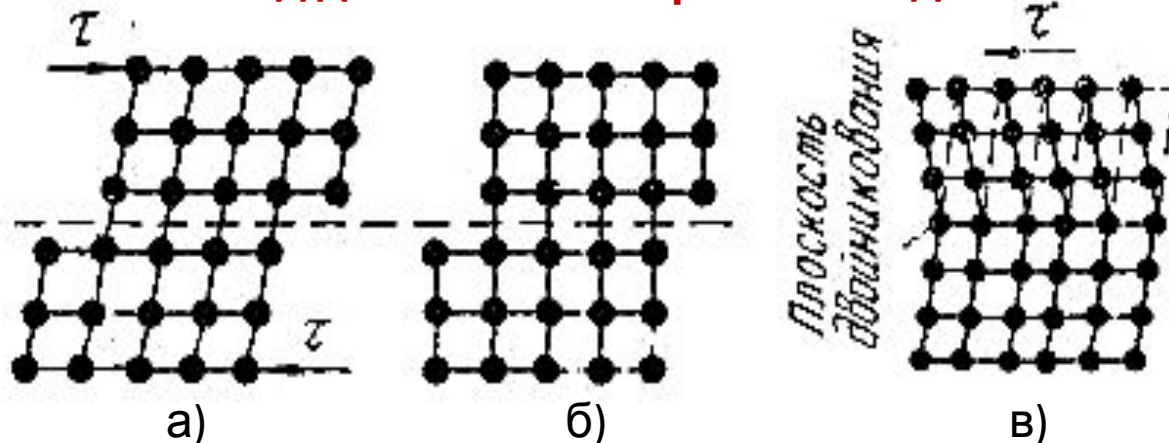
## Схема упругой деформации металла под действием

напряжения сдвига  $\tau$

а – первоначальный кристалл;  
б – упругая деформация



## Схемы пластической деформации металла под действием напряжения сдвига $\tau$



а – увеличение упругой и появление пластической деформации, вызванной скольжением при нагружении, большем предела упругости;

б – напряжение, обуславливающее появление сдвига (после сдвига сохраняется остаточная деформация); в – образование двойника

# Лекция № 6

**Основные механизмы пластической деформации.  
Процессы деформации и разрушения  
металлических материалов.  
Основные типы кривых статического растяжения**

# Основные механизмы пластической деформации

**В общем случае прочность твердого тела зависит от деформации, скорости деформации и температуры.**

Она определяется:

- кинетикой процессов на атомарном уровне,
- скольжением отдельных дислокаций, скольжением группировок дислокаций, переползанием дислокаций и сопутствующего (при высоких температурах) движения отдельных атомов,
- относительным смещением и изменением формы зерен в результате приграничного скольжения (включающего движение дефектов в границах и в приграничных объемах), механическим двойникованием (за счет движения двойникующих дислокаций) и т. д.

Все перечисленные процессы, протекающие на атомарном уровне, оказывают решающее влияние на пластическое течение.

Пластичность поликристаллического тела, с учетом указанных выше механизмов, на атомарном уровне можно разделить **на пять групп.**

**1. Разрушение при напряжении, соответствующем идеальной прочности.** Пластическое течение начинается при превышении теоретического напряжения сдвига. Такой механизм разрушения может наблюдаться у бездефектных кристаллов.

**2. Низкотемпературная (температуры близкие к комнатной) пластическая деформация за счет скольжения дислокации,** контролируемая: а) решеточным сопротивлением (или напряжением Пайерлса-Набарро); б) отдельными препятствиями; в) фононным или другим типом торможения дислокации.

**3. Низкотемпературная пластическая деформация за счет двойникования** (сдвойникованная часть кристалла, или двойник, имеет такую же кристаллическую структуру, как и остальная его часть, и отличается от последней лишь кристаллической ориентацией). Двойникование как механизм деформации играет важную роль при низких температурах в ОЦК металлах, а также в некоторых керамических материалах.

**4. Высокотемпературная пластическая деформация типа ползучести,** протекающая в соответствии со степенным законом за счет дислокационного скольжения или скольжения и переползания (перемещения дислокации перпендикулярно плоскости скольжения). Эта деформация контролируется: а) процессами скольжения дислокаций; б) зависимым от объемной диффузии переползанием дислокаций (высокотемпературная ползучесть); в) зависимым от диффузии по дислокационным трубкам переползанием (низкотемпературная ползучесть); г) явлениями, связанными с нарушением степенного закона ползучести (переходом от переползания — скольжение только к скольжению); д) механизмом ползучести по Харперу — Дорну (контролируемая переползанием дислокаций ползучесть протекает в условиях, при которых плотность дислокаций не изменяется в зависимости от напряжения); е) механизмом ползучести, сопровождаемым динамической рекристаллизацией.

**5. Пластическое течение — ползучесть — вакансионного типа,** контролируемое либо объемной диффузией («ползучесть по Набарро — Херрнгу»), либо зернограничной диффузией («ползучесть по Коблу»), либо взаимодействием на поверхности раздела. Во всех случаях следует учитывать переползание дислокации, и, как следствие, сохранение основного механизма пластического течения.

Перечисленные механизмы могут действовать в сочетании, образуя сложные комбинации; в результате может реализовываться ряд других механизмов (таких, например, как сверхпластическое течение). Возможны также ротационные механизмы деформации, которые рассмотрены в

# Процессы деформации и разрушения металлических материалов

**Основные механические характеристики при статическом растяжении можно определять двумя основными способами.**

**Согласно первому, наиболее широко принятому в конструкторской и инженерной практике, определяются относительные величины:**

$$\sigma = P / A_0,$$

$$\varepsilon = (l_k - l_0) / l_0,$$

где  $l_k$  и  $l_0$  — конечная и исходная длина базы образца.

**По второму способу** напряжение и деформация определяются как:

$$\sigma_{\text{ист}} = P / A_i,$$

$$\varepsilon_{\text{ист}} = \ln(l_k / l_0),$$

где  $A_j$  - площадь поперечного сечения в данный момент времени.

Главной отличительной особенностью способа определения истинного напряжения и истинной деформации является признание взаимосвязи между длиной базы образца и изменениями его диаметра в процессе пластического деформирования.



# Диаграммы «напряжение – деформация»

Основные типы кривых статического растяжения

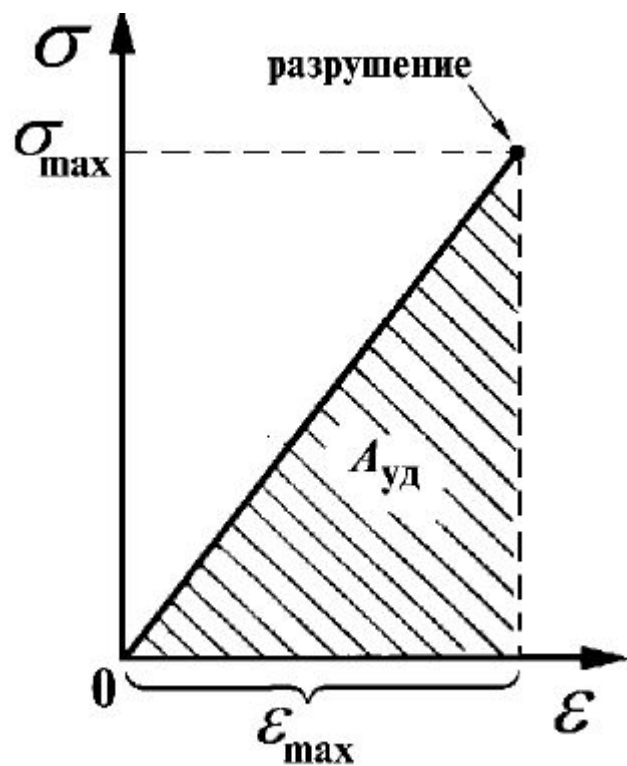
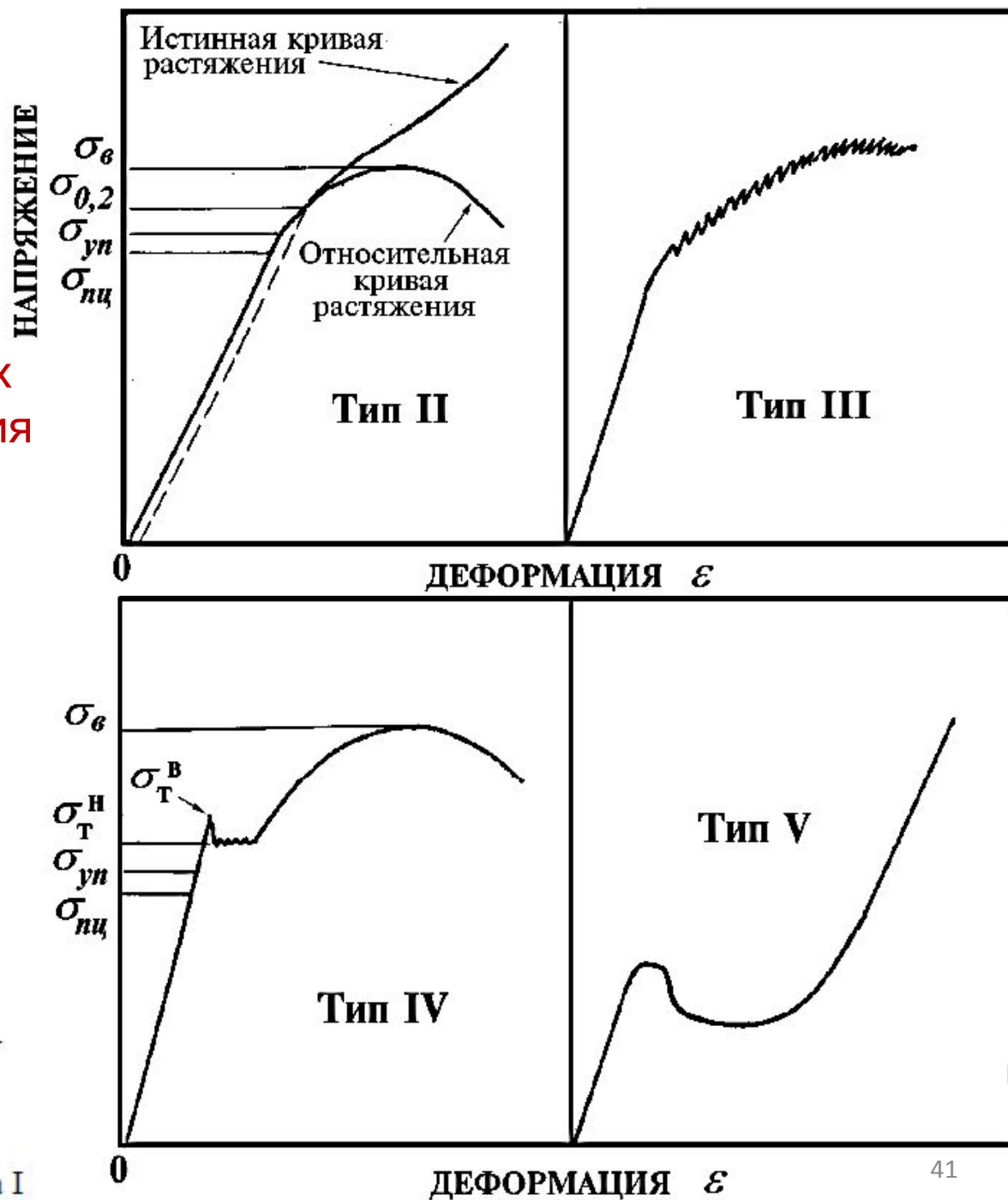


Рис. 2.1. Диаграмма растяжения типа I



# Основные типы кривых статического растяжения по классификации Р. В. Херцберга

**Тип I (упругое поведение).** Такое поведение материала характерно для керамических материалов, хрупких чугунов, некоторых металлических сплавов при низких температурах, стекла и др. Напряжение и деформация пропорциональны друг другу и такая диаграмма описывается законом Гука  $\sigma = E\varepsilon$  ( $\sigma$  - напряжение,  $\varepsilon$  - деформация.  $E$  - модуль Юнга или модуль упругости).

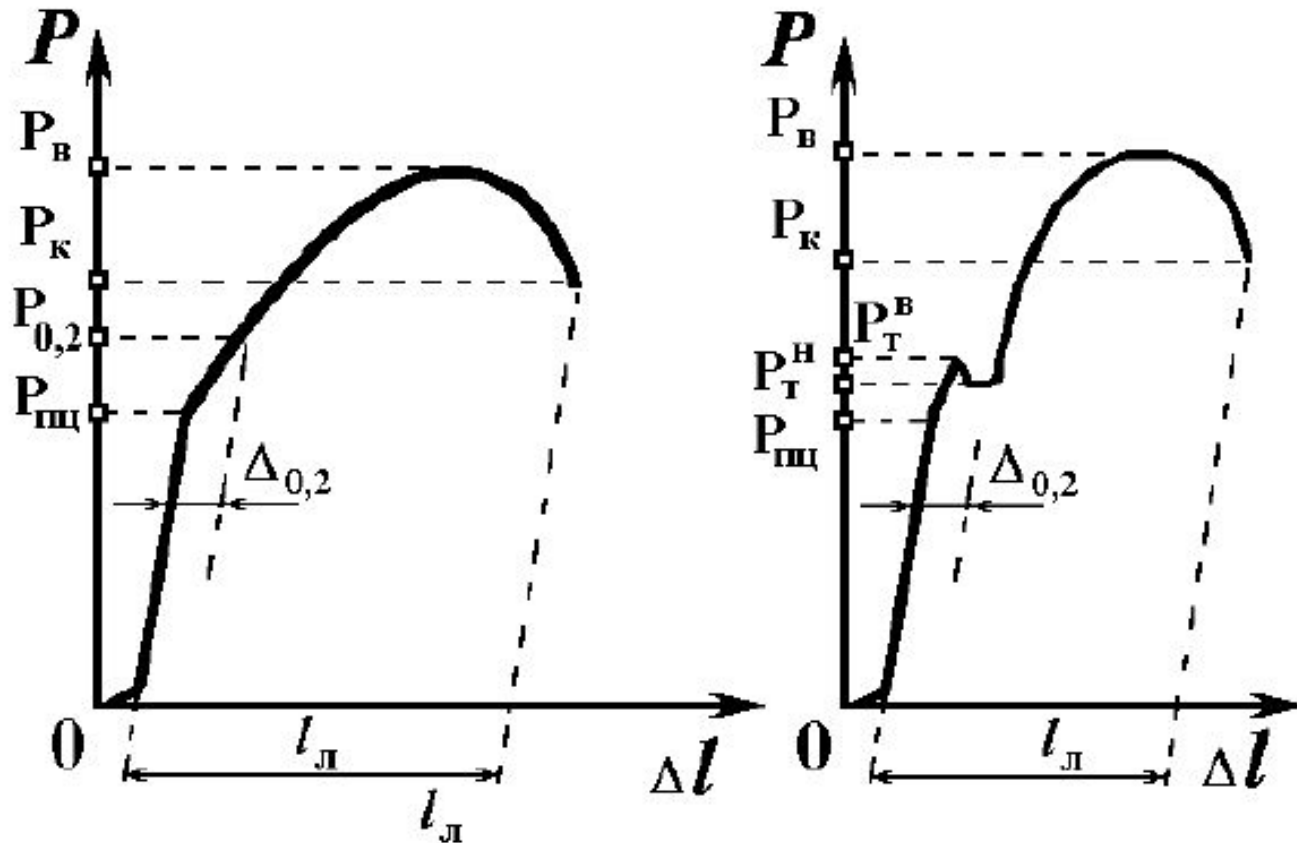
**Тип II (упругое гомогенно-пластическое поведение).** Возникает если материал способен к пластическому деформированию. На кривой растяжения после участка упругой деформации наблюдается деформационное упрочнение (до максимума нагрузки), когда мы имеем параболическое увеличение напряжения с ростом деформации. Эта зависимость описывается эмпирическим соотношением Холломоны:  $\sigma_{ист} = K \cdot \varepsilon_{ист}^n$  - где  $n$  - показатель деформационного упрочнения.  $K$  - коэффициент деформационного упрочнения.

**Тип III (упругое гетерогенно-пластическое поведение).** В ряде металлических материалов параболическая часть кривой деформации имеет характерные скачки, которые наблюдаются после упругой деформации или частичного прохождения стадии деформационного упрочнения.

**Тип IV (Упругое гетерогенно-пластическое - гомогенно-пластическое поведение).** Для большинства сплавов на основе железа с ОЦК-решеткой. а также для ряда других металлов и сплавов с другими типами решеток, после участка упругого деформирования при определенных условиях (температура, скорость деформирования и др.) наблюдается участок гетерогенной деформации - площадка текучести (в интервале степеней деформации 1-4%) при постоянной нагрузке (нижний предел текучести), а за ним участок гомогенного пластического течения материала.

**Тип V (Упругое гетерогенно-пластическое - гомогенно - пластическое поведение).** Кривая растяжения типа V характерна для кристаллических

# Типичные машинные диаграммы растяжения с примером графического определения механических характеристик



Основные величины, необходимые для определения механических свойств по диаграмме растяжения «нагрузка – абсолютное удлинение»:

$P$  – усилие (нагрузка), [Н],

$l_0$  – расчетная длина рабочей части образца, [мм],

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, [мм<sup>2</sup>],

$l_k$  – длина рабочей части образца после разрушения, [мм],

$F_k$  – конечная (минимальная) площади поперечного сечения рабочей части образца, [мм<sup>2</sup>],

$V_n$  – скорость нагружения образца, [мм/мин],

# Лекция № 7

# Характеристики прочности

Согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»:

□ **Предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$  [МПа]** - условное напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации увеличивается на 50% от своего значения на линейном (макроупругом) участке деформирования.

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}$$

□ **Предел упругости  $\sigma_{0,05}$  [МПа]** - условное напряжение, соответствующее появлению остаточной деформации, равной 0,05%. На диаграмме проводят прямую параллельную линейной части кривой растяжения и отстоящую от нее на расстояние, соответствующее деформации 0,05%.

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}$$

□ **Физический предел текучести  $\sigma_T$  [МПа]** - условное наименьшее напряжение, соответствующее нагрузке **R<sub>T</sub>** (площадка текучести), при которой деформация образца происходит без заметного увеличения растягивающей нагрузки. При наличии зуба текучести или неустойчивости течения на площадке текучести различают также **верхний предел текучести** и **нижний предел текучести** соответствующие нагрузкам **R<sub>Tn</sub>** и **R<sub>Tв</sub>**.

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$$

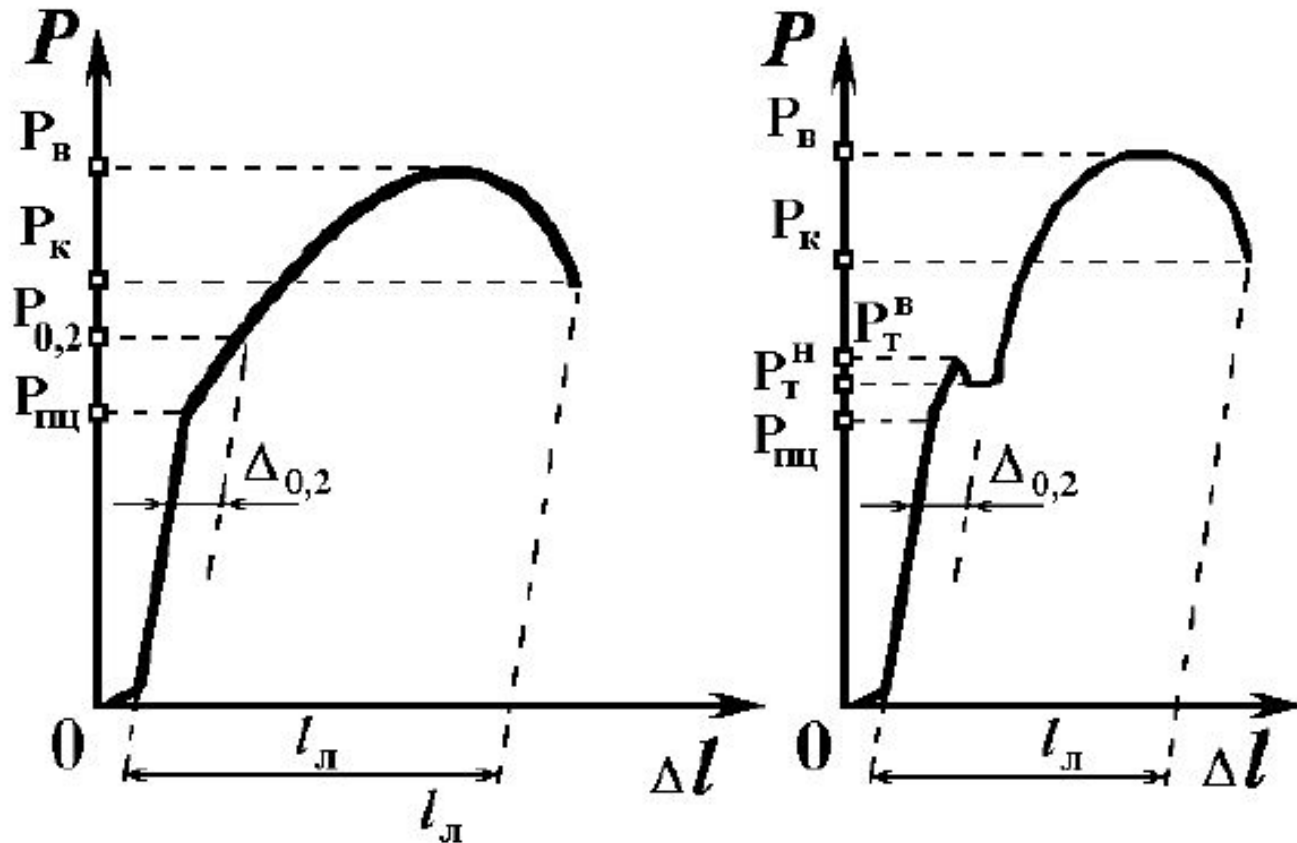
□ **Условный предел текучести [МПа]** - условное напряжение, при котором остаточное удлинение достигает значения 0,2 % от начальной расчетной длины образца.

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$$

□ **Предел прочности (временное сопротивление разрушению) [МПа]** - временное сопротивление является основным показателем прочности металла и представляет собой напряжение в образце, соответствующее наибольшей нагрузке (R<sub>B</sub> или R<sub>Ta</sub>\*)- предшествующей разрушению образца.

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}$$

# Типичные машинные диаграммы растяжения с примером графического определения механических характеристик



# Характеристики пластичности

- **Относительное удлинение образца после разрыва  $\delta$  [%]** - это отношение абсолютного удлинения рабочей части образца ( $l_k - l_0$ ) после разрушения к начальной расчетной длине  $l_0$ .

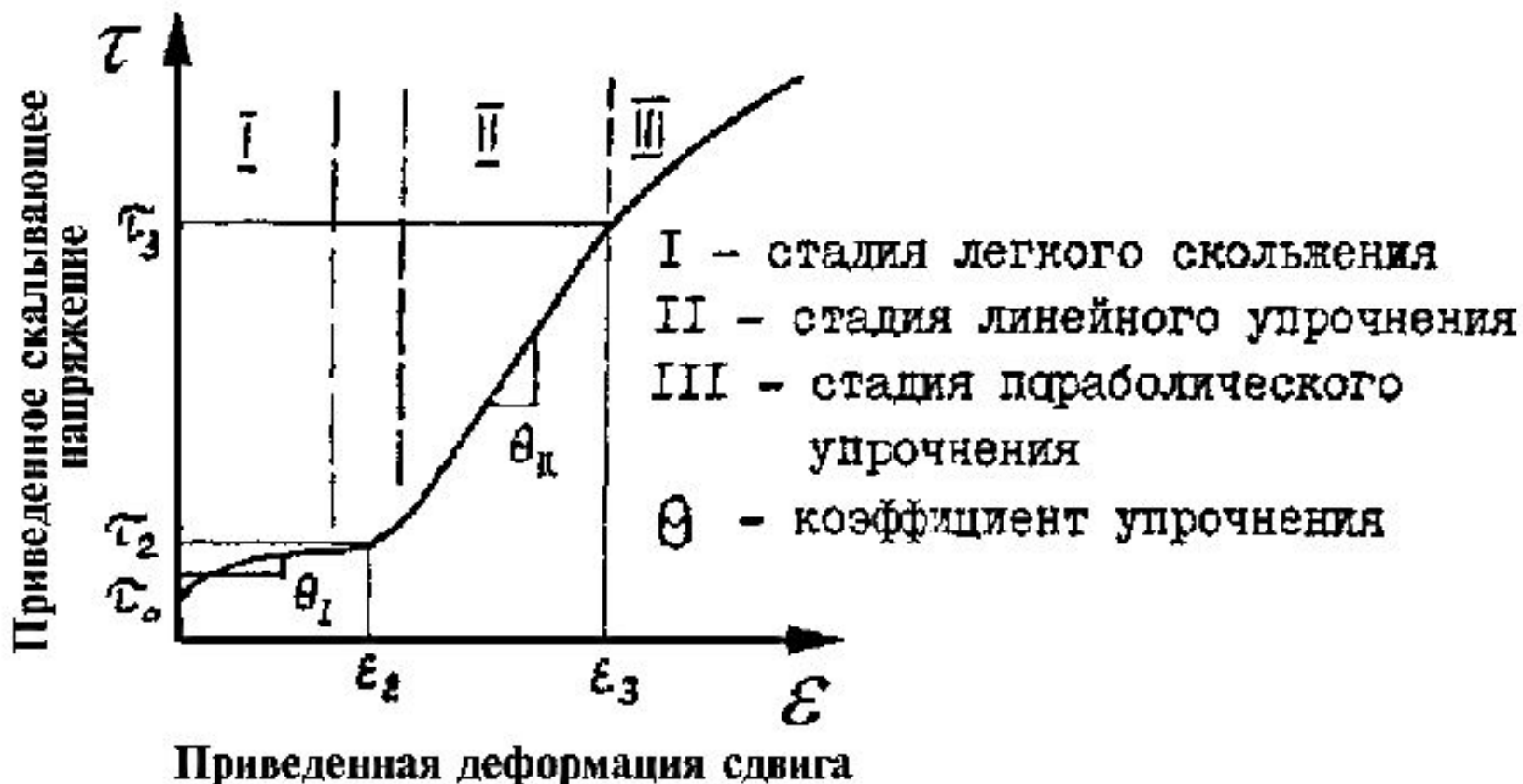
$$\delta = \frac{(l_k - l_0)}{l_0} \cdot 100\%$$

- **Относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва  $\psi$ , [%]** - это отношение абсолютного уменьшения площади поперечного сечения рабочей части образца после разрыва к первоначальной площади поперечного сечения, выраженное в процентах.

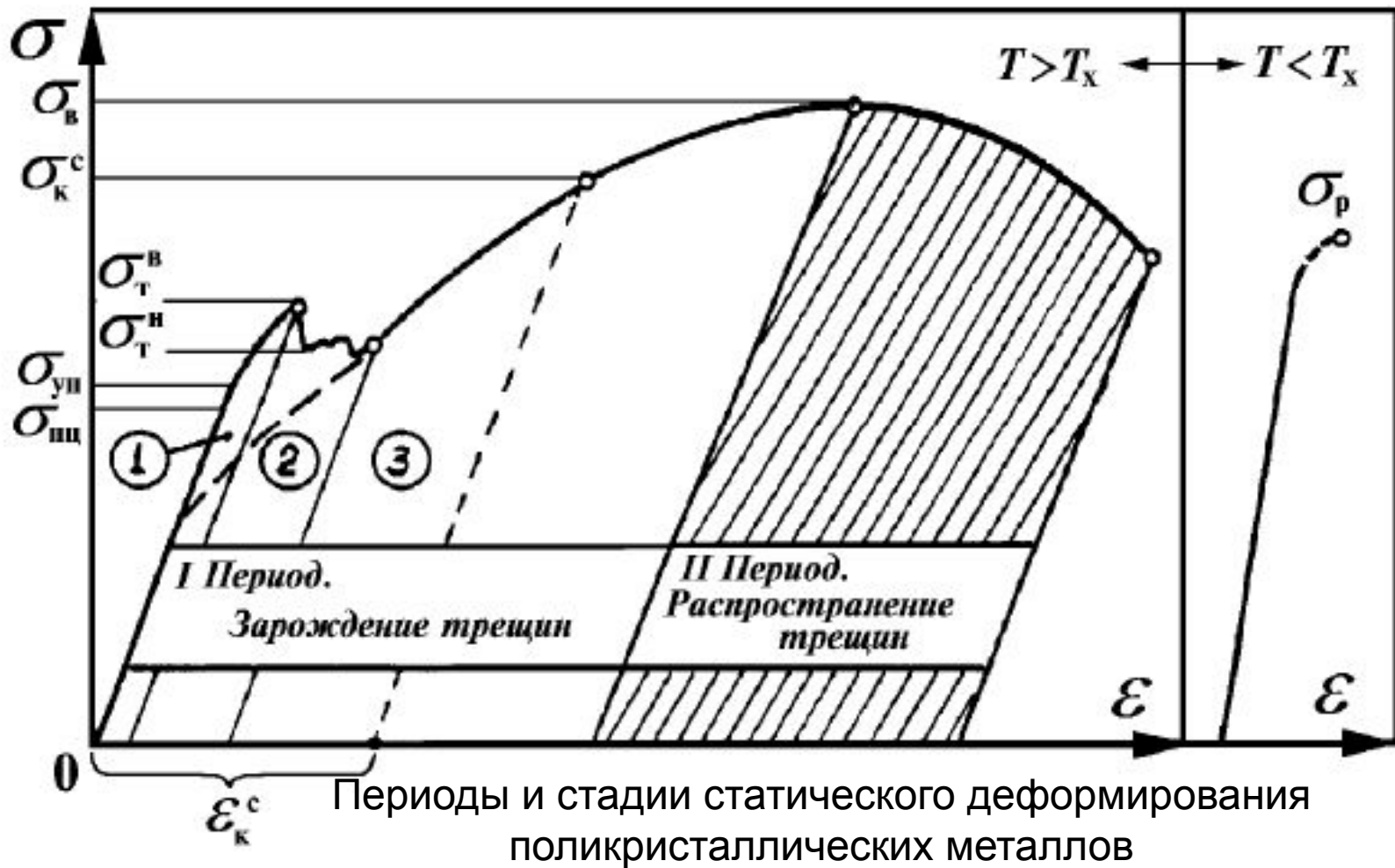
$$\psi = \frac{(F_0 - F_k)}{F_0} \cdot 100\%$$



## Основные стадии деформации и разрушения при статическом растяжении

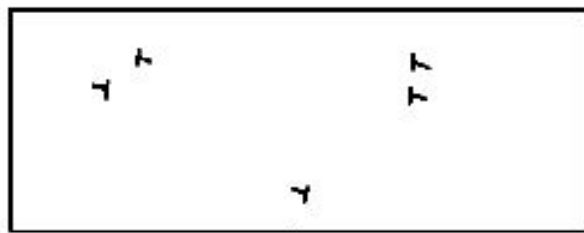


Типичная кривая напряжение—деформация для монокристалла с ГЦК-решеткой:  $\tau_0$ ,  $\tau_T$  и  $\tau_3$  — напряжения, соответствующие началу стадий I, II и III

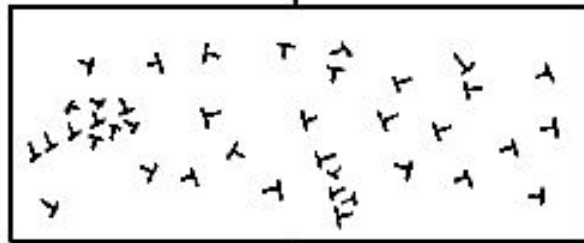
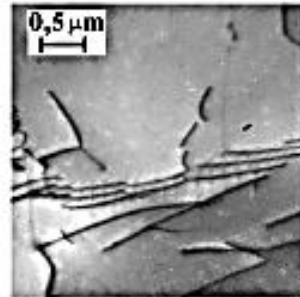


- Первая стадия - **стадия микротекучести.**
- Вторая стадия - **стадия текучести**, на которой наблюдается неомогенная деформация в виде прохождения по всей рабочей длине образца фронта Людерса – Чернова.
- Третья стадия - **стадия деформационного упрочнения.**

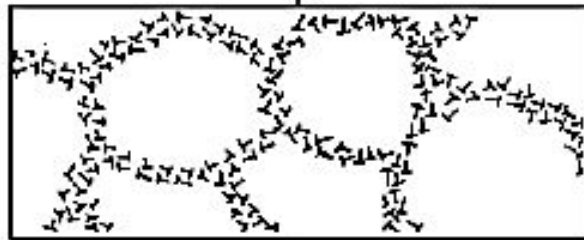
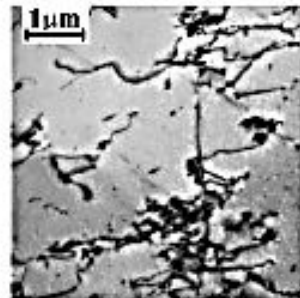
# Схема эволюции дислокационной структуры металлического материала в процессе деформации:



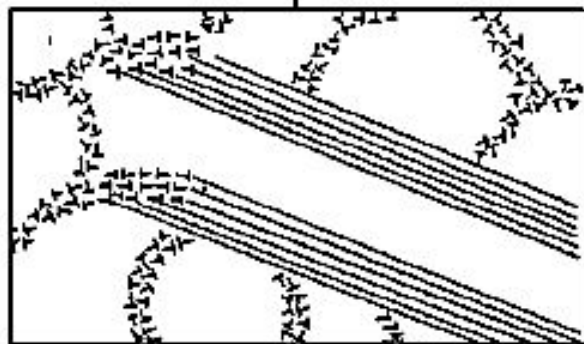
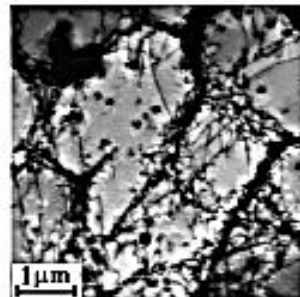
а)



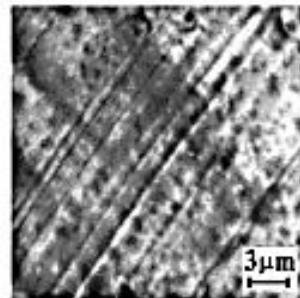
б)



в)



г)



а) стадия микротекучести,  
б) стадия текучести.  
в) стадия деформационного упрочнения (ячеистая дислокационная структура).  
г) конец стадии деформационного упрочнения - начало стадии шейкообразования (формирование устойчивых полос скольжения).

Слева показаны схемы, справа приведены микрофотографии соответствующих дислокационных структур

# Дислокационная сетка Франка

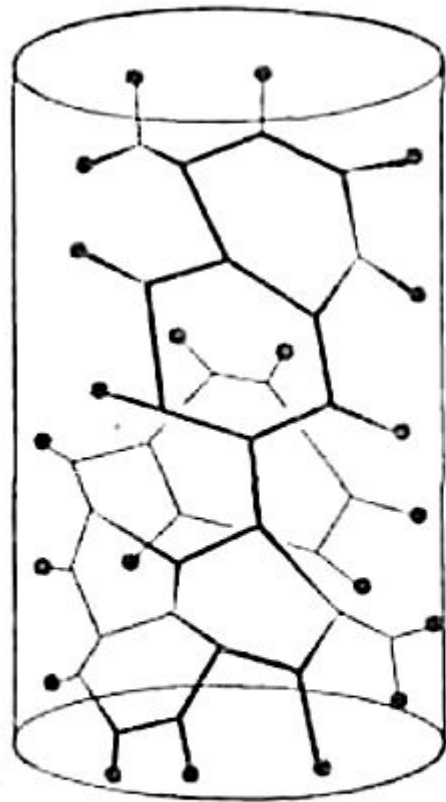


Рис. 105. Пространственная сетка дислокаций в огоженном кристалле

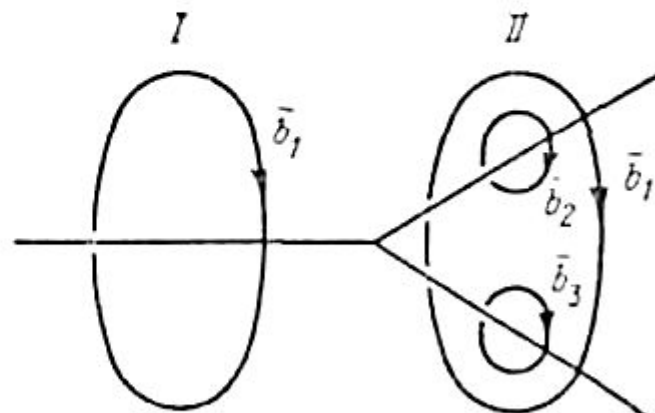
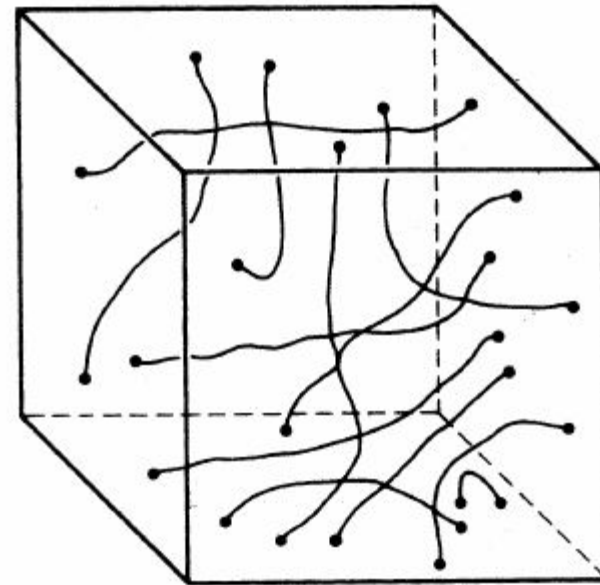
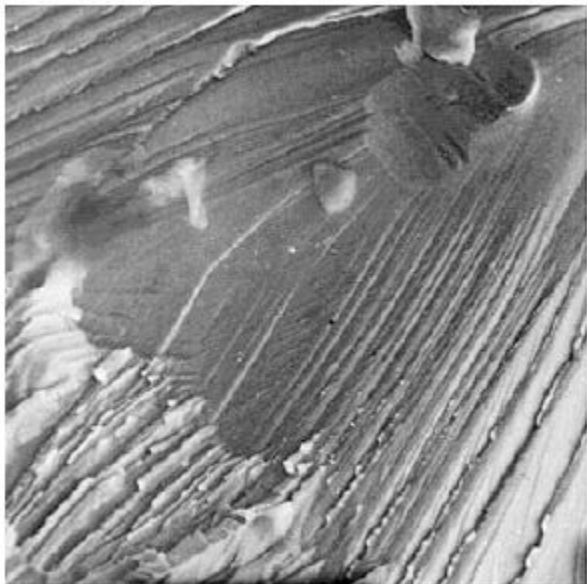
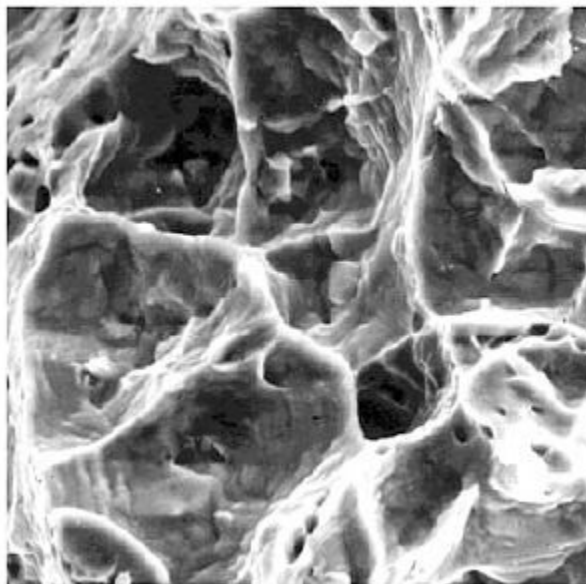


Рис. 106. Три дислокации, сходящиеся в одном узле ( $\bar{b}_1 = \bar{b}_2 + \bar{b}_3$ )

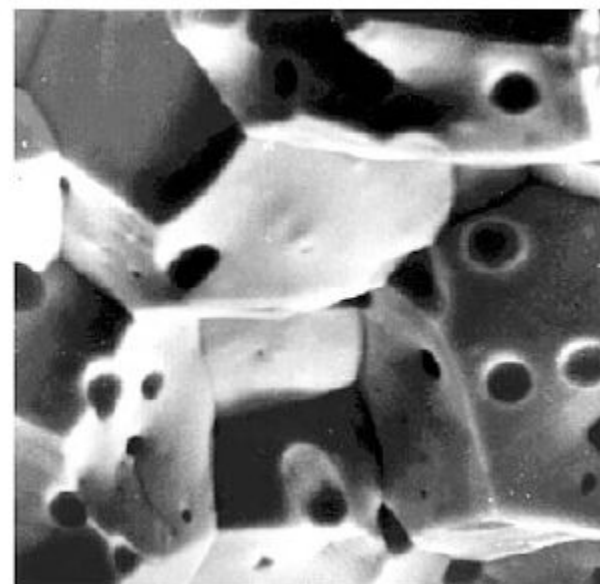
## Вид поверхностей разрушения металлических материалов по механизмам (увеличение $\times 1000$ )



а) скол



б) порообразование



в) смешанный –  
межзеренное  
порообразование +  
межзеренное  
хрупкое разрушение

Диаграммы, иллюстрирующие изменение предела текучести в зависимости от:

а) температуры  $T$

б) скорости деформации  $\dot{\epsilon}$

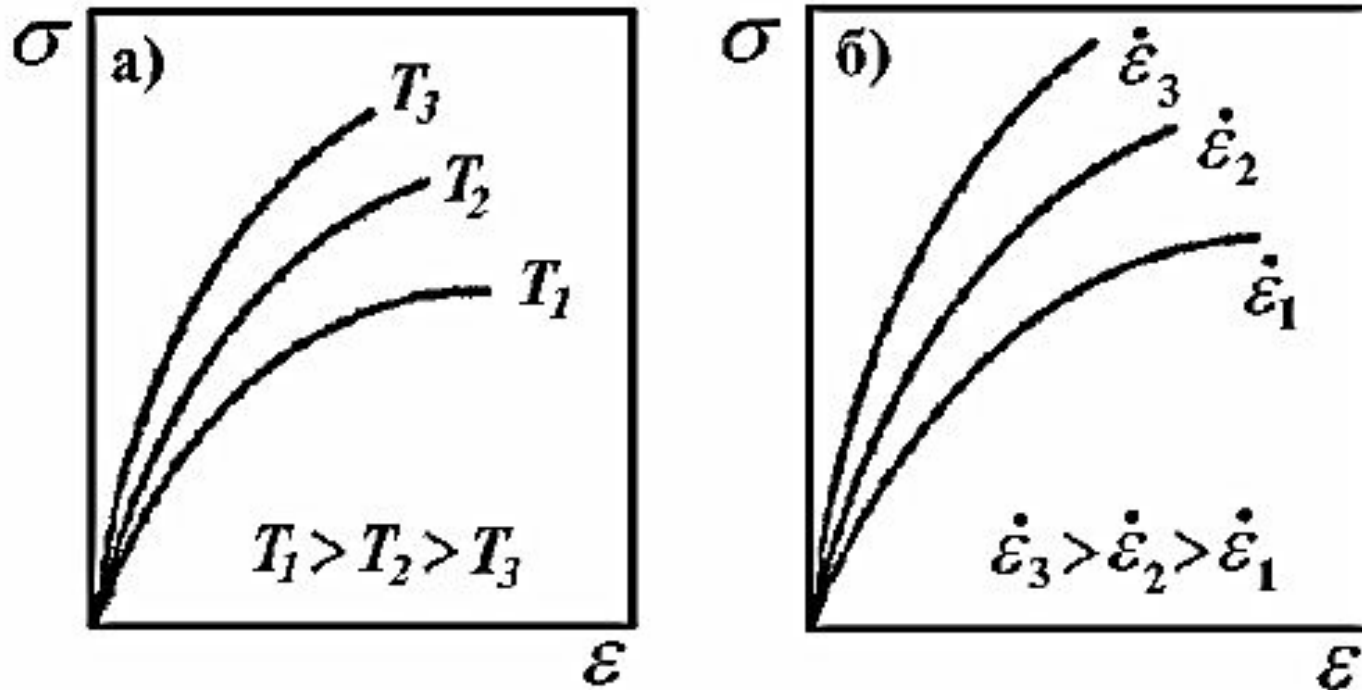


Рис. 2.13. Диаграммы, иллюстрирующие изменение предела текучести в зависимости от:  
а) температуры  $T$ ; б) скорости деформации  $\dot{\epsilon}$

# Механизмы зарождения трещины

Зарождение микротрещин является коллективным эффектом в дислокационных структурах некоторых типов, их перестройкой с превращением запасенной в них энергии в поверхностную энергию микротрещин.

## Модели зарождения микротрещин



а – накопление дислокаций в полосе скольжения; б – пересечение полос скольжения; в – разрыв малоугловой границы

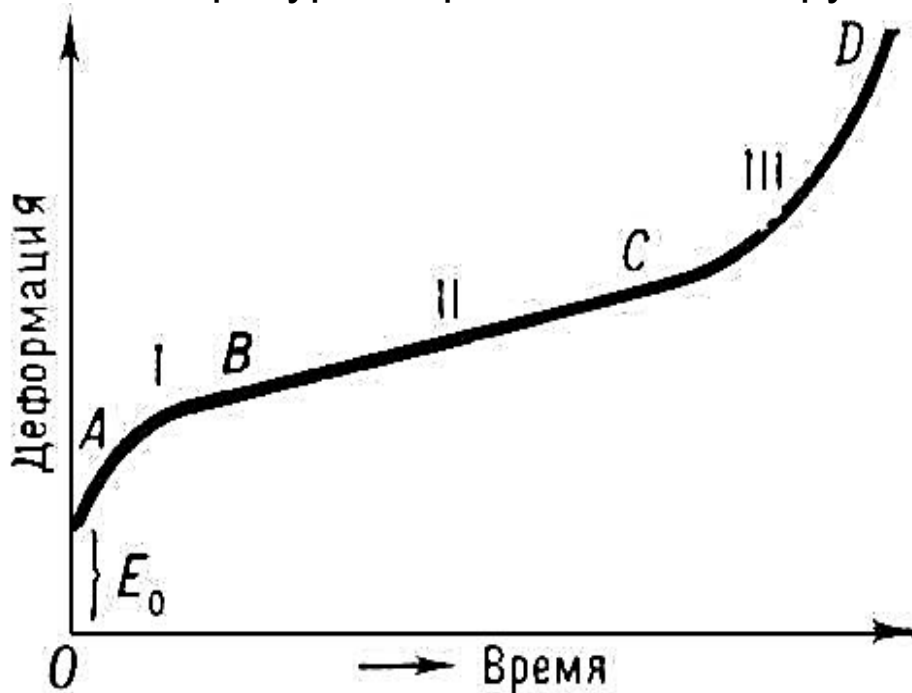
# Ползучесть

Явление непрерывной деформации под действием постоянного напряжения называется **ползучестью**.

Различают три основных вида ползучести:

- низкотемпературную  $T < 0,5 \cdot T_{\text{плав}}$ ,
- высокотемпературную  $T > 0,5 \cdot T_{\text{плав}}$ ,
- диффузионную: зернограничную ( $T \gg 0,5 \cdot T_{\text{плав}}$ ) и внутризеренную ( $T > 0,7 \cdot T_{\text{плав}}$ ).

Ползучесть описывается так называемой **кривой ползучести**, которая представляет собой зависимость деформации от времени при постоянных температуре и приложенной нагрузке (или напряжении).



AB - участок неустановившейся (или затухающей) ползучести (**стадия I**),

BC - участок установившейся ползучести - деформации, идущей с постоянной скоростью (**стадия II**),

CD - участок ускоренной ползучести (**стадия III**),

$E_0$  - деформация в момент приложения нагрузки,

точка D - момент разрушения.



# Лекция 10

## Усталостное разрушение

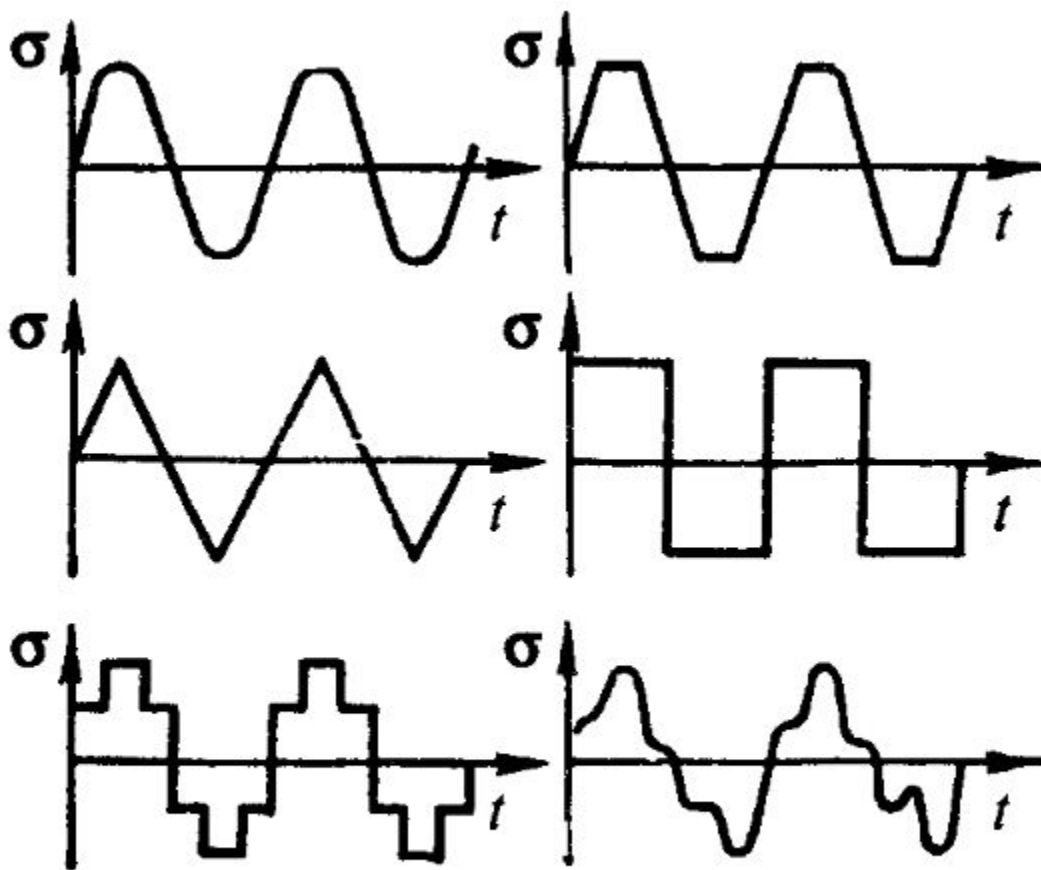


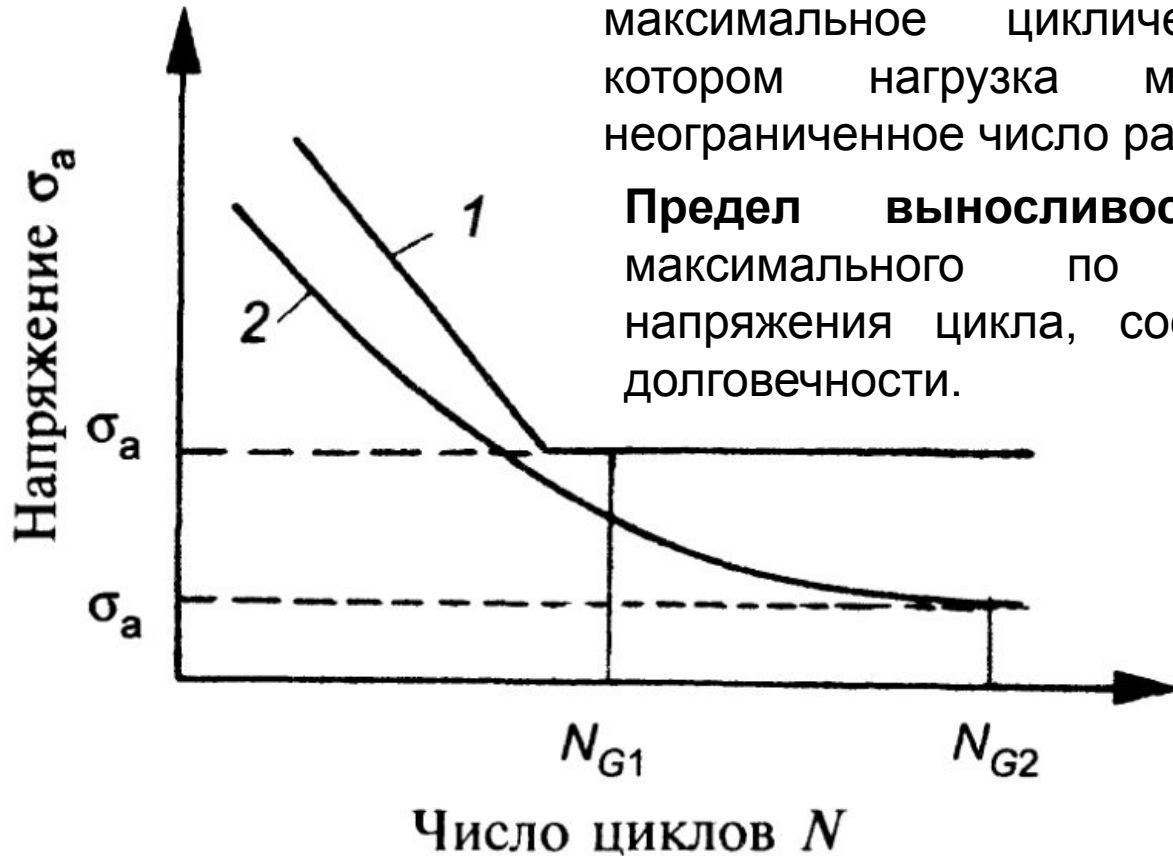
Рис 1.2. Различные формы циклов напряжений

При испытаниях на усталость, а также во время эксплуатации могут применяться два существенно различающихся вида нагружения: с заданным размахом нагрузки — **мягкое нагружение**, с заданным размахом деформации — **жесткое нагружение**.

**Кривая Велера (кривая усталости)** – зависимость амплитуд напряжения  $\sigma_a$  от числа циклов нагружения  $N$  до разрушения.

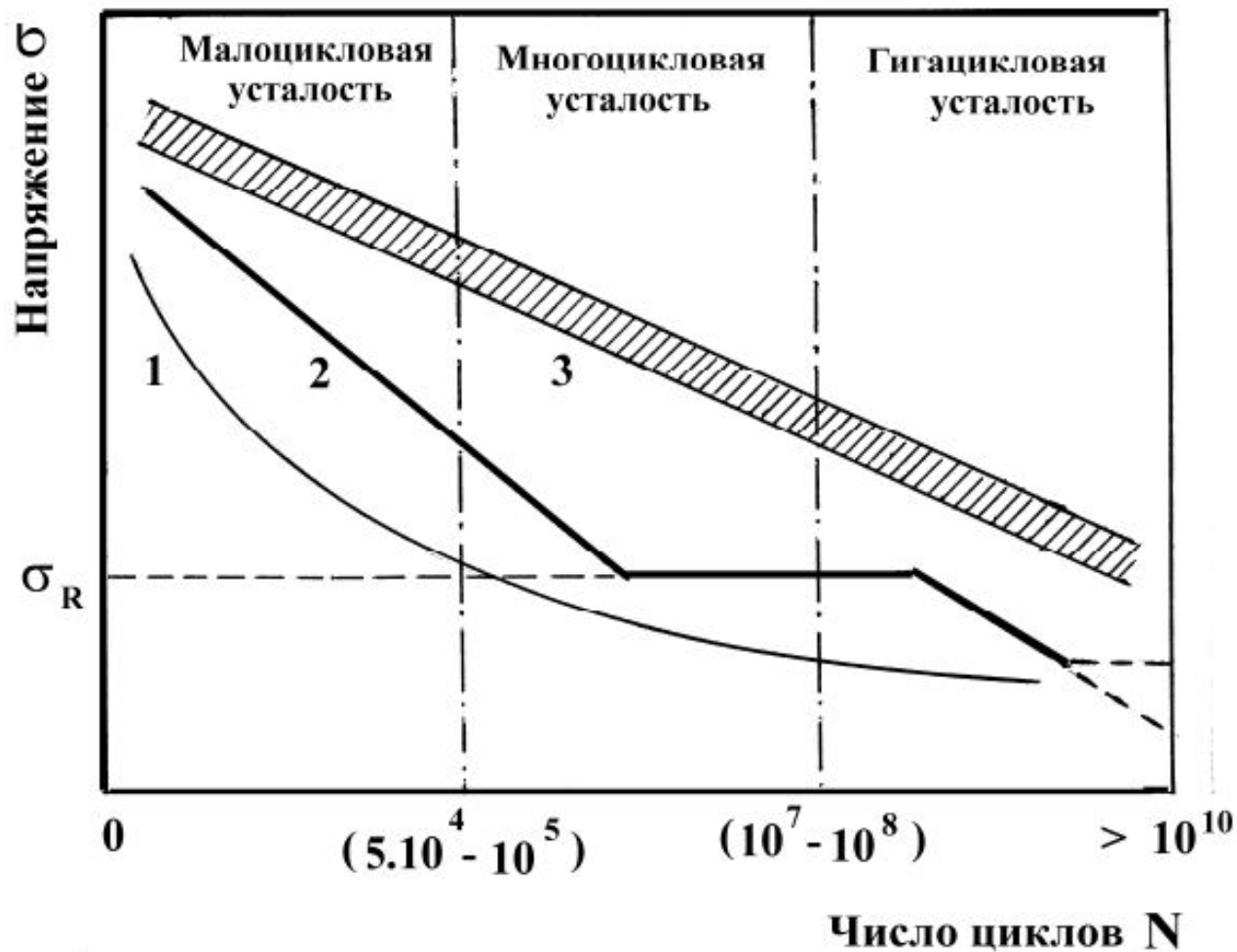
**Физический предел выносливости** — максимальное циклическое напряжение, при котором нагрузка может быть приложена неограниченное число раз, не вызывая разрушения.

**Предел выносливости  $\sigma_R$**  — значение максимального по абсолютной величине напряжения цикла, соответствующее задаваемой долговечности.



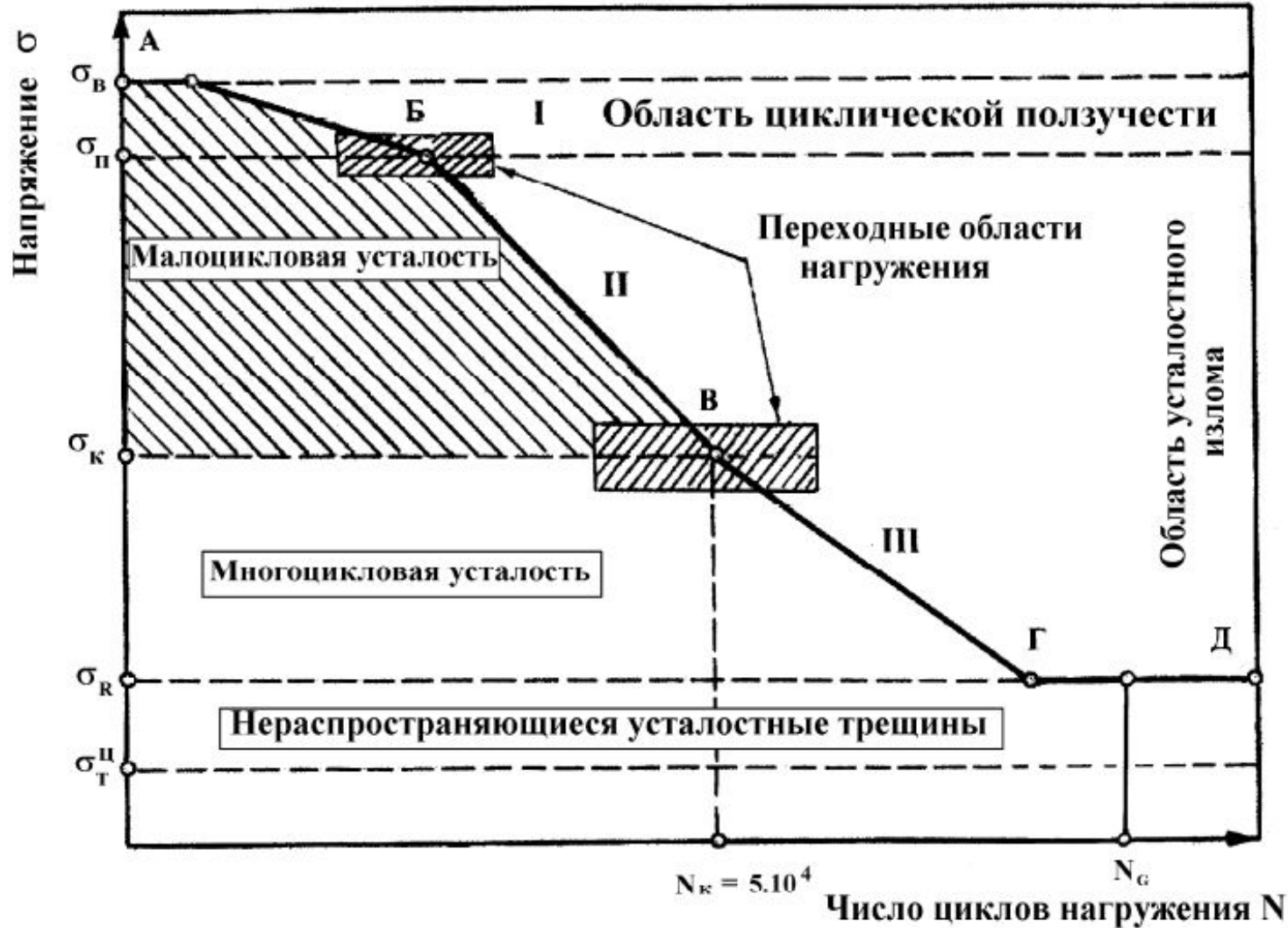
1 – материал с физическим пределом выносливости,  
2 – материал без физического предела выносливости;  $N_{G1}$ ,  $N_{G2}$  — базовые числа циклов нагружения

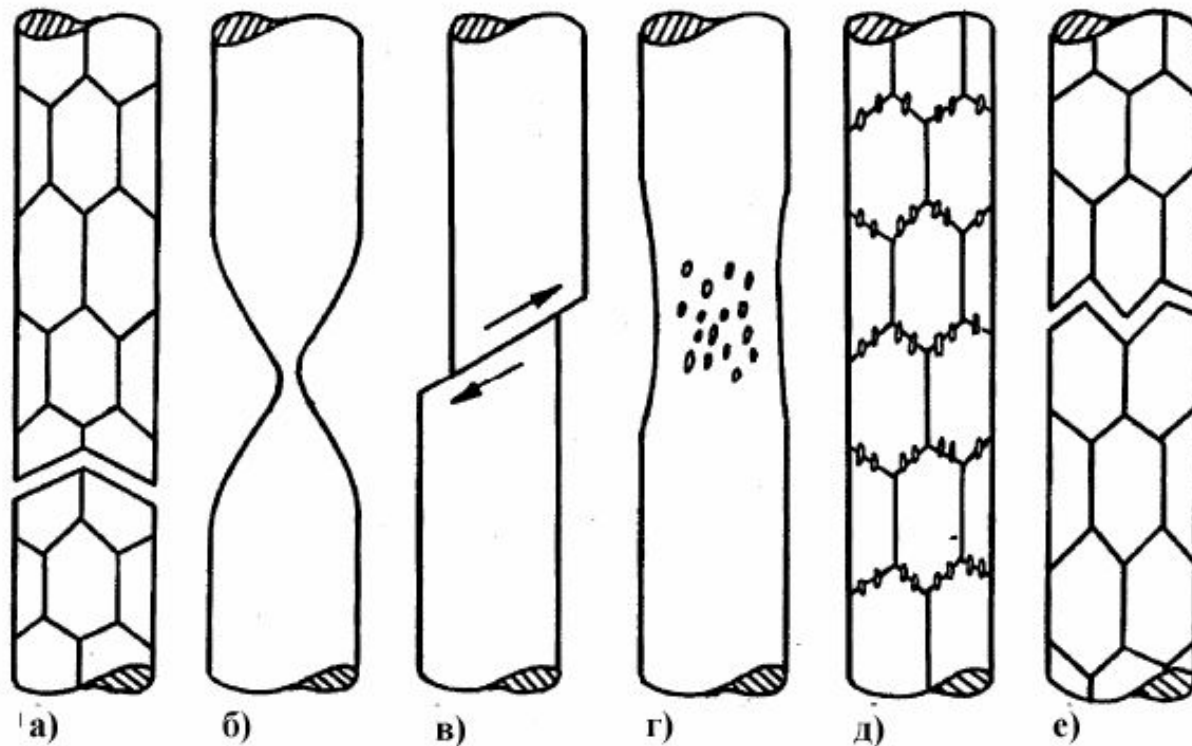
# Виды кривых усталости и основные области усталостного разрушения металлических материалов (схема)



# Полная кривая усталости

Цель большинства усталостных испытаний – определение долговечности при напряжениях меньших статического предела текучести.





**Схемы основных механизмов разрушения (1 – 6) и фрактографическая картина**

**некоторых видов поверхностей разрушения (а – г):**

1 – скол; 2 – отрыв; 3 – сдвиг; 4 – порообразование; 5 – межзеренное порообразование; 6 – межзеренное хрупкое разрушение;

а) скол; б) отрыв; в) скол и межзеренное разрушение; г) межзеренное разрушение пористого материала