

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Автономное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля

# *СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ*

Гормаков А.Н., доц. каф. ТПС  
ИНК НИ ТПУ, 2017 г.

Металлы являются телами кристаллическими.

Кристаллическое состояние характеризуется закономерным (упорядоченным)

расположением атомов в пространстве. Рассмотрим элементарную ячейку кристаллической решетки.

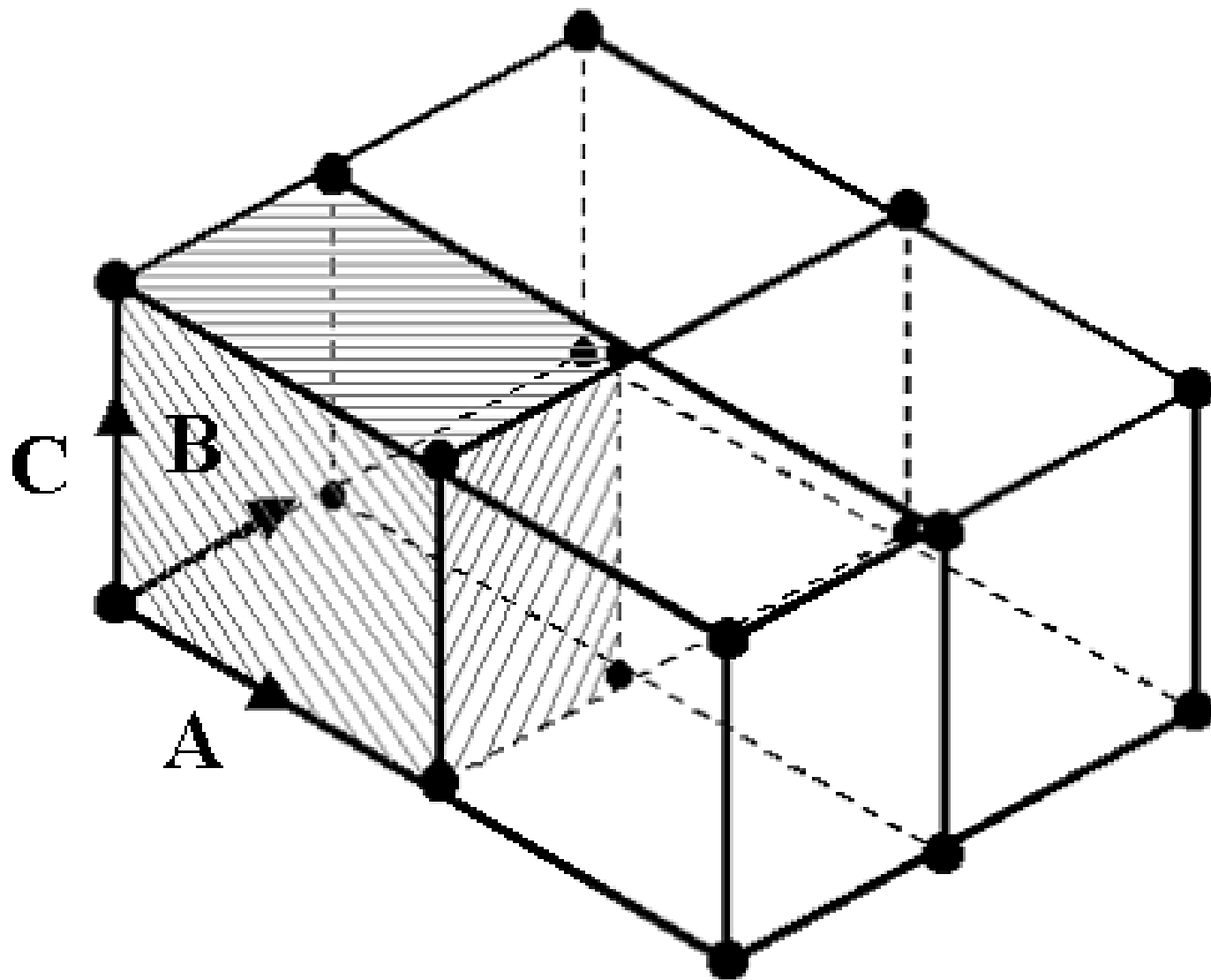


Схема кристаллической решетки

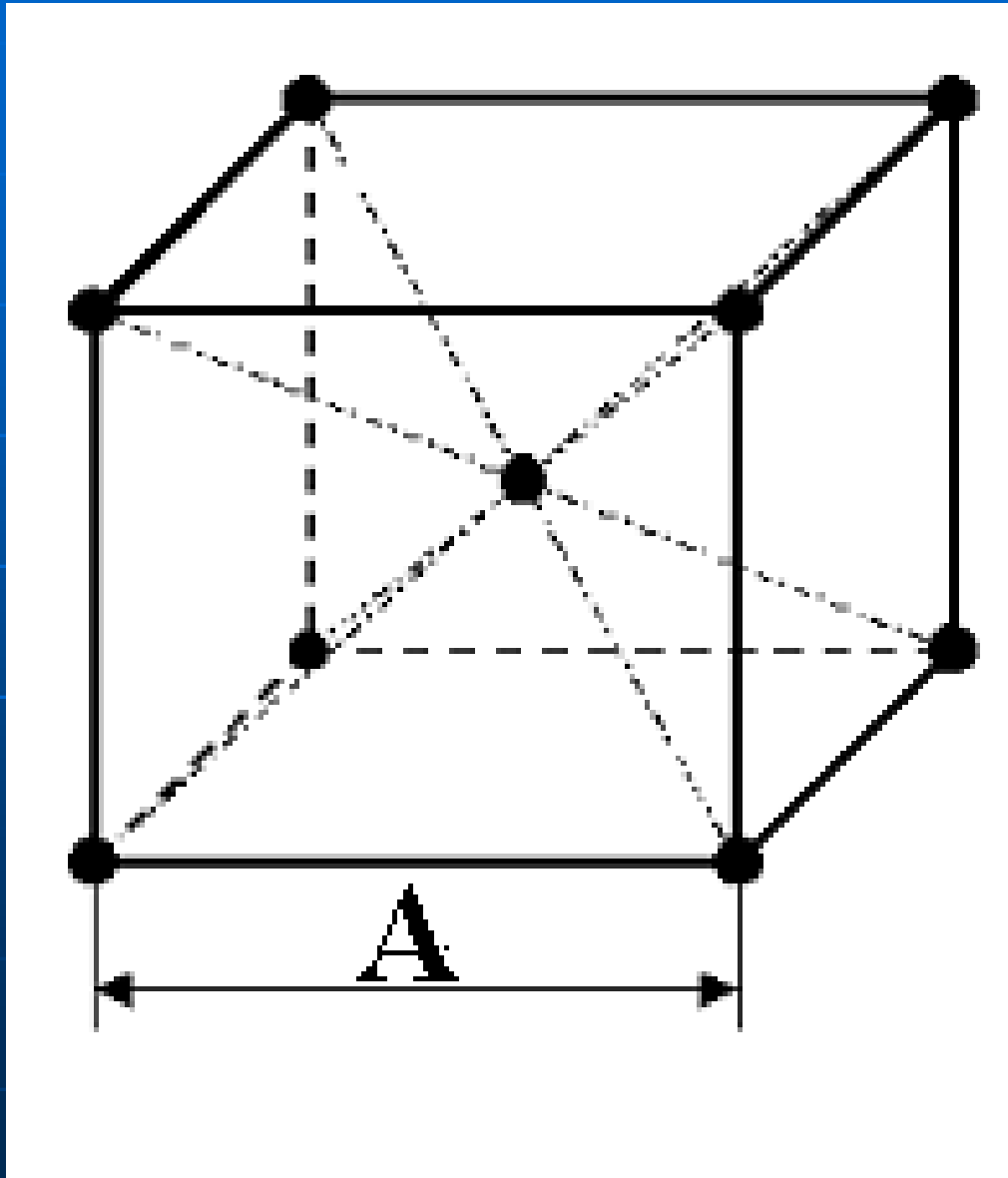
A, B, C – периоды кристаллической решетки

Элементарная ячейка показана  
штриховкой. Расстояние между  
узлами  $0,1 \dots 0,7$  нм.

Частота колебаний ионов  
атомов в узлах

кристаллической решетки –  
 $10^{13}$  Гц.

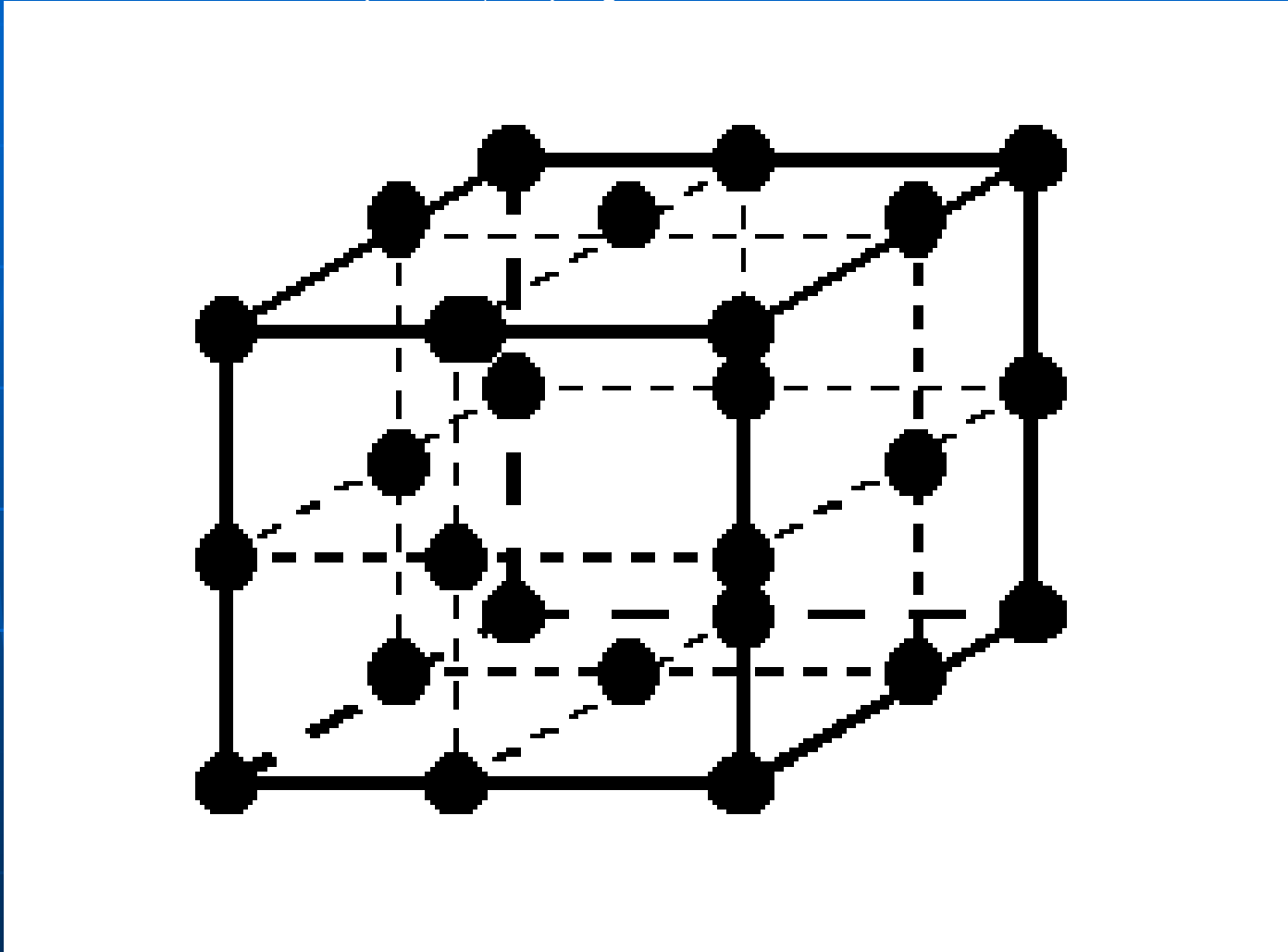
# Элементарные кристаллические решетки материалов



Объемно –  
центрированная  
кубическая  
(ОЦК) решетка.

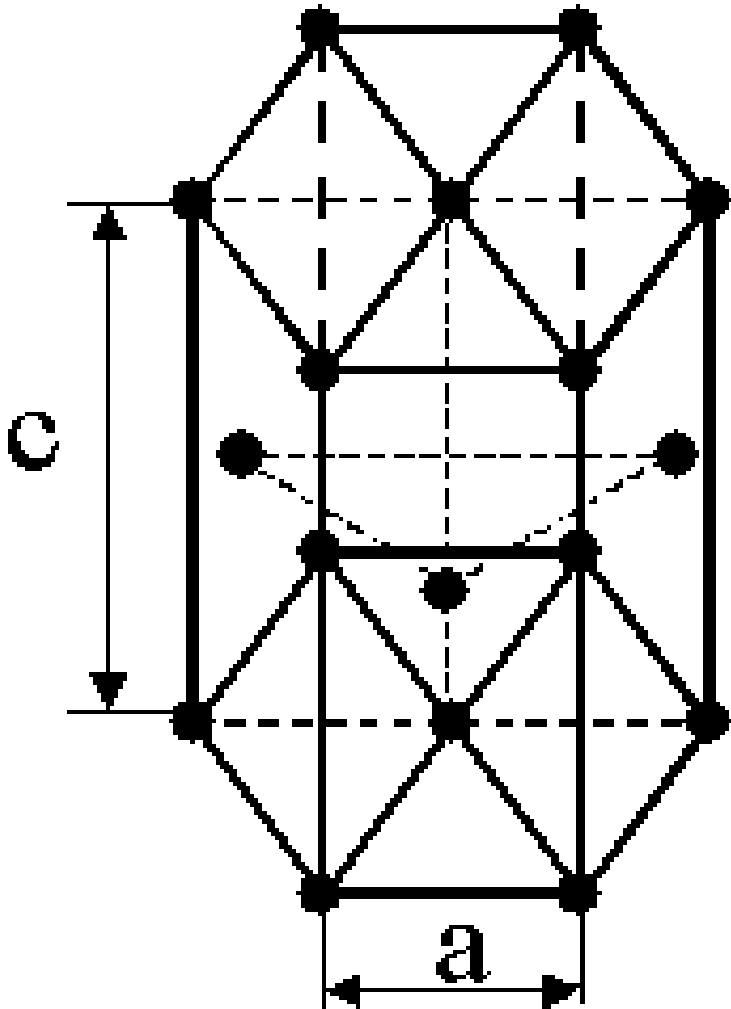
К, Na, Li,  
Ta, W, V, Cr,  
Nb, Ba, Fe $\alpha$  и  
другие.

# Гранецентрированная кубическая (ГЦК) решетка



Rb, Ce, Fe $\gamma$ , Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Cu, Ir и др

# Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) решетка



Такая  
ячейка  
характерна  
для Mg, Cd,  
Re, Os, Ru,  
Zn, Be и др.

# Энергия взаимодействия соседних атомов

В твердом состоянии металл представляет собой постройку, состоящую из положительно заряженных ионов, омываемых “газом” из свободных коллективизированных электронов.

Между ионами и коллективизированными электронами проводимости возникают электростатические напряжения, которые стягивают ионы.



Такая связь называется  
металлической.

Атомы (ионы) располагаются  
в кристаллической решетке на  
таком расстоянии  $a_0$  друг от  
друга, при котором энергия  
взаимодействия минимальна.

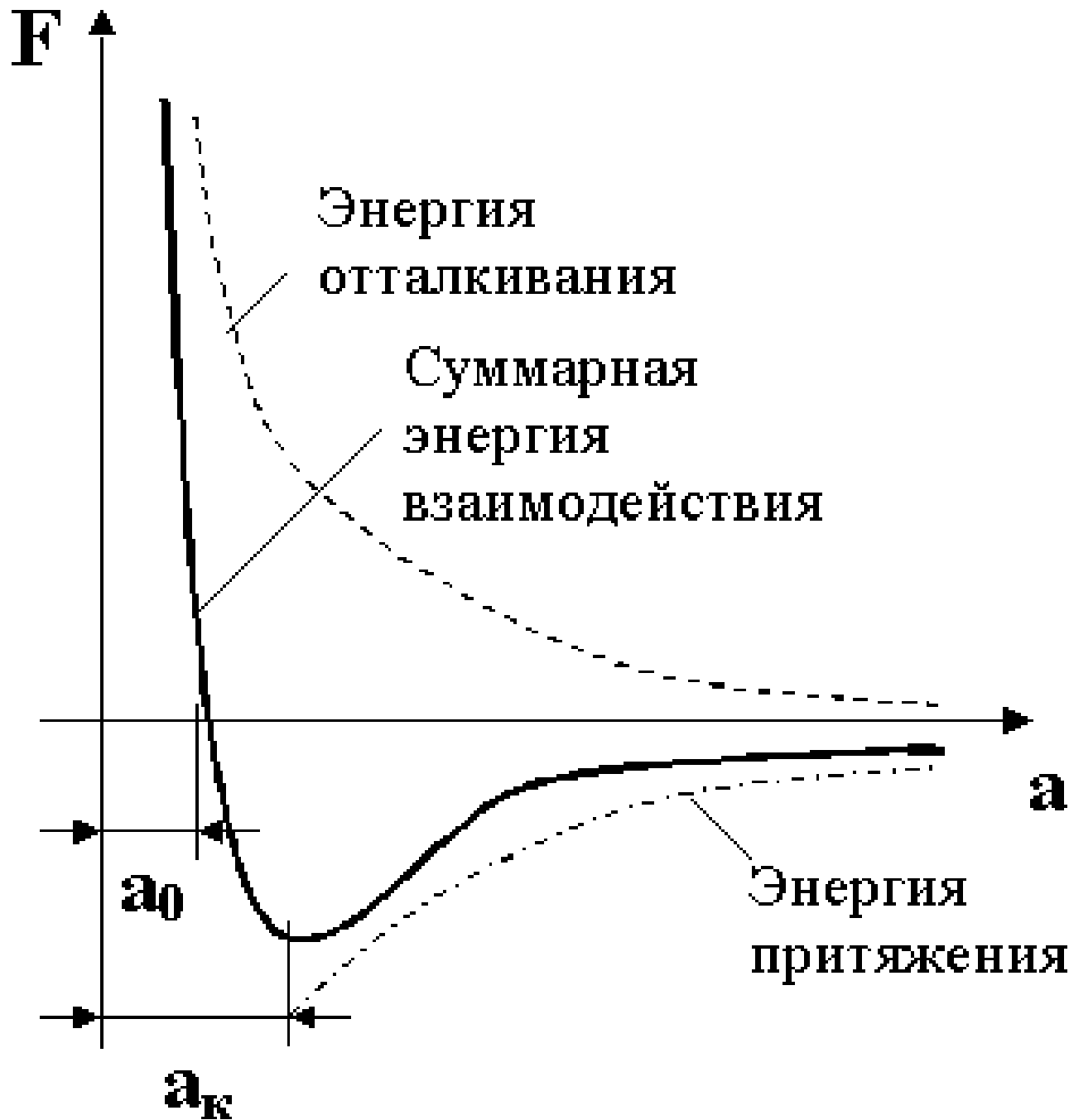


Схема  
энергии  
взаимодейств  
ия двух  
атомов в  
зависимости  
от  
межатомного  
расстояния

Сближение атомов (ионов) на расстояние, меньшее  $a_0$ , или удаление их на расстояние, большее  $a_0$ , осуществимо лишь при совершении определенной работы против сил отталкивания и притяжения.

При  $a = a_k$  сила притяжения между атомами максимальна ( $a_k$  — критическое расстояние, после увеличения которого, происходит разрушение решетки)

# Дефекты кристаллической решетки металлов

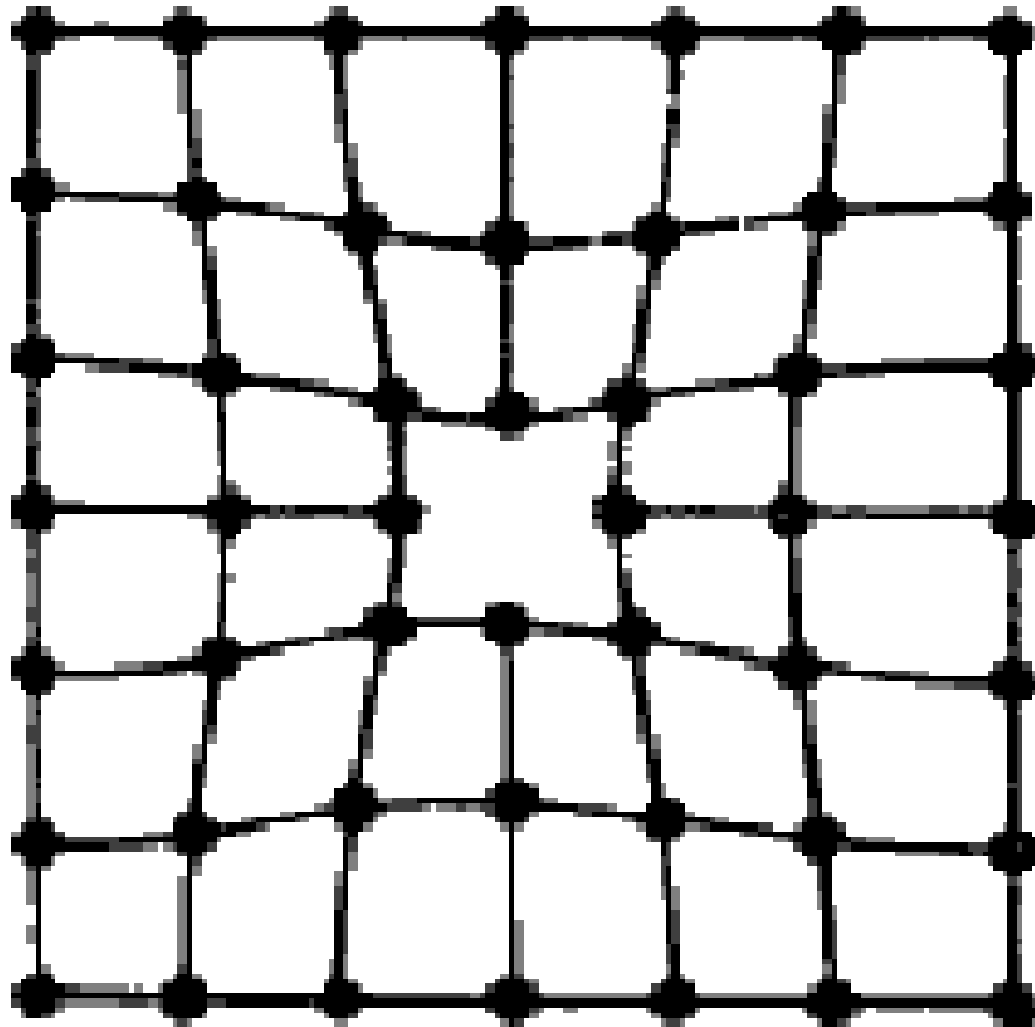
В любом реальном кристалле всегда имеются дефекты строения. Дефекты кристаллического строения подразделяют на точечные, линейные (одномерные) и поверхностные (двухмерные).

## *Точечные дефекты*

Эти дефекты малы во всех трех измерениях и их размеры не превышают нескольких атомных диаметров.

К точечным дефектам относятся:

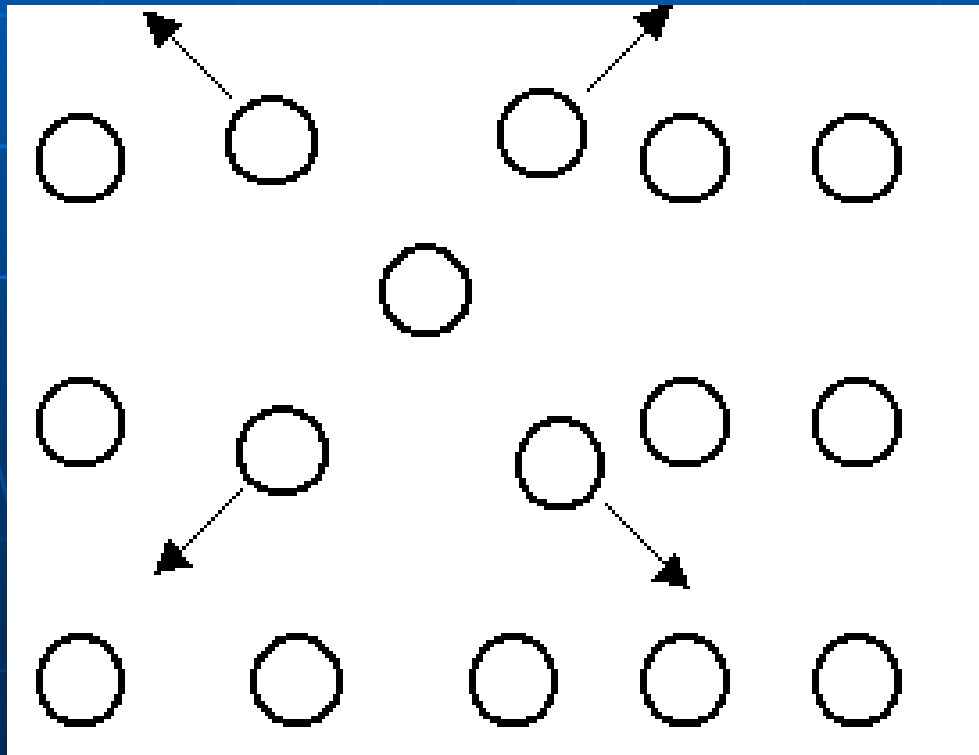
- *вакансии* (дефекты Шотки), т.е. узлы решетки, в которых атомы отсутствуют;

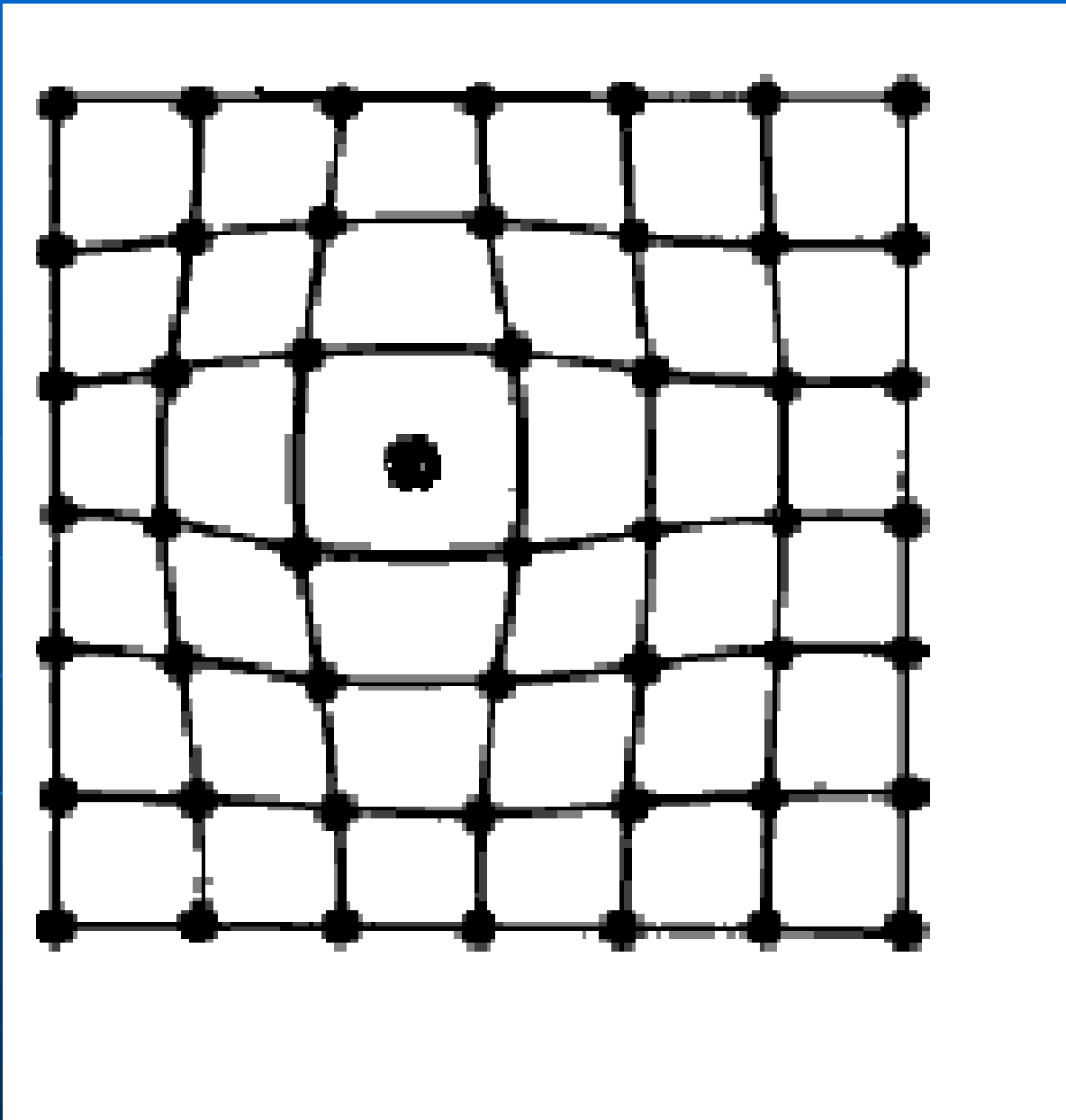


вакансия

## *межузельные атомы*

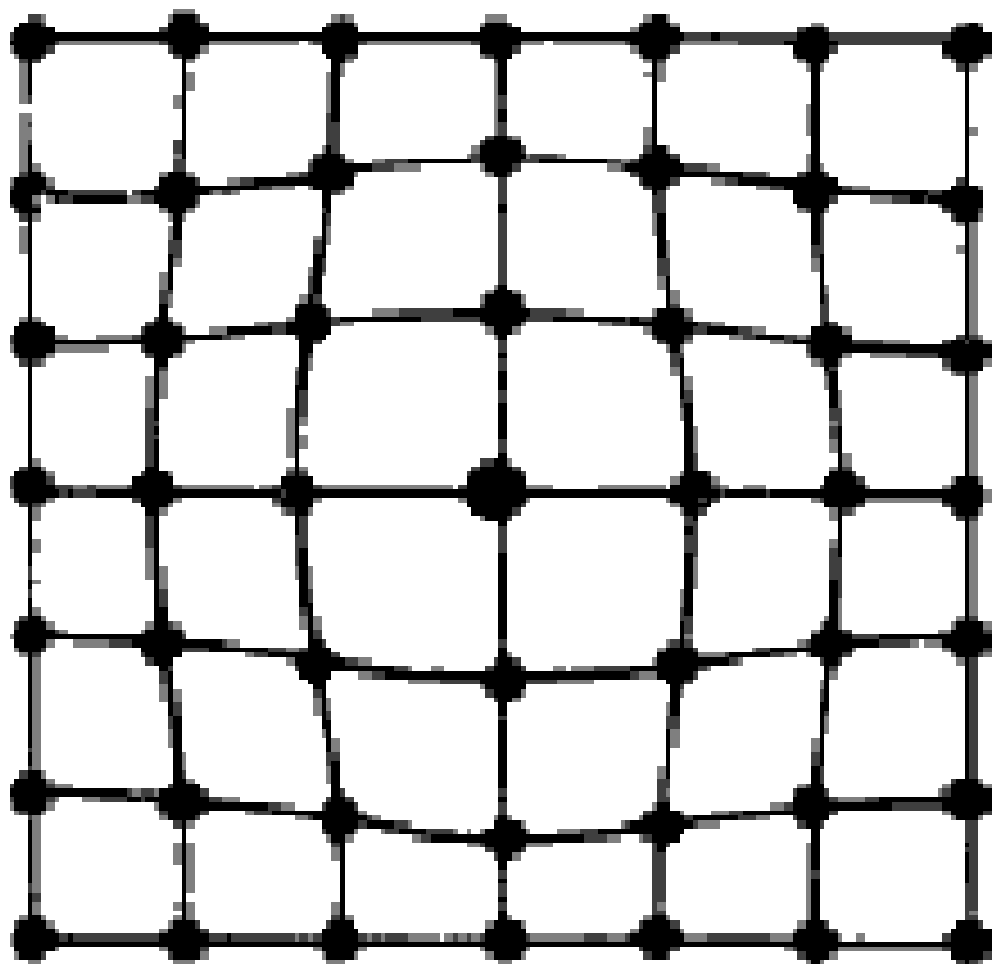
(дефекты Френкеля образующиеся в результате перехода атома из узла решетки в междуузлие).





межузельный атом





Атом внедрения

К линейным дефектам кристаллического строения металлов относятся дислокации — особый вид несовершенства кристаллической решетки, который образуется в результате локальных необратимых смещений отдельных участков кристалла.

**Краевая дислокация** представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней “лишней” атомной полуплоскости (нижний край лишней полуплоскости АВ), внедрившейся в верхнюю часть кристаллической решетки. Здесь решетка упруго деформирована. В верхней части она шире, чем в нижней, что вызывает соответствующее искажение расстояния между атомами

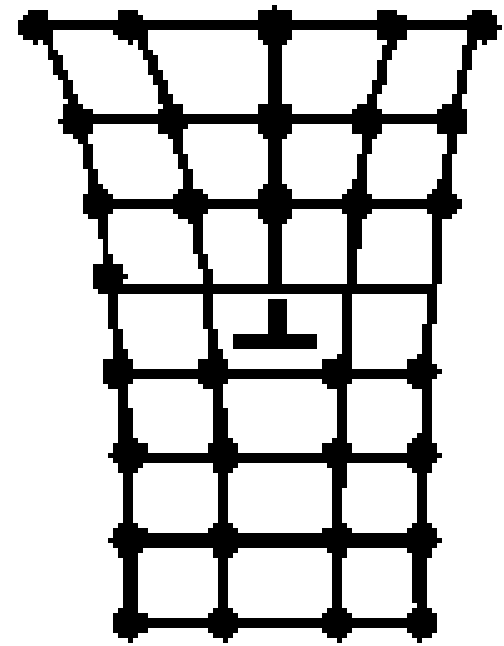
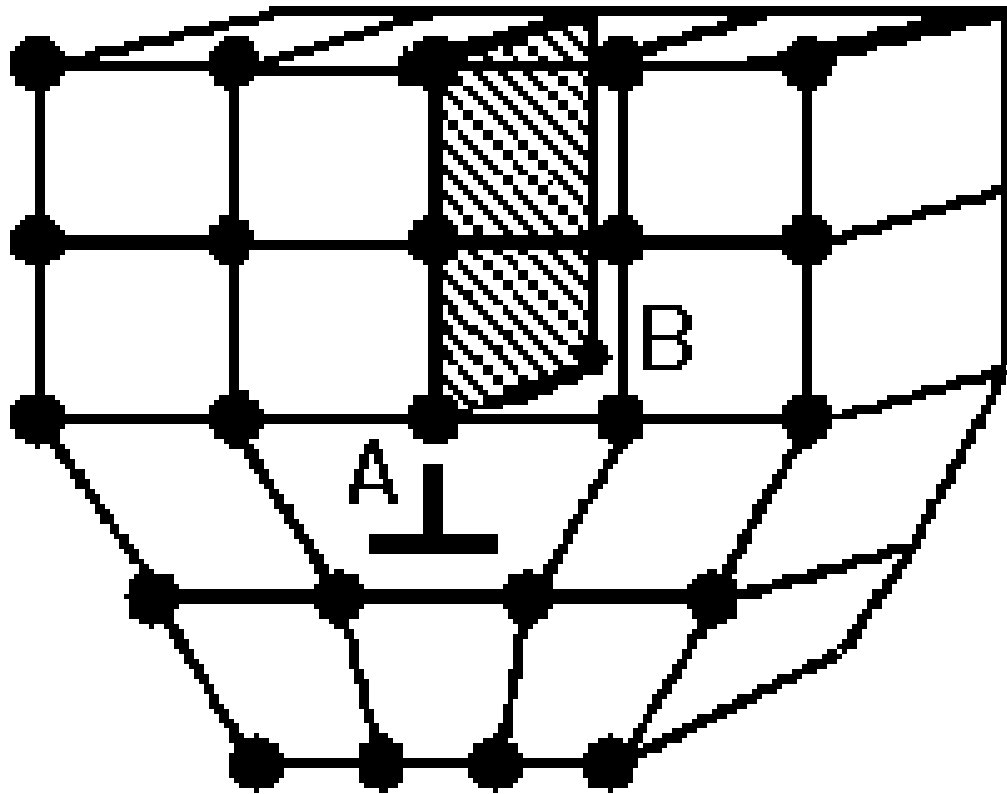


Схема краевой дислокации  
в кристаллической решетке

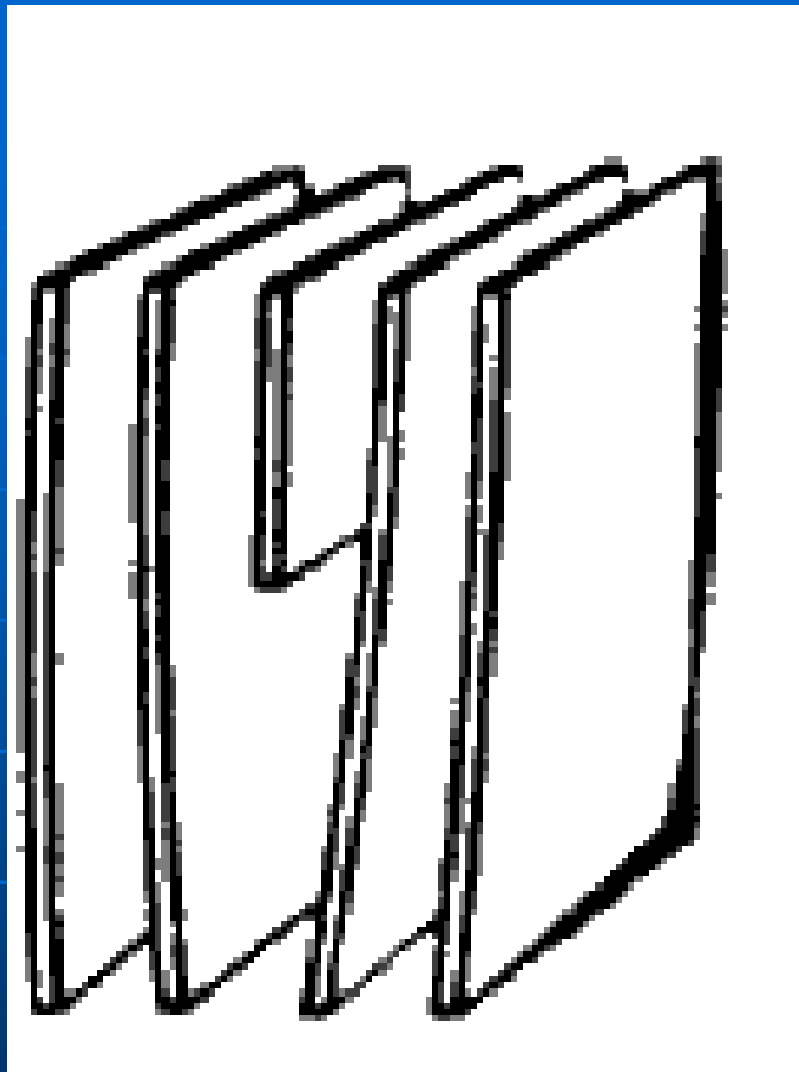


Схема краевой дислокации  
в кристаллической решетке

**Винтовая дислокация** формируется под действием сил сдвига  $P$ . Сдвиг распространяется от переднего края кристалла до линии АВ. При этом правая передняя часть кристалла смещается вниз на период кристаллической решетки. Такая деформация искажает расстояние между атомами **неравномерно**.

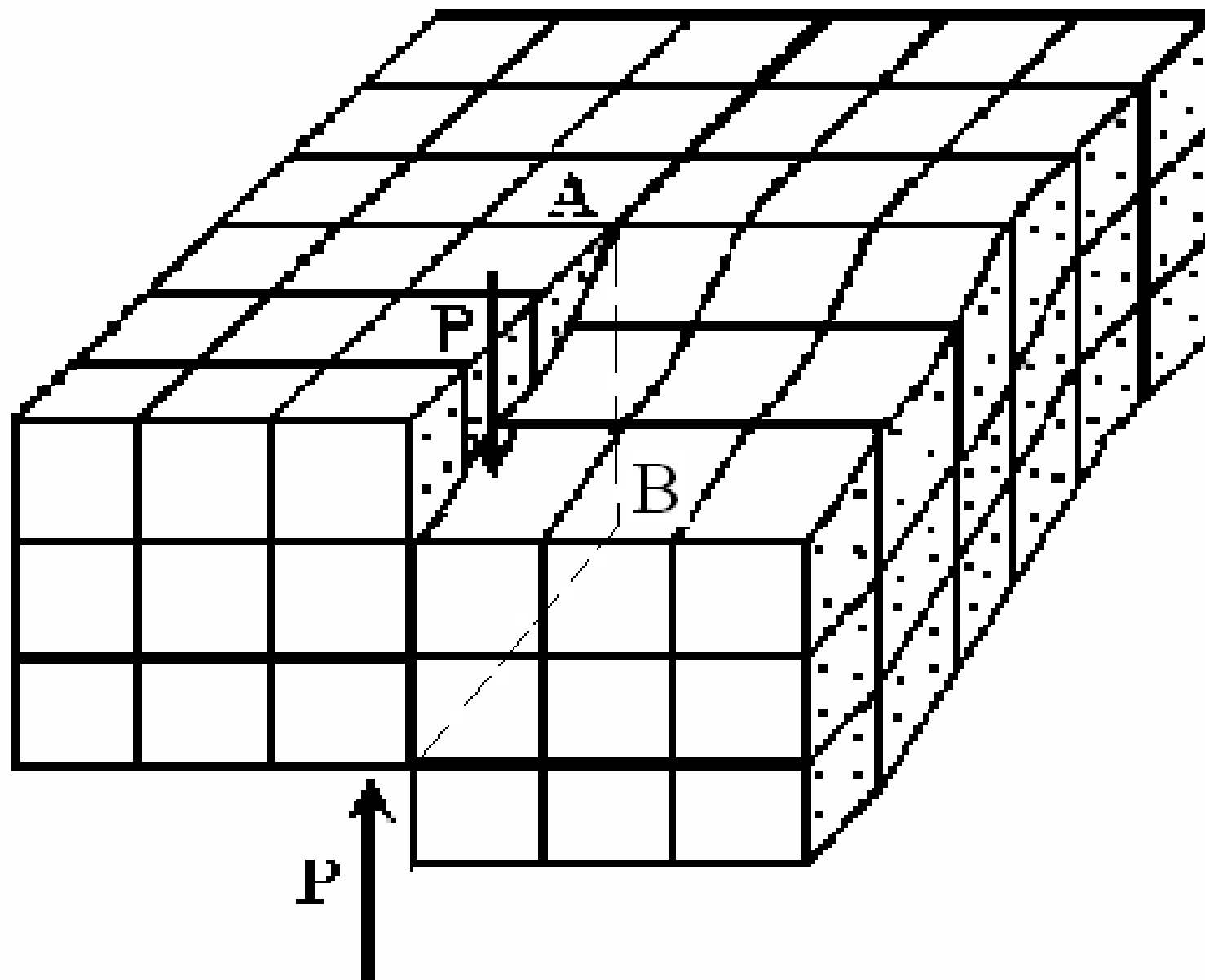


Схема винтовой дислокации

Дислокационная структура материала характеризуется *плотностью дислокаций*.

*Плотность дислокаций* в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью  $1 \text{ м}^2$ , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме  $1 \text{ м}^3$



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

(cm<sup>2</sup>; m<sup>2</sup>)

Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала.

- После тщательного отжига плотность дислокаций составляет

$10^5 \dots 10^7$  м<sup>2</sup>.

- В кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой плотность дислокаций

достигает  $10^{15} \dots 10^{16}$  м<sup>2</sup>.



Плотность дислокации в значительной мере определяет прочность материала

Минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций .

Если плотность меньше значения  $\rho_0$ , то сопротивление деформированию резко возрастает, а прочность приближается к теоретической. Повышение прочности достигается созданием металла с бездефектной структурой, а также повышением плотности дислокаций, затрудняющим их движение.

В настоящее время созданы кристаллы без дефектов – нитевидные кристаллы длиной до 2 мм, толщиной 0,5...20 мкм - “усы” с прочностью, близкой к теоретической:  
для железа - 13000 МПа

При упрочнении металлов увеличением плотности дислокаций, она не должна превышать значений  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

В противном случае образуются трещины.

Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов.

С увеличением плотности дислокаций возрастает внутреннее напряжение, изменяются оптические свойства, повышается электросопротивление металла.

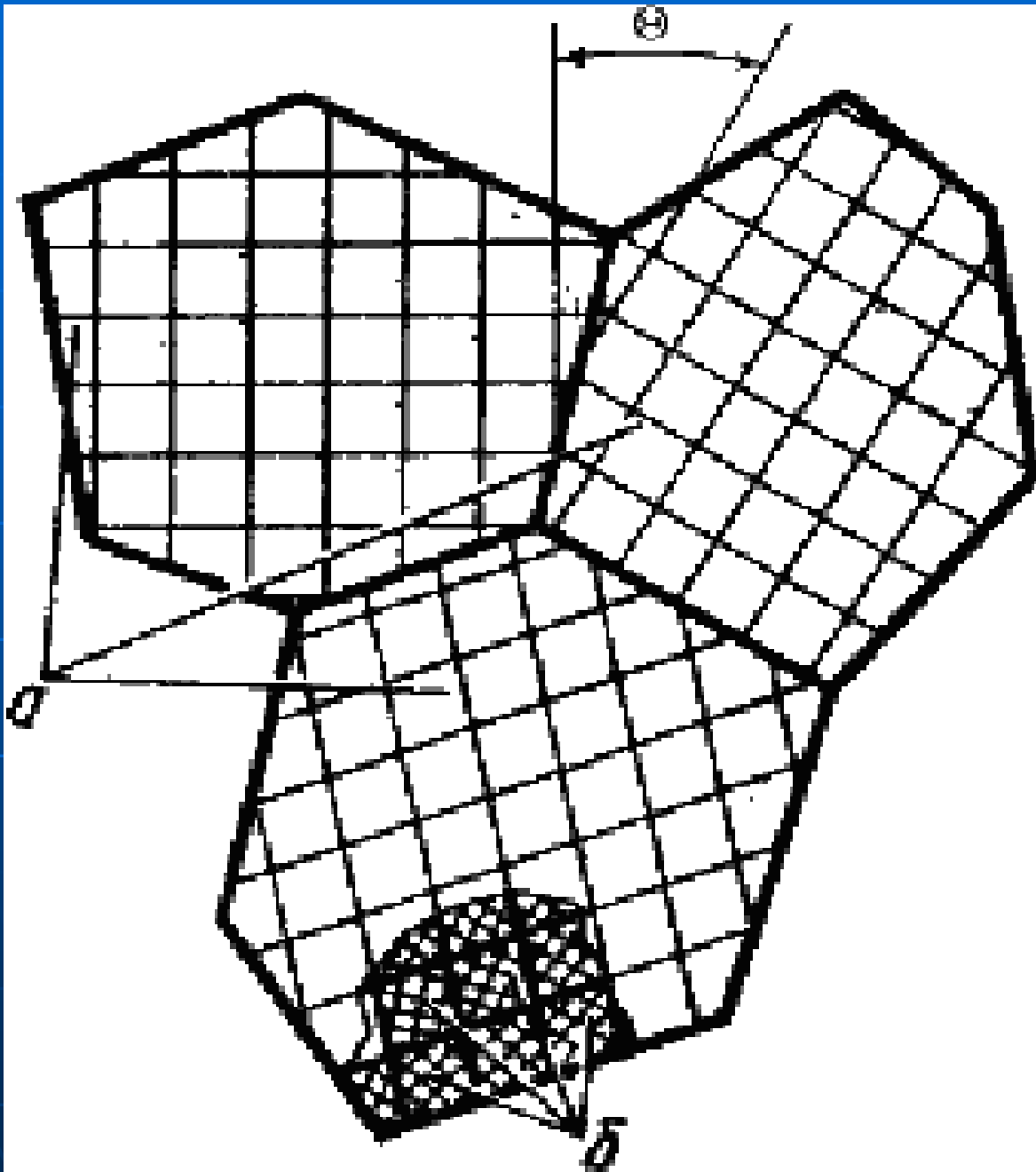
Дислокации увеличивают среднюю скорость диффузии в кристалле, ускоряют старение и другие процессы,

уменьшают химическую  
стойкость, поэтому в результате  
обработки поверхности кристалла  
специальными веществами в  
местах выхода дислокаций  
образуются ямки.



Дислокации образуются при образовании кристаллов из расплава или газообразной фазы, при срастании блоков с малыми углами разориентировки  $\theta$ .

Образуются дислокации при деформации, в процессе кристаллизации, при термической обработке.



*Поверхностные  
дефекты –  
границы зерен,  
фрагментов и  
блоков*

*Разориентация  
зерен и  
блоков  
в металле*

Размеры зерен составляют до 1000 мкм. Углы разориентации составляют до нескольких десятков градусов (☺).

Граница между зернами представляет собой тонкую в 5 – 10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов.

Строение переходного слоя способствует скоплению в нем дислокаций. На границах зерен повышена концентрация примесей, которые понижают поверхностную энергию.

Однако и внутри зерна (б) никогда не наблюдается идеального строения кристаллической решетки. Имеются участки, разориентированные один относительно другого на несколько градусов. Эти участки называются *фрагментами*.

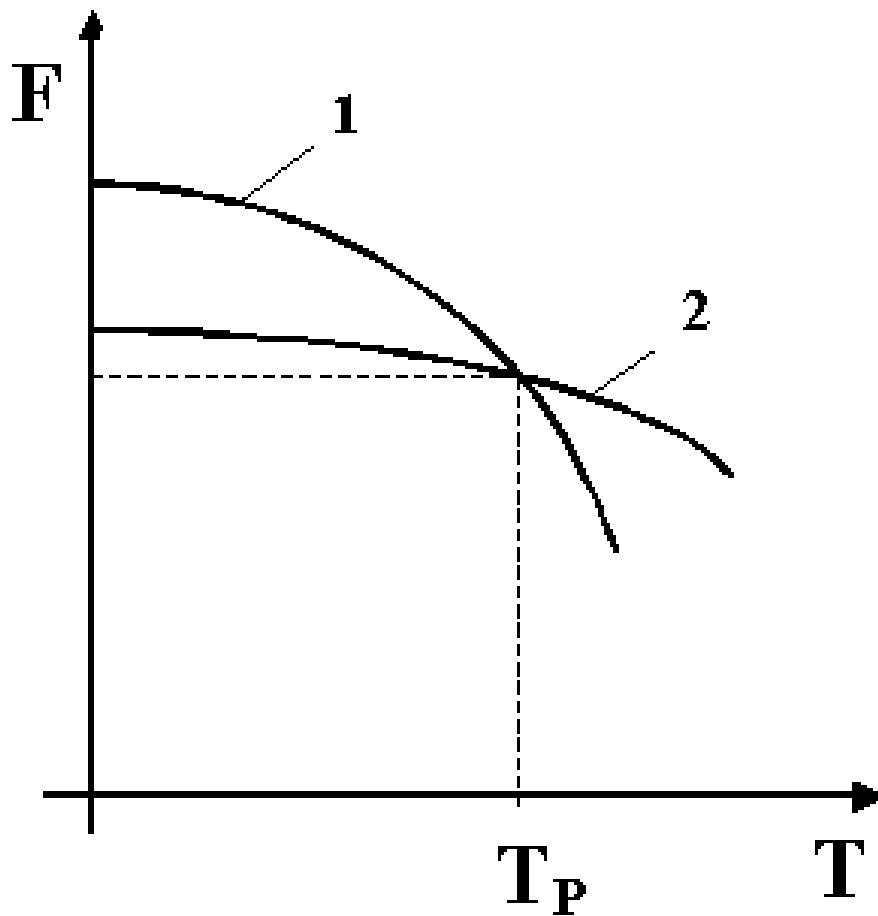
Процесс деления зерен на  
фрагменты называется  
*фрагментацией* или  
*полигонизацией*.

В свою очередь каждый фрагмент  
состоит из блоков, размерами  
менее 10 мкм,  
разориентированных на угол  
менее одного градуса.

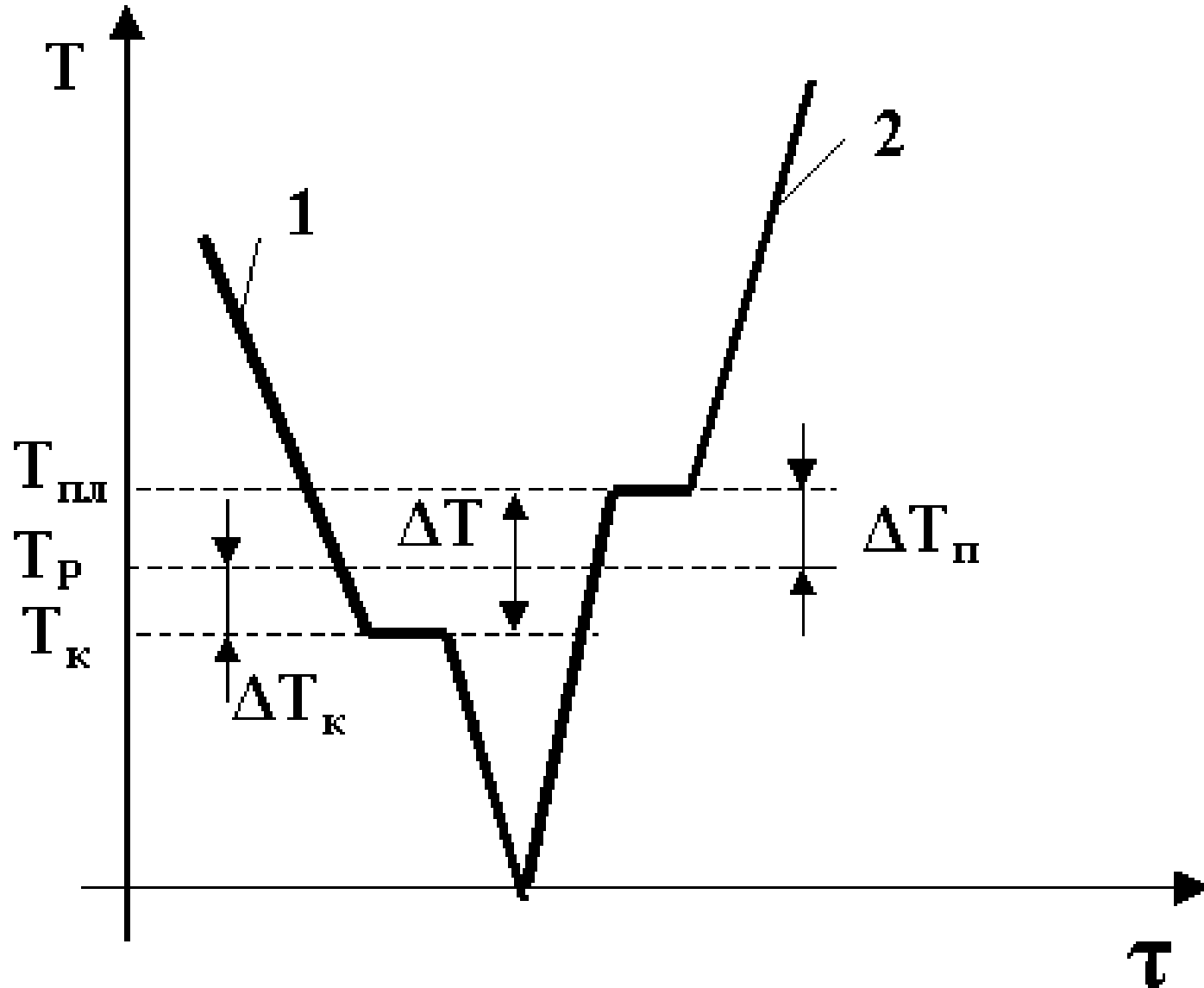
Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном. Возможен переход из одного состояния в другое, если новое состояние в новых условиях является более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

С изменением внешних условий свободная энергия изменяется по сложному закону различно для жидкого и кристаллического состояний.



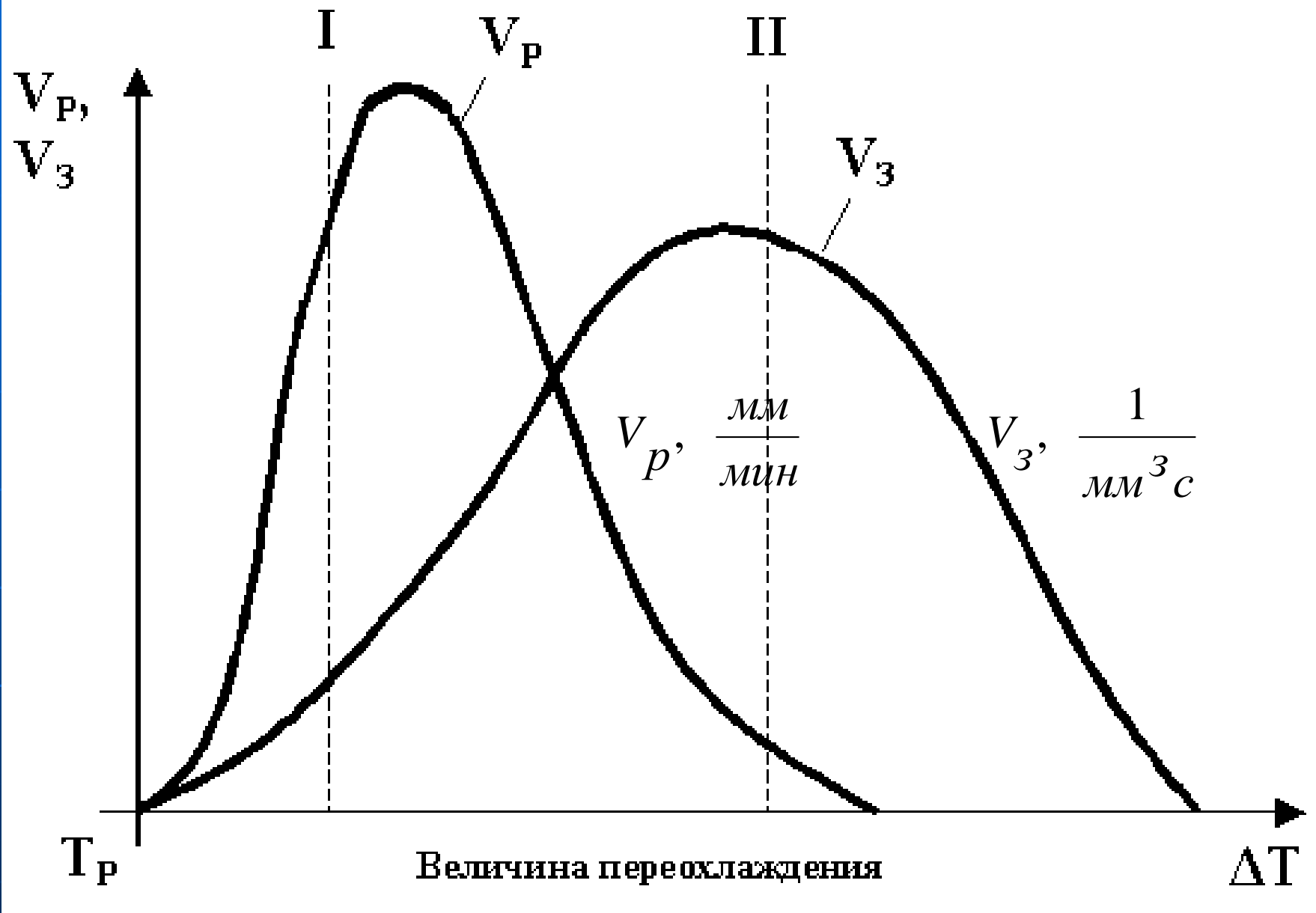


Зависимость свободной энергии жидкой 1 и твердой 2 фаз от температуры



Характерный вид кривых охлаждения (1) и нагрева (2) чистого металла

Русский инженер Чернов Д.К.  
первым в 1878 году установил, что  
процесс кристаллизации состоит из  
двух элементарных процессов (рис.):  
 $V_z$  – скорость роста числа зачатков  
(центров кристаллизации),  
 $V_p$  – скорость роста кристаллов.



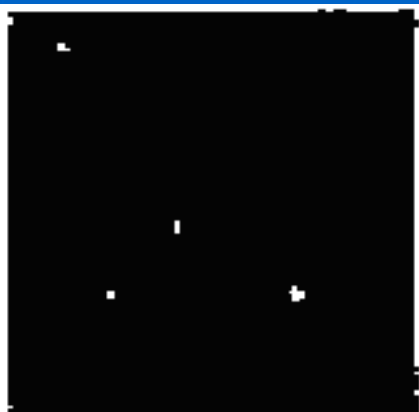
Зависимость скорости роста кристаллов  $V_p$  и  $V_z$   
 образования зародышей

## *Этапы процесса кристаллизации:*

1. В твердом состоянии все металлы имеют кристаллическое строение.
2. При переходе из жидкого состояния в твердое в отдельных частях жидкой фазы образуются частички правильно построенных атомов (зародышей).
3. Дальнейший рост кристаллов идет за счет надстройки атомов из жидкой фазы к зародышам.

4. Движущейся силой процесса кристаллизации является свободная энергия системы. Системе выгодно, чтобы свободная энергия была минимальной.

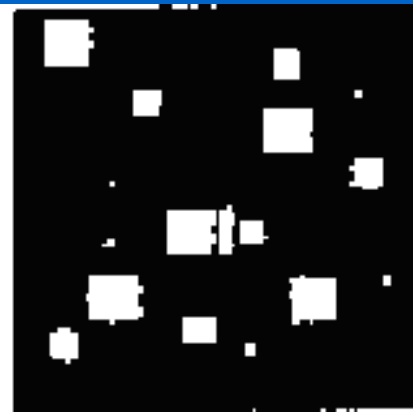
5. Скорость всего процесса кристаллизация определяется двумя величинами:  $V_P$  и  $V_3$ .



1c



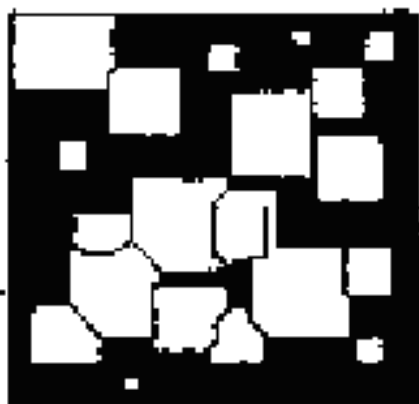
2c



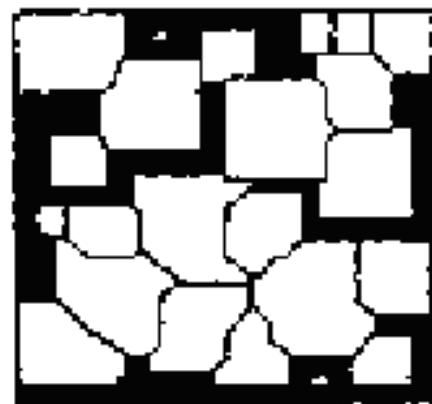
3c



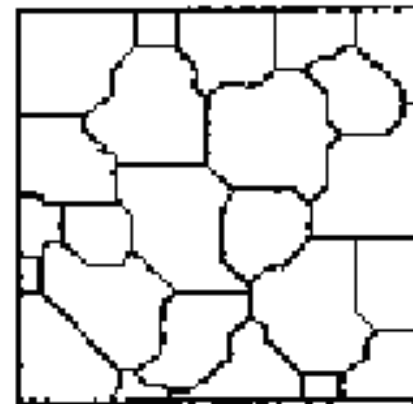
4c



5c



6c



7c

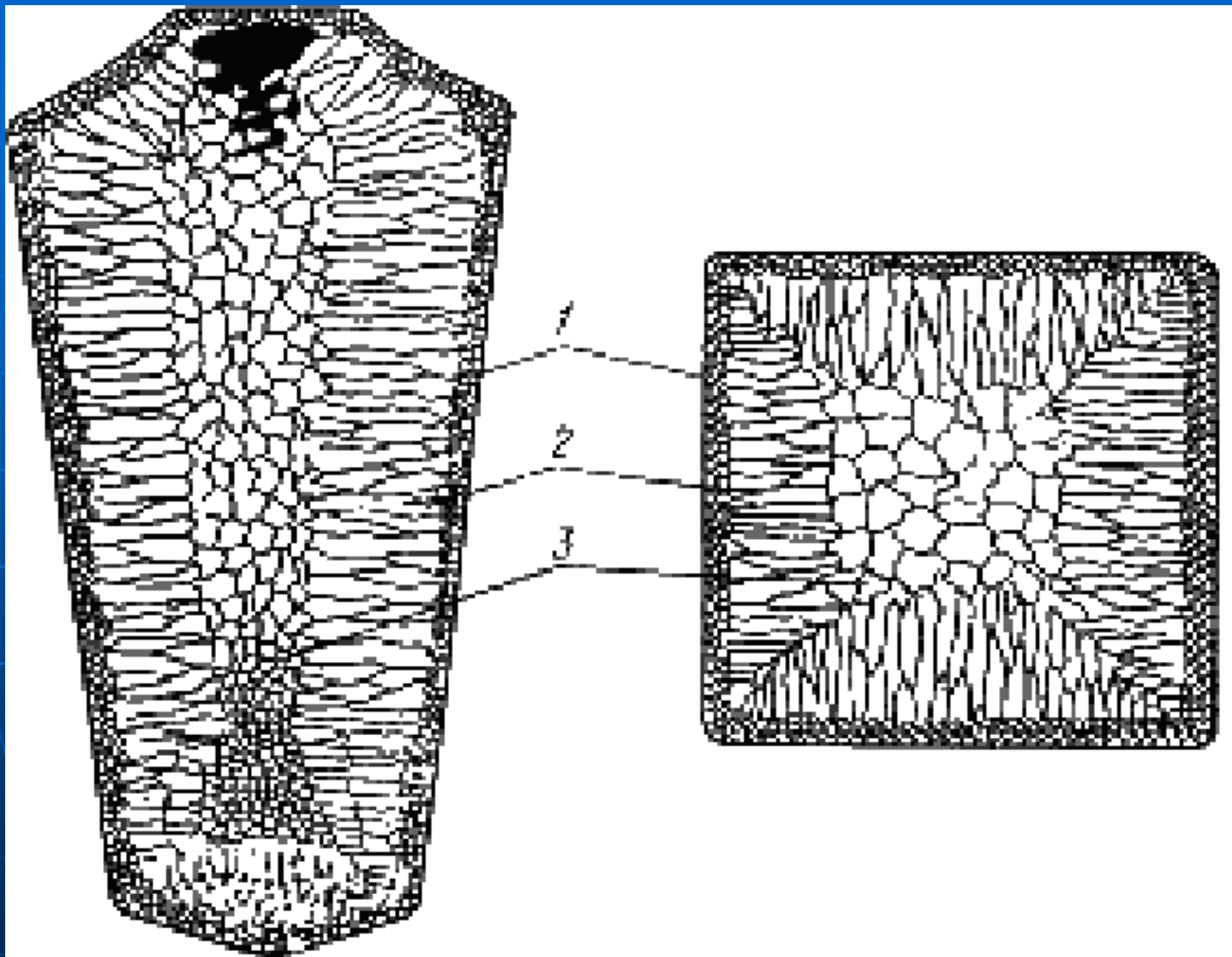


Схема стального слитка



Слиток состоит из трех зон:

- мелкокристаллическая корковая зона;
- зона столбчатых кристаллов;
- внутренняя зона крупных равноосных кристаллов.

Кристаллизация корковой зоны идет в условиях максимального переохлаждения. Скорость кристаллизации определяется большим числом центров кристаллизации. Образуется мелкозернистая структура. Жидкий металл под корковой зоной находится в условиях меньшего переохлаждения.

Число центров ограничено и процесс кристаллизации реализуется за счет их интенсивного роста до большого размера.

Рост кристаллов во второй зоне имеет направленный характер. Они растут перпендикулярно стенкам изложницы, образуются древовидные кристаллы — дендриты. Растут дендриты с направлением, близким к направлению теплоотвода.



Схема дендрита по Чернову Д.К.