



Теоретическое и прикладное материаловедение

Старший преподаватель
Иванников Александр
Александрович

Рекомендуемая литература

- Лившиц Б.Г. Металлография. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
- Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. – М.: Металлургия, 1975. – 447 с.
- Мозберг Р.К. Материаловедение. – Высшая школа, 1991. – 448 с.
- Лахтин Ю.М., Леонтьева В.М. Материаловедение: учебник для студентов машиностроительных специальностей ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1990 – 528 с.
- Гуляев А.П. Металловедение: учебник для студентов высших технических учебных заведений. – М.: Металлургия, 1986. – 646 с.
- Учебник под редакцией Калина Б.А. Физическое материаловедение: основы материаловедения (том 2). – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 604 с.

Иванников Александр Александрович Расписание занятий

Весенний семестр 2018/2019 учебного года > Расписание преподавателей > Иванников А.А.

Все недели

Нечетная неделя

Четная неделя

Текущий день

Текущая неделя

 Версия для печати

ВТОРНИК

09:20 — 10:05  ЛАБ Теоретическое и прикладное материаловедение  Б16-103

 Б-124/126 

10:15 — 11:50  ПР Теоретическое и прикладное материаловедение  Б16-103

 Б-124/126 

СРЕДА

14:30 — 17:50  ЛЕК Теоретическое и прикладное материаловедение  Б16-103

 Б-124/126 

15:20 — 16:05  ЛАБ Производственная практика (научно-исследовательская работа)  С14-104 (06.02.2019 — 01.05.2019)  каф.9

Производственный календарь 2019

Февраль

пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28			

Март

пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Апрель

пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Май

пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Лабораторные работы 2019

6 семестр:

Лабораторная работа 1 - Изучение металлографического микроскопа и методы приготовления микрошлифов и измерения твердости металлов и сплавов.

Лабораторная работа 2 - Построение диаграммы состояния системы олово-висмут и изучение структур сплавов этой системы.

Лабораторная работа 3 - Изучение трехкомпонентной системы фазового равновесия.

~~7 семестр:~~

Лабораторная работа 4 - Изучение диаграммы состояния сплавов железо-углерод и микроструктуры сталей и чугунов

Лабораторная работа 5 - Деформация и рекристаллизация металлов и сплавов.

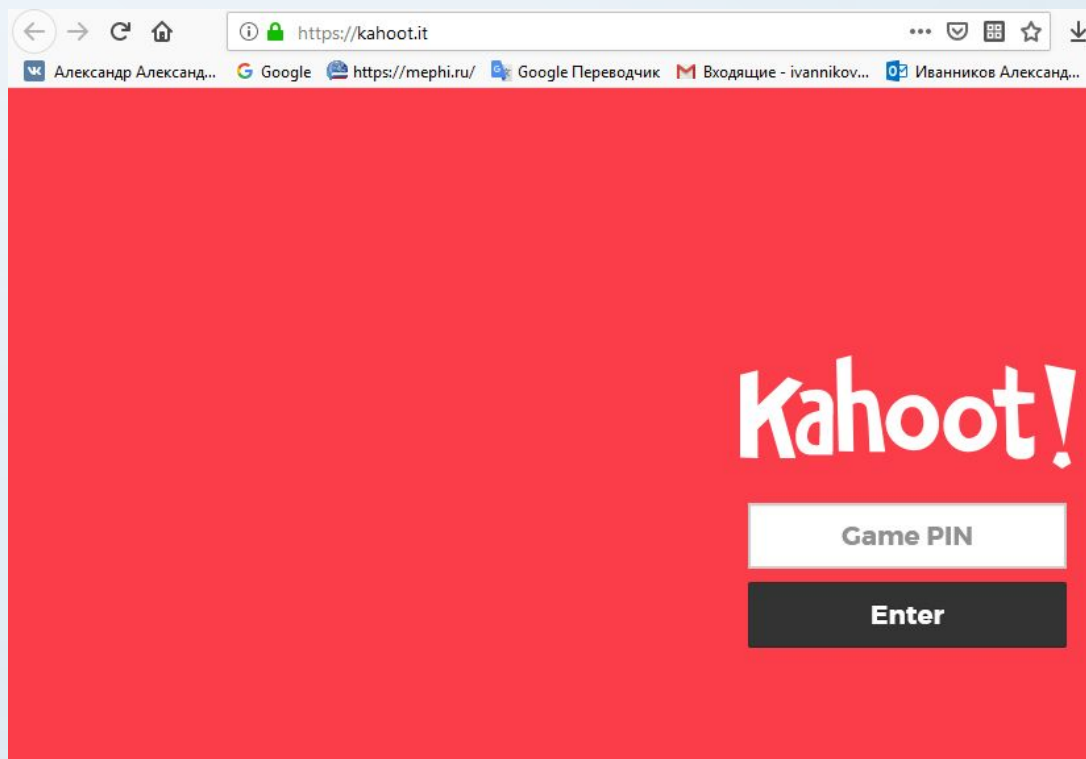
Лабораторная работа 6 - Отжиг и нормализация металлов и сплавов.

Лабораторная работа 7 - Старение сплавов (на примере термообработки дуралюмина).

Лабораторная работа 8 - Закалка и отпуск сталей и сплавов.

Лабораторные работы 2019

Kahoot был разработан для социального обучения, где учащиеся собираются вокруг общего экрана, например, интерактивная доска, проектор или монитор. Игровой процесс простой: все игроки используют устройство для ответа на вопросы, созданные преподавателем. Правильные ответы на вопросы переводятся в баллы. Затем набранные баллы выводят лидеров после каждого вопроса.



Оценочные средства

1. Фазовые превращения
при кристаллизации в
однокомпонентных и в
двухкомпонентных
системах – **КР-4 неделя**

2. Сложные диаграммы
фазового равновесия –
КР-8 неделя

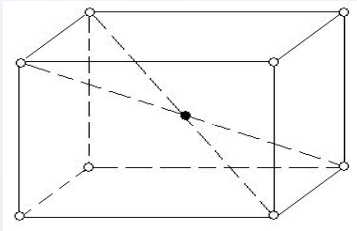
3. Общая теория
термической
обработки – **КР-12
неделя**

4. Виды термообработки и
основные принципы разработки
сплавов с заданными свойствами
– **КР-15 неделя.**

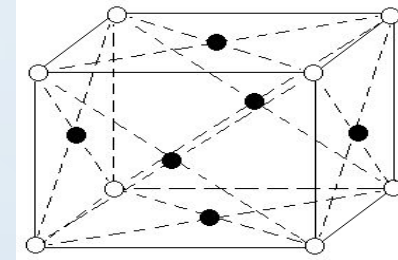
Кристаллизация. Структура жидких металлов

Материаловедение – наука изучающая взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов, а так же влияние на их структуру и свойства различных внешних воздействий.

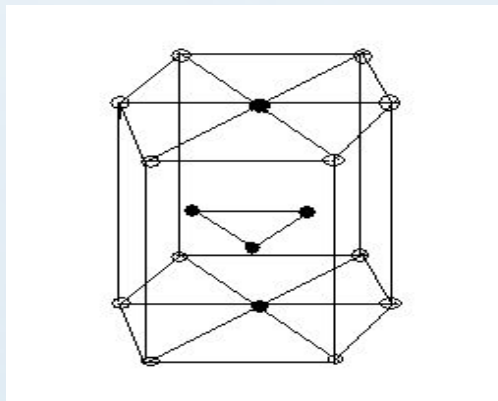
Наиболее распространенные типы кристаллической решетки



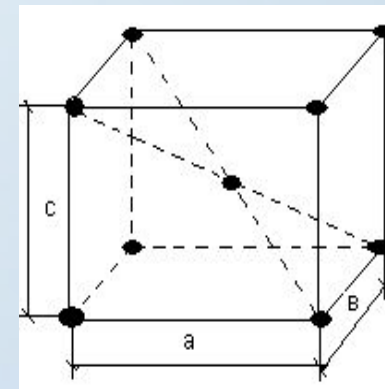
Объемно-центрированная кубическая решетка – **ОЦК**
(Fe, Cr, W, V, Mo)



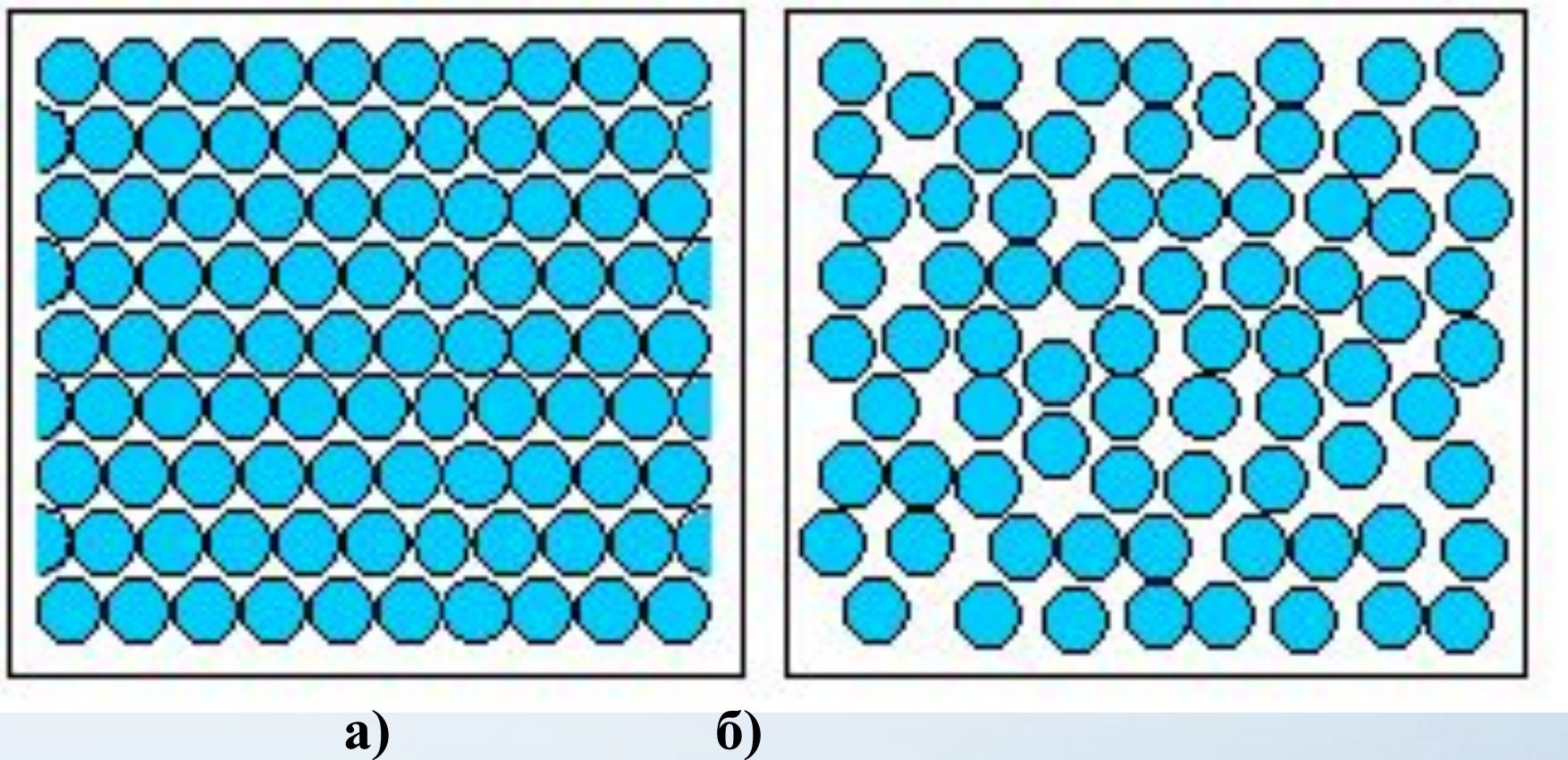
Гранецентрированная кубическая решетка – **ГЦК** (Fe, Cu, Al, Ni)



Гексагональная плотноупакованная решетка – **ГПУ** (Zn, Mg, Cd)



Тетрагональная решетка (Fe, Ti, Sn, Zr)



Атомы в кристалле: а) дальний порядок; б) ближний порядок

В жидкости не существует дальнего порядка, то есть расстояния между атомами не являются постоянными во всем объеме. В кристаллических, твердых телах между атомами существует дальний порядок.

Плотность жидкости намного ниже плотности твердых тел. При плавлении металлов межатомное расстояние увеличивается на 2-6%. В большей степени этот эффект проявляется у металлов, которые более компактны в твердом состоянии (гексагональная и кубическая гранецентрированная решетки).

Основные методы получения кристаллического состояния:

- кристаллизация из жидкой фазы;
- кристаллизация из газовой фазы;

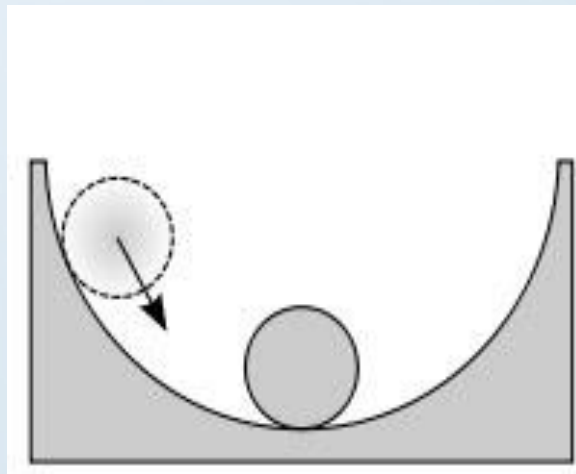
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

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.

При переходе из жидкого состояния в твердое образуется кристаллическая решетка, возникают кристаллы. Такой процесс называется *кристаллизацией*.

Почему такое превращение происходит и лишь при строго определенных температурах? Процессы плавления и кристаллизации происходят в соответствии со вторым законом термодинамики. Согласно этому закону все процессы в системе происходят в направлении уменьшения её *свободной энергии*.

Новое состояние в новых условиях является энергетически более выгодным, обладает меньшим запасом энергии.



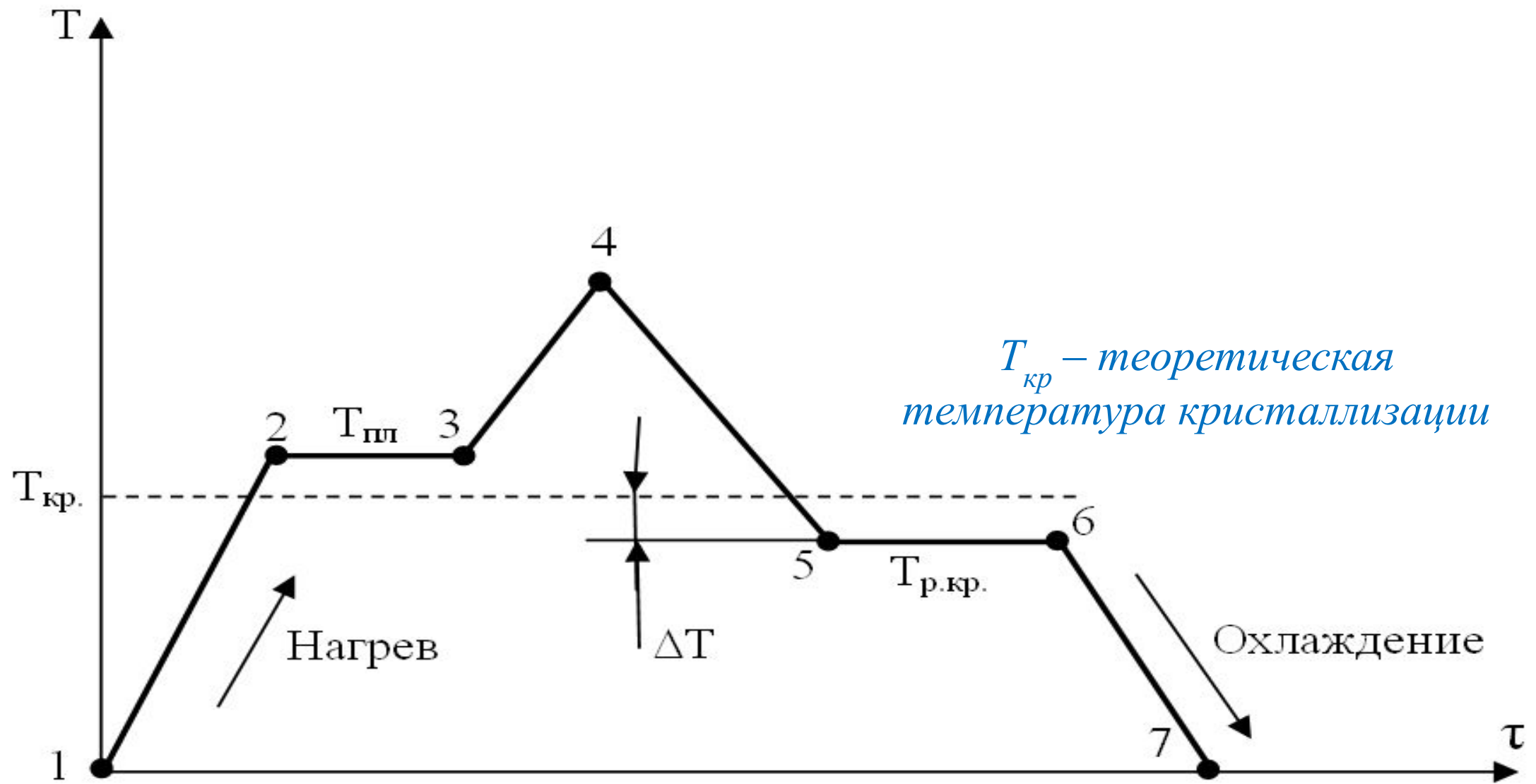
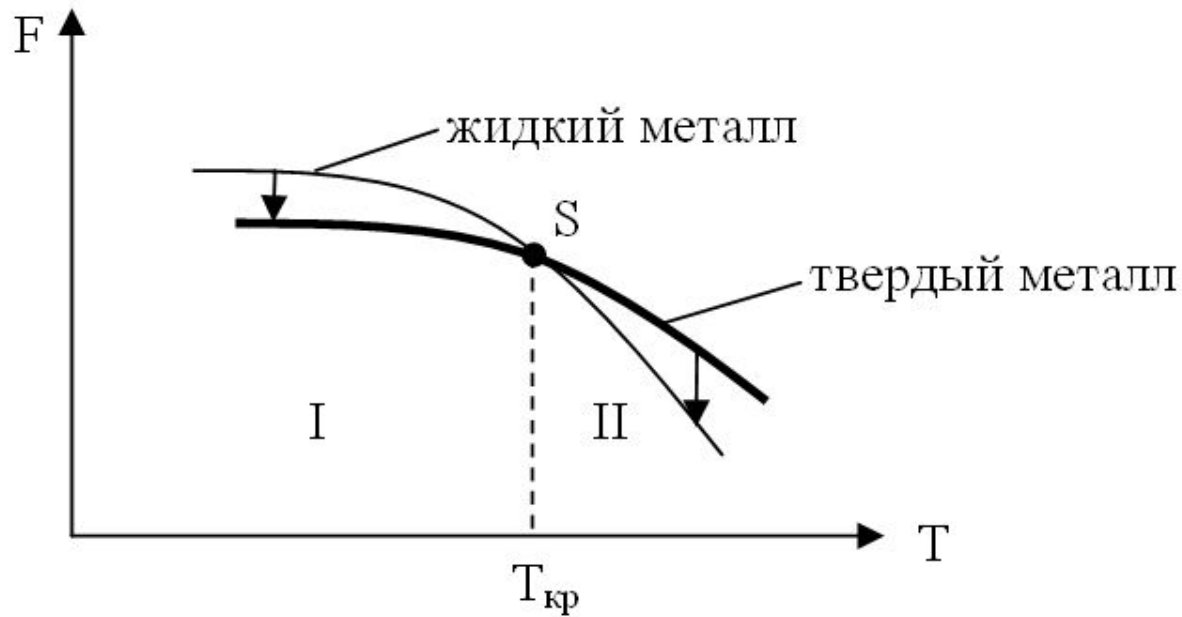


График нагрева и охлаждения металла

- Участок 1 - 2 подвод тепла к металлу сопровождается повышением его температуры.
- Участок 2 - 3 подвод тепла не приводит к повышению температуры, а подводимая энергия расходуется на разрушение кристаллической решетки и перевод атомов в неупорядоченное состояние, то есть переход из твердого состояния в жидкое.
- Участок 3 - 4 подвод тепла вызывает повышение температуры уже жидкого металла.
- Участок 4 - 5 идет охлаждение жидкого металла.
- Участок 5 - 6 происходит кристаллизация металла. При этом выделяется тепло, которое называют *скрытой теплотой кристаллизации*.

Энергетические условия процесса кристаллизации



**Изменение величины свободной энергии
в твердом и жидком состоянии**

Переохлаждение — охлаждение жидкости ниже температуры кристаллизации.

Отсюда следует, что для того чтобы начал развиваться процесс кристаллизации необходимо переохладить металл до некоторой реальной температуры кристаллизации $T_{р.кр.}$

Важно:

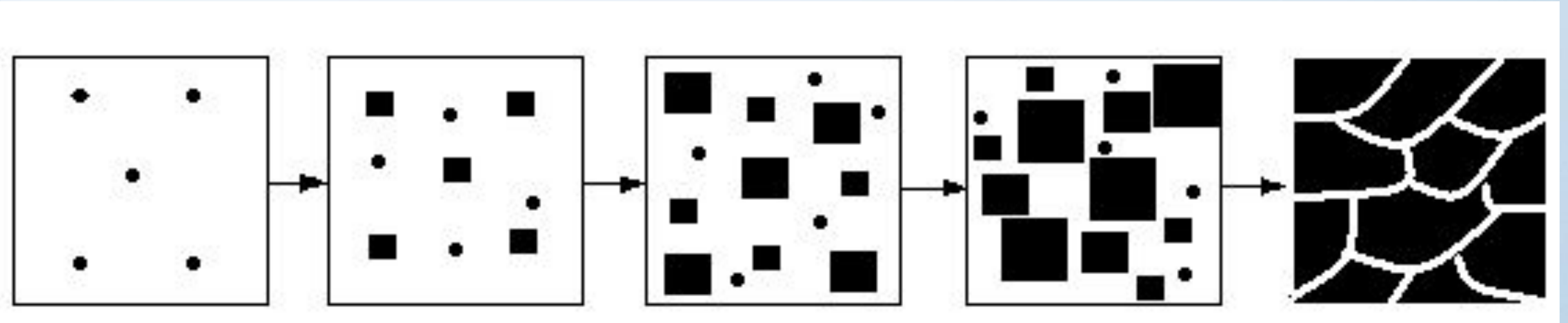
Эта реальная температура кристаллизации будет меньше чем теоретическая температура кристаллизации $T_{р.кр.} < T_{кр.}$

Разность между теоретической и реальной температурами кристаллизации называется — *степенью переохлаждения* ΔT и вычисляется по формуле:

$$\Delta T = T_{кр.} - T_{р.кр.}$$

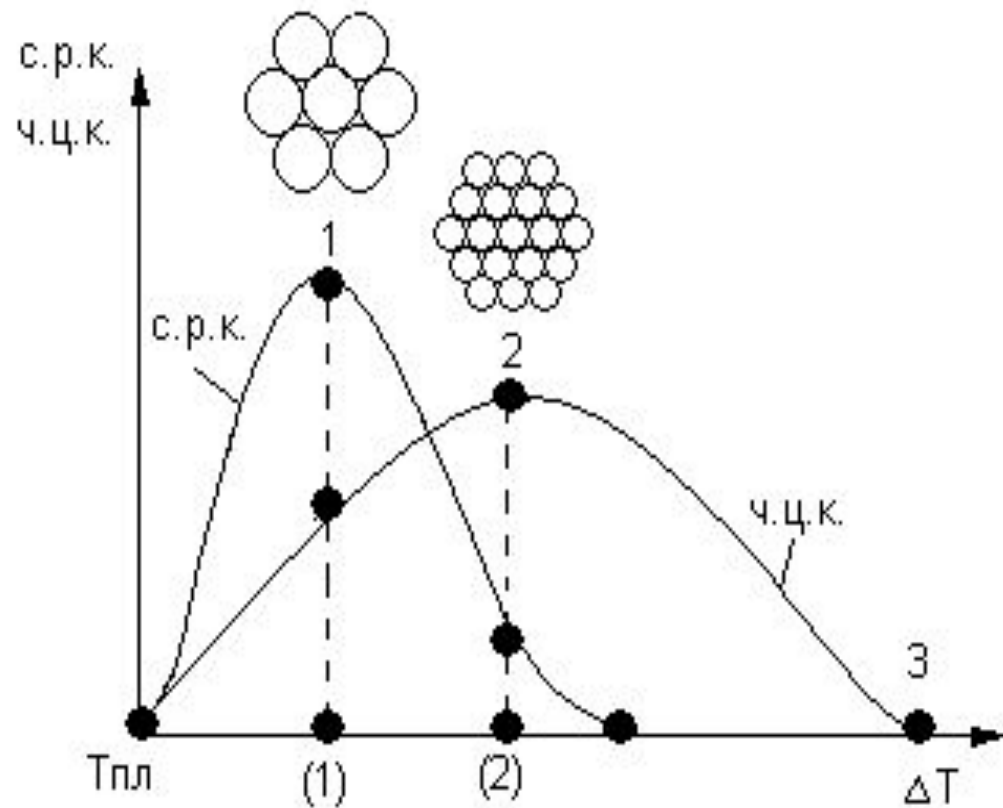
Механизм процесса кристаллизации

Процесс кристаллизации состоит из двух стадий: Зарождение мельчайших частиц (зародышей) и рост кристаллов



При понижении температуры жидкого металла в нем начинают образовываться мелкие кристаллы, называемые центрами кристаллизации (*зародышами*). Растущие из центров кристаллизации кристаллы ориентированы произвольно — они называются *зернами*.

Металл, состоящий из большого количества таких зерен, называется **поликристаллическим**.



зависимость числа центров кристаллизации (ч.ц.к.) и скорости роста кристаллов (с.р.к.) от степени переохлаждения металла ΔT

Будем считать, что в единицу времени в единице объемов появляется n число зародышей (ч.ц.к.). Скорость роста зародыша в любом направлении называется скоростью роста кристаллов (с.р.к.) - **с**.

Строение поликристаллического металла зависит от скорости охлаждения $V_{охл}$ (или степени переохлаждения ΔT). Эта зависимость была изучена отечественными учеными Тамманом и Черновым.

Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что чем выше скорость охлаждения (больше степень переохлаждения расплава, тем более мелкокристаллическая структура получается после кристаллизации.

Важно:

Измельчать зерно в процессе кристаллизации можно не только повышая скорость охлаждения, но и вводя в жидкий металл специальные вещества – *модификаторы*.

Модификаторами могут быть мелкие частицы:

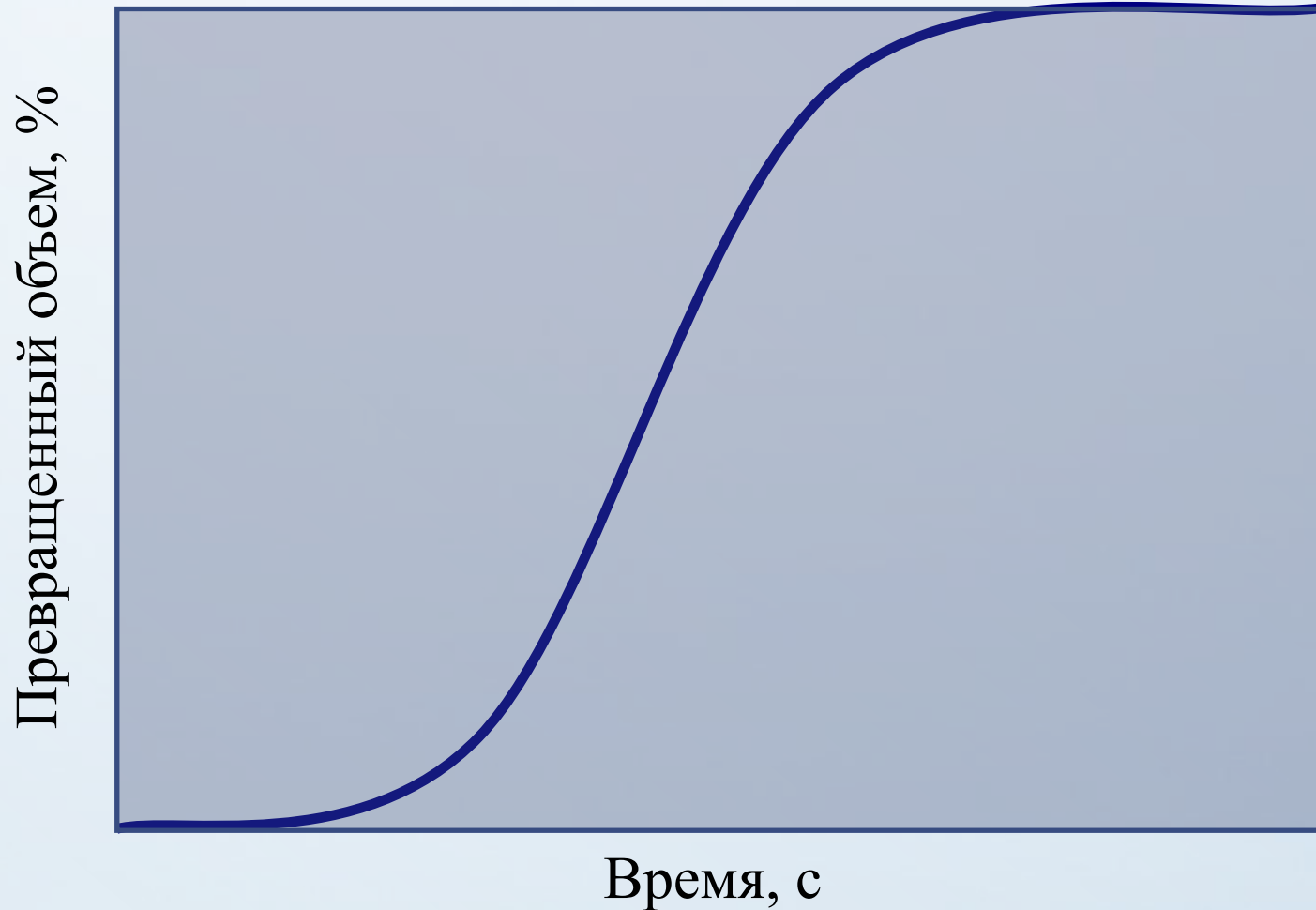
- карбидов,
- боридов,
- нитридов,
- оксидов,
- сульфидов и другие соединения

Кинетика кристаллизации

1. При теоретической температуре кристаллизации значения ч.ц. и с.к. равны нулю и процесс кристаллизации идти не может.
2. Увеличение с.к. и ч.ц. при малых степенях переохлаждения обусловлено тем, что подвижность атомов велика и увеличивается разность свободных энергий жидкого и твердого состояний.
3. Снижение с.к. и ч.ц. при больших степенях переохлаждения вызвано уменьшением подвижности атомов
4. При очень больших степенях переохлаждения подвижность атомов недостаточна для перестройки и с.к. и ч.ц. равны нулю.
5. Размер образовавшихся кристаллов зависит от соотношения величин с.к. и ч.ц. при температуре кристаллизации, при данной степени переохлаждения.
6. Центры кристаллизации в области максимума скорости роста еще не образуются, а в области максимума скорости образования центров кристаллизации линейная скорость роста мала. Это тормозит суммарную скорость кристаллизации, и полное время этого процесса растет.

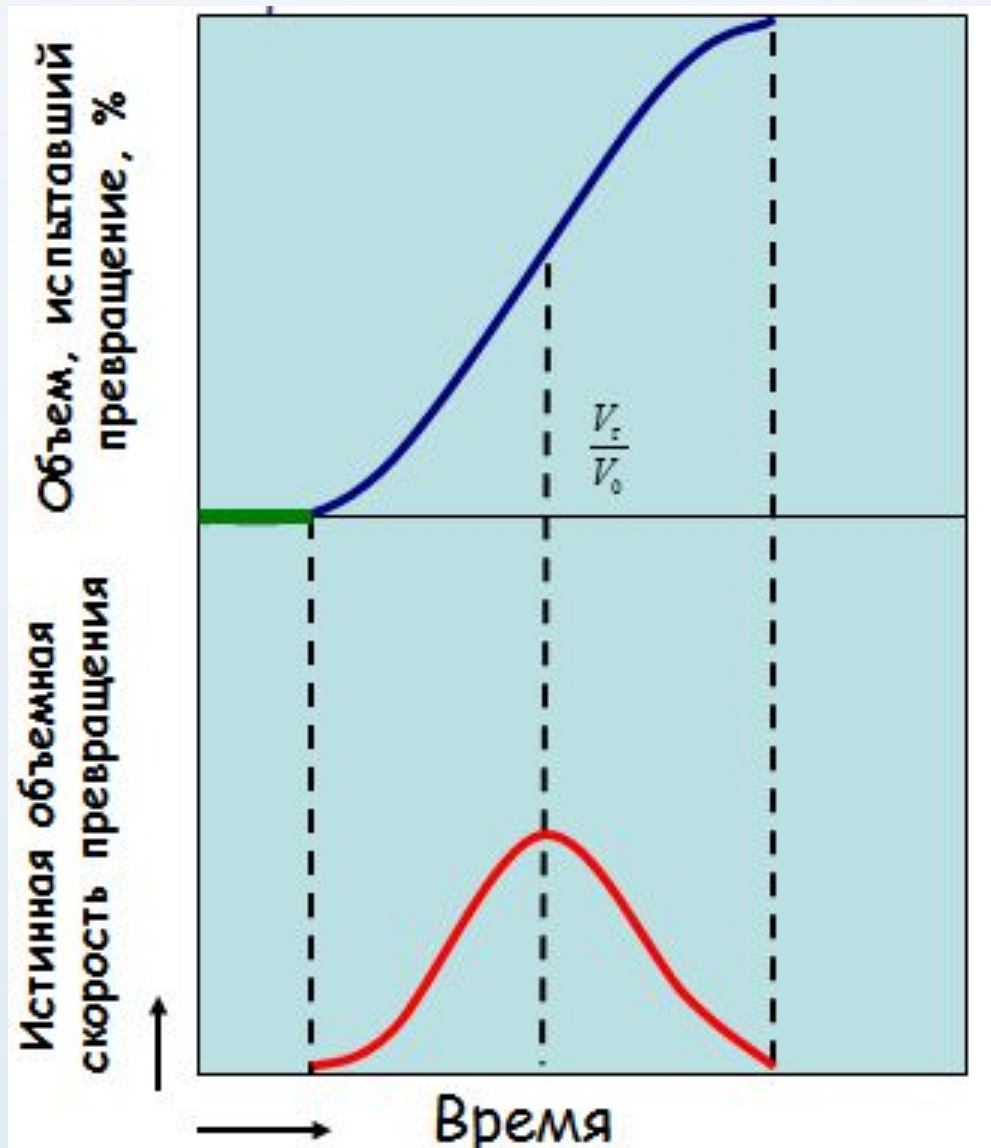
Кинетика кристаллизации

Схема процесса кристаллизации может быть представлена кинетической кривой.

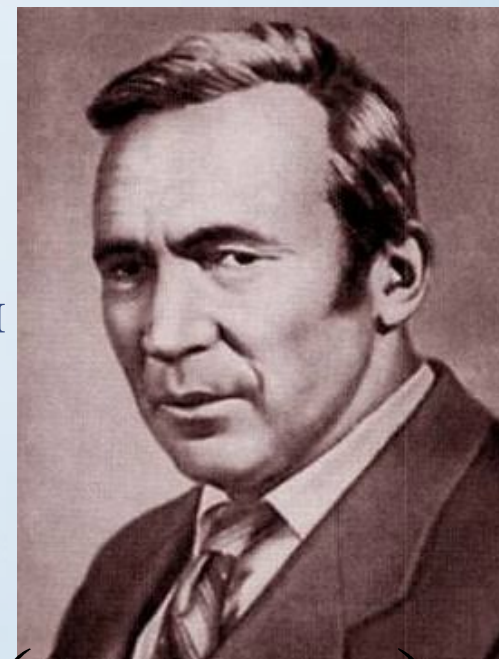


Первоначальное возрастание dV/dt обусловлено увеличением числа растущих кристаллов, а также их поверхности. Дальнейшее снижение обусловлено уменьшением объема незатвердевшей жидкости, то есть уменьшением числа новых зародышей и столкновением растущих кристаллов

Кинетика кристаллизации



Колмогоров Андрей
Николаевич



$$\frac{V_\tau}{V_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} n c^3 \tau^4\right)$$

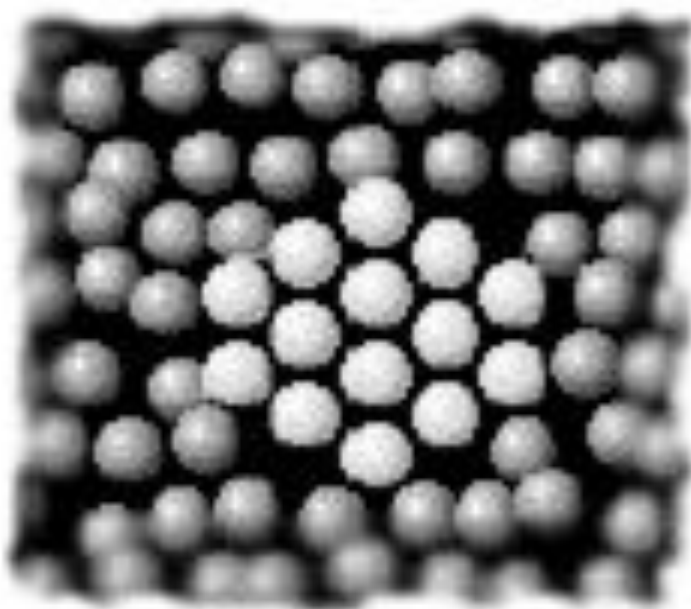
Доля объема,
испытавшего
превращение
за время τ

n -скорость зарождения центров;
 c -линейная скорость роста.

При рассмотрении процесса кристаллизации можно сделать **два важных вывода**:

- по мере развития процесса кристаллизации в нем участвует все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент (обычно, когда закристаллизовалось 50% жидкости) взаимное столкновение растущих кристаллов не начинает препятствовать их росту; рост кристаллов замедляется, тем более, что и жидкости становится все меньше.
- в процессе кристаллизации, пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма кристалла оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов.

Гомогенное и гетерогенное зародышеобразование



Маленькие кластеры образуются из жидкого металла и кристаллизуются формируя твердое тело

Явление зарождения может рассматриваться как образование зародышей кристаллов новой фазы, способных в дальнейшем расти внутри исходной фазы.

Традиционно рассматриваются два вида зарождения: **гомогенное** и **гетерогенное**.

Под **гомогенным** зарождением понимают образование зародышей в результате флуктуаций, а под **гетерогенным** — на имеющихся поверхностях раздела с другими фазами.

Гомогенное образование зародышей

Гомогенное зарождение *не обусловлено* предварительно существовавшими неоднородностями структуры.

Зародышем *не может* являться сколь угодно малая совокупность атомов.

Зародыши, образованные термически активированными флуктуациями, могут обладать различной формой, размером, структурой, а их свойства совпадают с конечным продуктом превращения.

Таким образом, рассматривается чистый металл, свободный от растворимых и нерастворимых примесей.

Гомогенное образование зародышей

Затвердевание будет происходить, если свободная энергия Гиббса будет уменьшаться, так как любая система стремится к минимуму свободной энергии.

Изменение свободной энергии на образование зародышей =

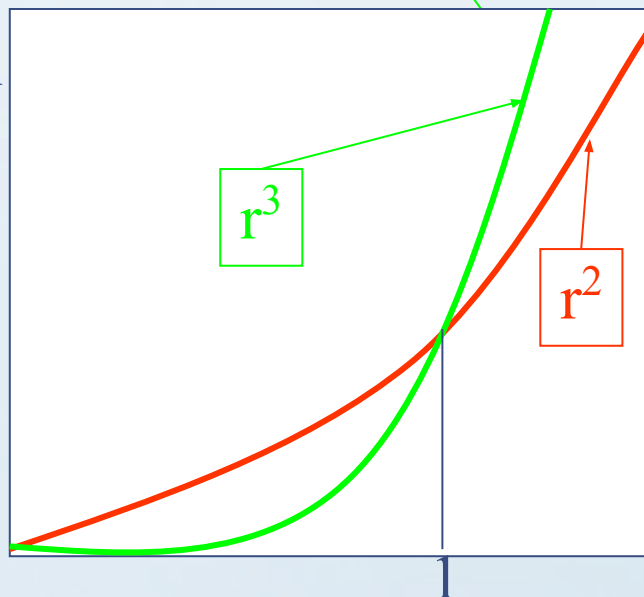
Снижение в объемной энергии + Повышение в поверхностной энергии

$$\Delta G = (\text{Объем})(\Delta g_V) + (\text{Поверхность})(\sigma_s)$$

Удельная
поверхностная
энергия

$$\Delta G = -n \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) (\Delta g_V) + n (4 \pi r^2) (\sigma_s)$$

Количество
возникающих
участков
новой фазы



$$\Delta g_V = f(\Delta T)$$

Изменение свободной энергии на единицу объема затвердевшего вещества, а V - его объем.

Для сферического зародыша радиуса r изменение свободной энергии складывается из членов, связанных и изменением объемной и поверхностной энергии

$$\Delta g_V = \frac{G_L - G_S}{V}$$

Гомогенное образование зародышей

При $n=1$, определим радиус критического зародыша из условия

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0$$

$$\Delta G = -\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \Delta g_V \cdot r^3 \cdot n + 4 \cdot \pi \cdot \sigma_S \cdot r^2 \cdot n$$

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = -4 \cdot \pi \cdot \Delta g_V \cdot r^2 + 8 \cdot \pi \cdot \sigma_S \cdot r = 0$$

$$r^* = 2 \cdot \frac{\sigma_S}{\Delta g_V}$$

Зародыш будет расти, если его радиус будет $\geq r^*$, так как увеличение размера радиуса приведет к уменьшению свободной энергии

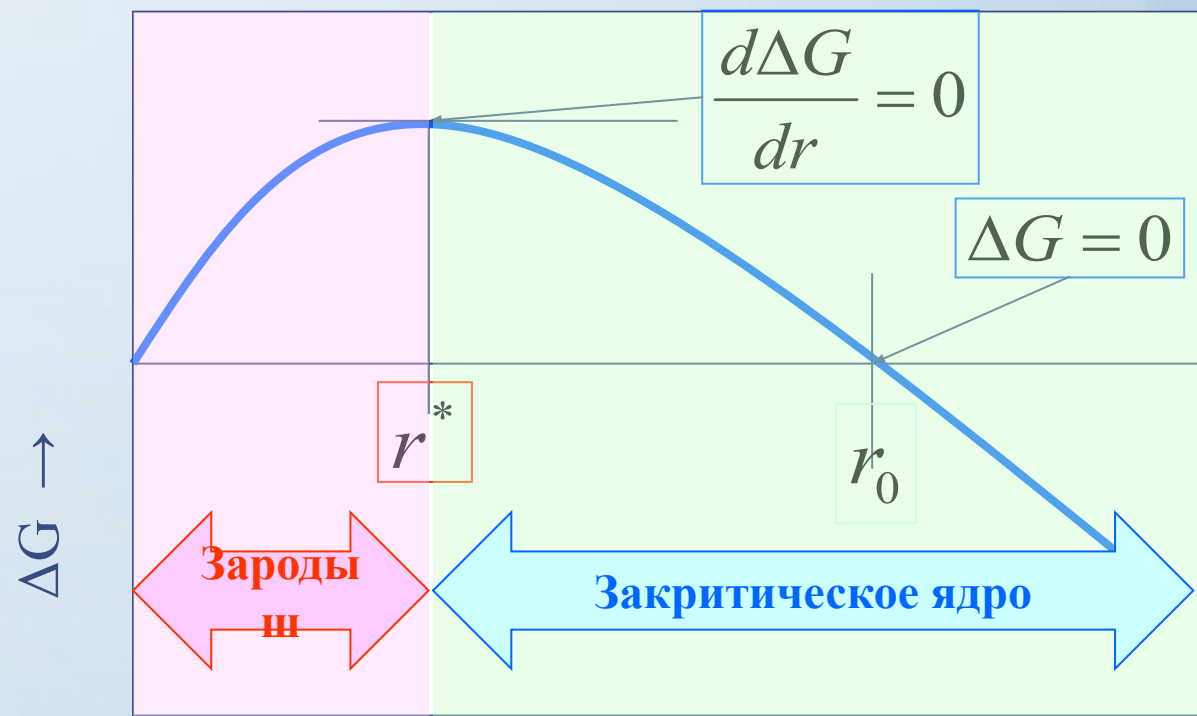
r^* - критический радиус

Если $r < r^*$, то зародыш расти не сможет, так как его рост привел бы к увеличению ΔG

Зародыши могут возникать в жидкости в тех местах, где энергия повышена вследствие флуктуации на величину $\geq \Delta G$

$n=1$

При малом **r** **ΔG** растет, так как преобладает увеличение поверхностной энергии, а при большом **r** **ΔG** уменьшается, вследствие роста абсолютного значения первого слагаемого.



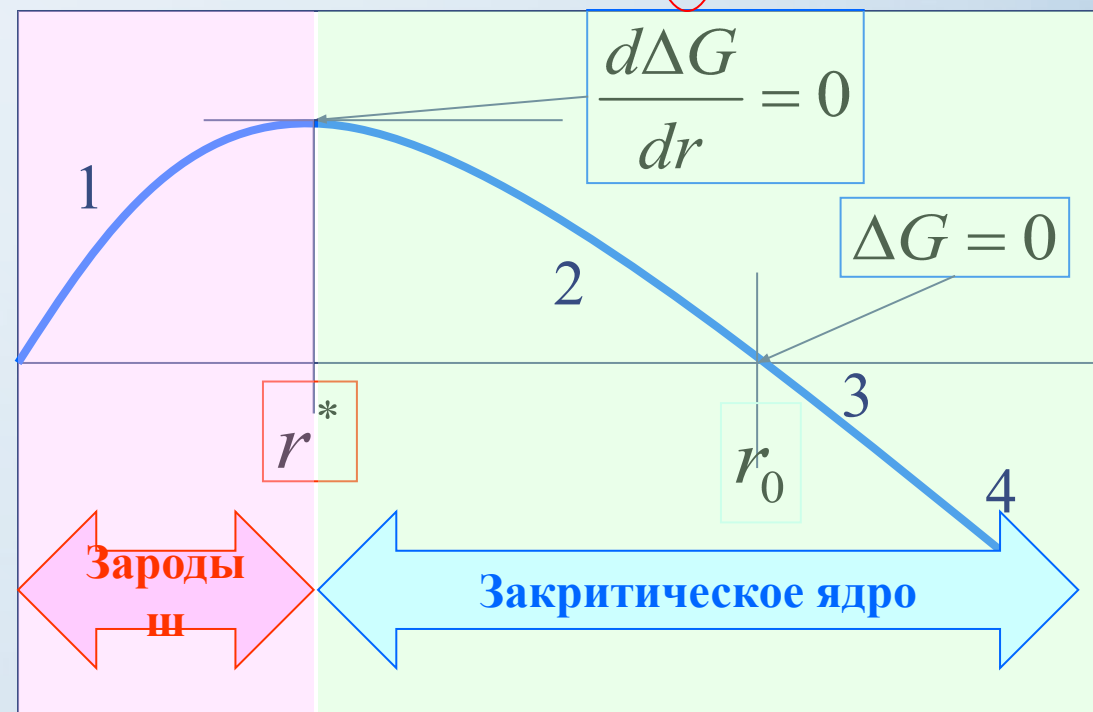
$$r^* = 2 \cdot \frac{\sigma_s}{\Delta g_V} \quad \Delta G = -\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{8\sigma_s^3}{\Delta g_V^3} \cdot n \cdot \Delta g_V + 4 \cdot \pi \cdot \sigma_s \cdot \frac{4\sigma_s^2}{\Delta g_V^2} \cdot n$$

Общее увеличение свободной энергии равно 1/3 работы образования поверхности раздела зародышей критического размера

$$\Delta G_{кр} = -\frac{32}{3} \cdot \frac{\pi\sigma_s^3}{\Delta g_V^2} \cdot n + \frac{16\pi\sigma_s^3}{\Delta g_V^2} \cdot n = \frac{16}{3} \cdot \frac{\pi\sigma_s^3 n}{\Delta g_V^2}$$

$$\Delta G = 0 \rightarrow r_0 = -\frac{\sigma_s}{\Delta g_V}$$

1. $r < r^*$. Поверхность частиц велика по сравнению с V;
2. $r \geq r^*$. Первый член (объемная энергия) растет быстрее второго;
3. $r = r_0$. $\Delta G = 0$. Увеличение свободной энергии, вследствие образования межфазной поверхности раздела, полностью компенсируется за счет перехода части атомов из жидкой фазы в твердую, которая обладает меньшим уровнем свободной энергии
4. $\Delta G < 0$ для $r > r_0$. При фазовом переходе, свободная энергия системы будет уменьшаться.



Не всякая частица новой фазы будет являться зародышем, только те, размер которых приводит к уменьшению свободной энергии, $r > r^*$

1. Если радиус зародыша $r = r_{кр}$, то при присоединении к нему даже одного атома, делает его *Центром кристаллизации*, который будет расти.
2. Вероятность образования центра кристаллизации равна произведению вероятностей образования зародыша критических размеров p_1 и присоединения к нему частицы p_2 , т. е. $p = p_1 \times p_2$.
3. Вероятность необходимой энергетической флуктуации равна $p_1 = \exp(-\Delta G_{кр}/kT)$.
4. Вероятность присоединения к зародышу хотя бы одной частицы равна $p_2 = s^* e \nu \times \exp(-U/kT)$, где s^* —число атомов в жидкости, находящихся в контакте с поверхностью зародыша; e — вероятность скачка атомов в данном направлении; ν — частота колебаний атомов в жидкости ($\nu = 10^{13} \cdot \text{с}^{-1}$); U —энергия активации диффузии атомов в жидкости, определяющая подвижность атомов.
5. Вероятность образования центра кристаллизации равна отношению числа возникших в единицу времени в единице объема расплава центров кристаллизации n к общему числу частиц в расплаве N , т. е. $p = n/N$. Величина n , называемая скоростью возникновения центров кристаллизации. $n = p \times N = p_1 \times p_2 \times N$. Размерность $[n]$ — $\text{м}^{-3} \times \text{с}^{-1}$.

Число возникших в единицу времени в единице объема расплава центров кристаллизации

n

=

Число критических зародышей

$\times$

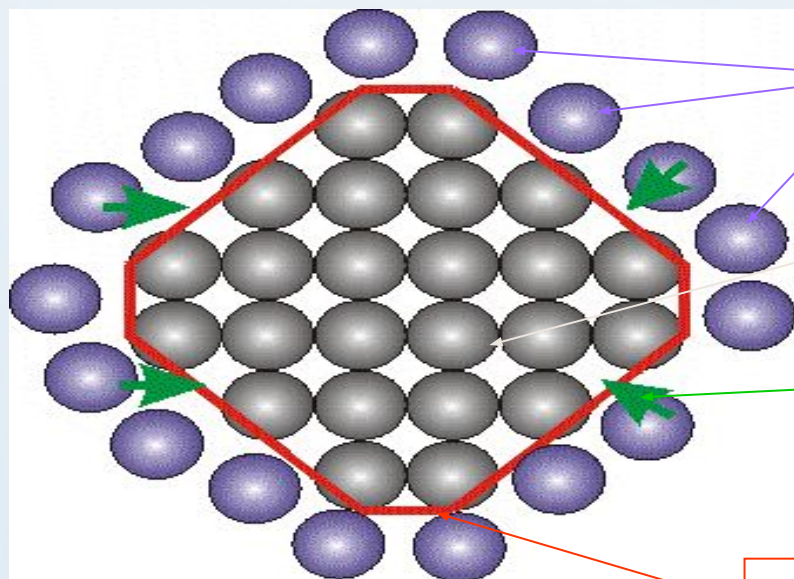
Частота их образования

$$N^* = N_t e^{\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right)}$$

Число частиц/объем

$$\nu' = e s^* \nu e^{\left(-\frac{U}{kT}\right)}$$

$\nu \rightarrow$ частота колебаний атомов ($\sim 10^{13}$ /с)



s^* атомы жидкости окружают зародыш

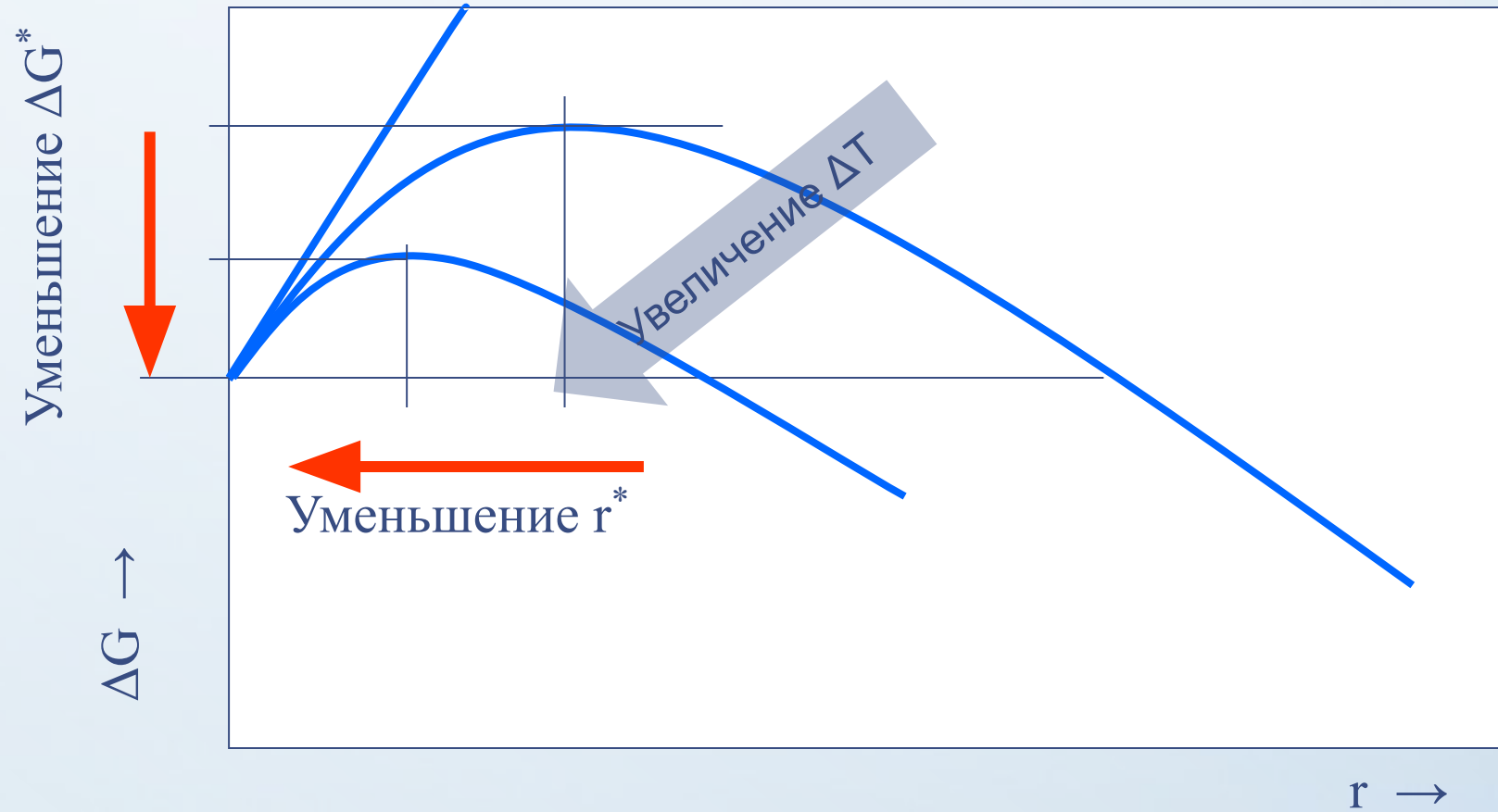
Критический зародыш

Подход атомов к частице делают ее сверхкритической $\rightarrow$ зарождение (U —энергия активации диффузии атомов в жидкости, определяющая подвижность атомов)

Критический размер зародыша

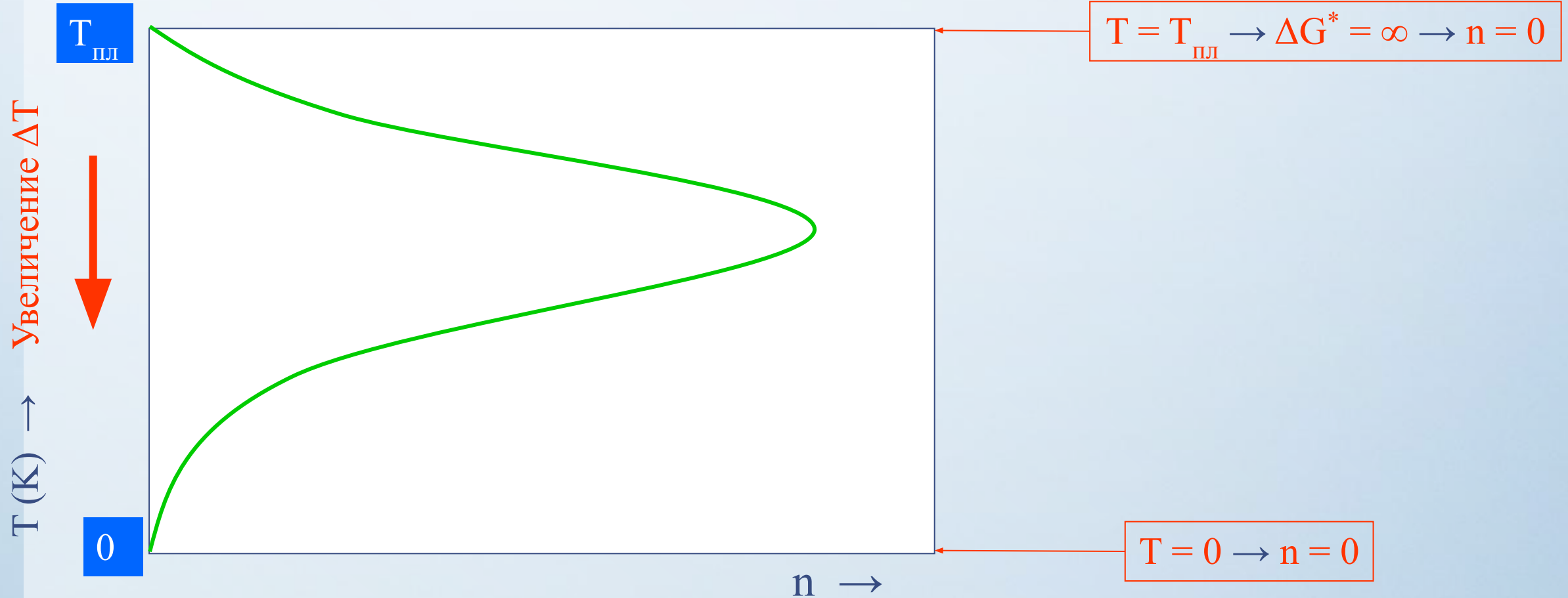
$$\Delta G_v = f(\Delta T)$$

Уменьшение объемной свободной энергии как
функции переохлаждения



$$n = Ne s^* v e^{-\left(\frac{\Delta G^* + U}{kT}\right)}$$

$\Delta G^* \uparrow \Rightarrow n \downarrow$
 $T \uparrow \Rightarrow n \uparrow$



Гетерогенное образование зародышей



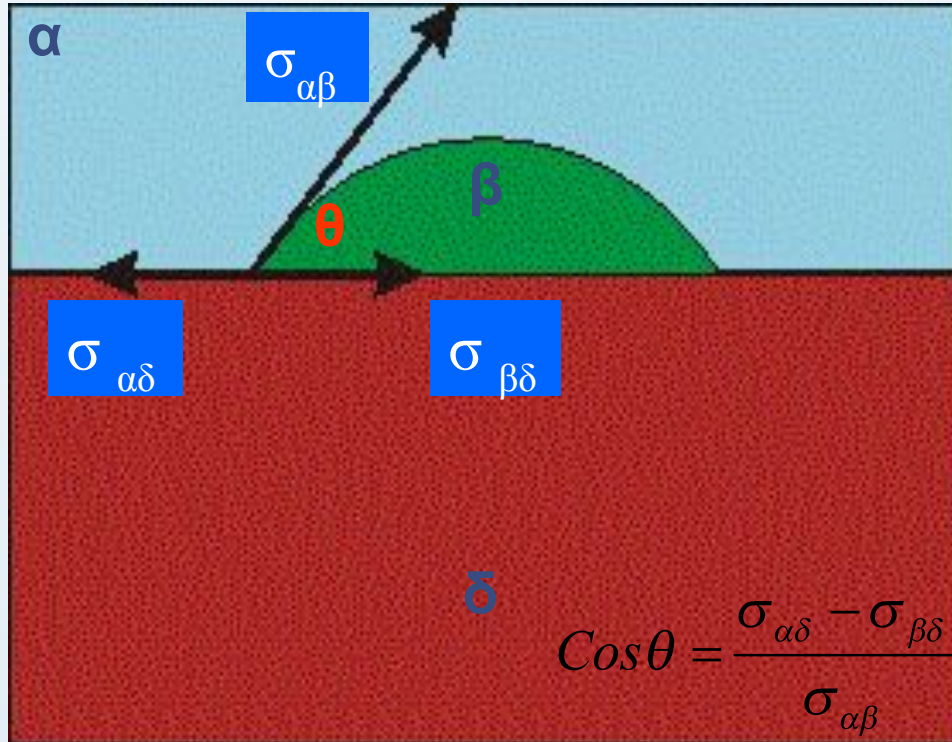
Такое зарождение представляет собой предпочтительное образование зародышей в местах исходной фазы с повышенной свободной энергией.

Предпочтительными местами зарождения являются частицы примесей, стенки.

Требуется гораздо меньшее переохлаждение, чем при гомогенном образовании.

Гетерогенное образование зародышей

Рассчитаем изменение свободной энергии при образовании зародыша β -фазы, который находится в контакте с α и ограничен участком сферической поверхности радиусом R и участком плоской поверхности δ радиусом r .

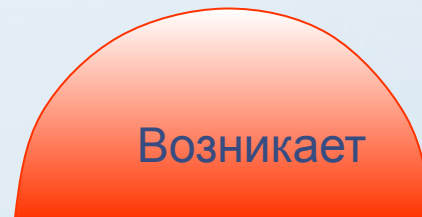


Межфазная энергия

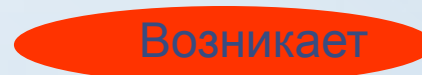
По условию равновесия:

$\sigma_{\alpha\beta} \cos\theta = \sigma_{\alpha\delta} - \sigma_{\beta\delta}$, θ – краевой угол смачивания

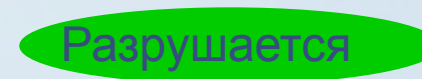
$$h = R * (1 - \cos\theta) \quad v_{\text{зар}} = \pi h^2 (R * - h / 3)$$



$$S_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta}$$



$$S_{\beta\delta} \sigma_{\beta\delta}$$



$$S_{\alpha\delta} \sigma_{\alpha\delta}$$

Баланс сил поверхностного натяжения

$$\longrightarrow \sigma_{\alpha\beta} \cos \theta + \sigma_{\beta\delta} = \sigma_{\alpha\delta}$$

$$\Delta G = (V_{\beta}) \Delta G_{V\beta} + (S_{\alpha\beta}) \sigma_{\alpha\beta} + (S_{\beta\delta}) \sigma_{\beta\delta} - (S_{\alpha\delta}) \sigma_{\alpha\delta}$$

$$V_{\beta} = \pi h^2 (3R - h) / 3$$

$$S_{\alpha\beta} = 2\pi R h$$

$$h = (1 - \cos \theta) R$$

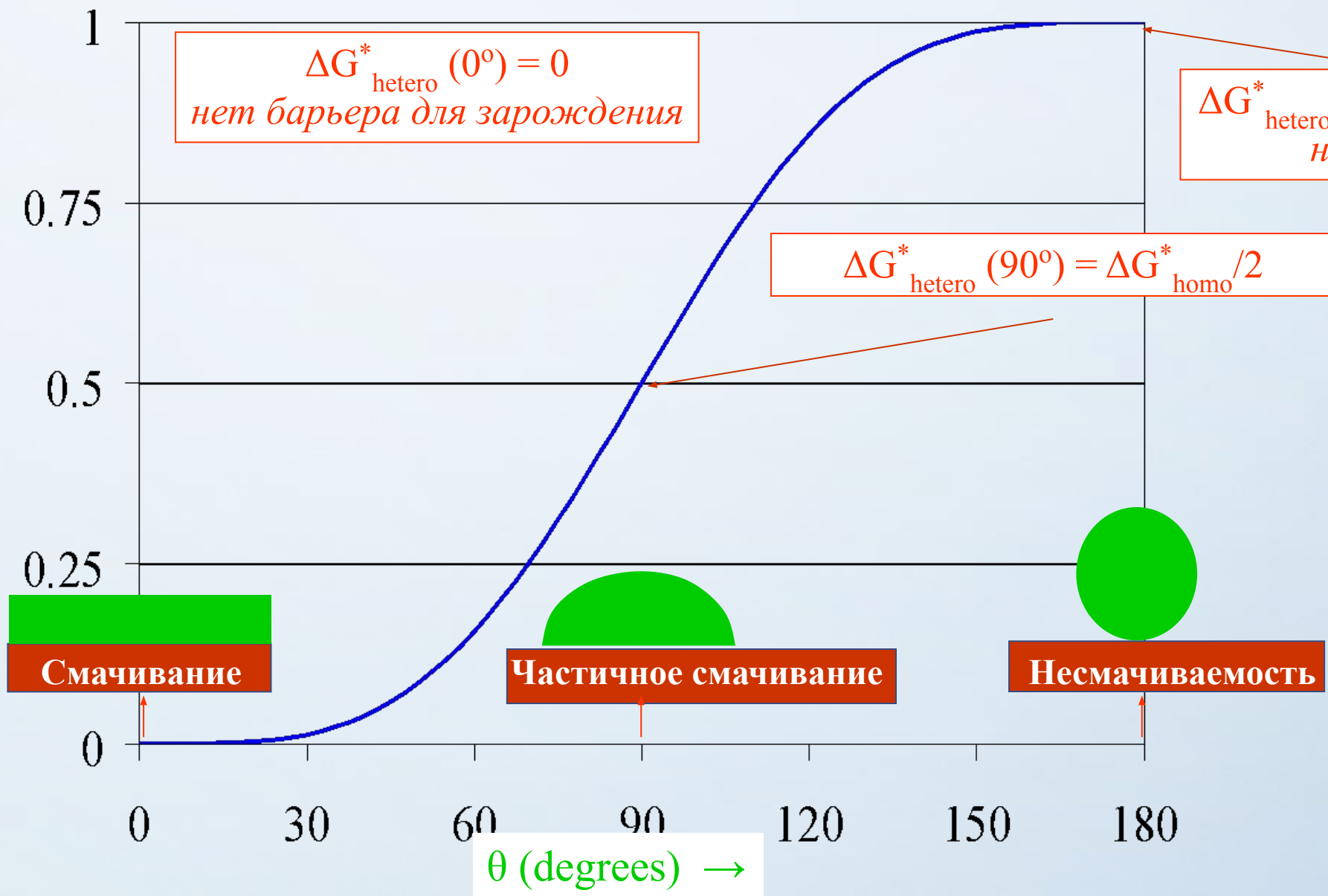
$$r_{\alpha\delta} = R \sin \theta$$

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 \longrightarrow r_{hetero}^* = -\frac{2\sigma_{\alpha\beta}}{\Delta G_v}$$

$$\Delta G_{hetero}^* = \frac{4}{3} \pi \frac{\sigma_{\alpha\beta}^3}{\Delta G_v^2} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)$$

$$\Delta G_{hetero}^* = \frac{1}{4} G_{homo}^* (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)$$

$\Delta G^*_{\text{hetero}} / \Delta G^*_{\text{homo}} \rightarrow$

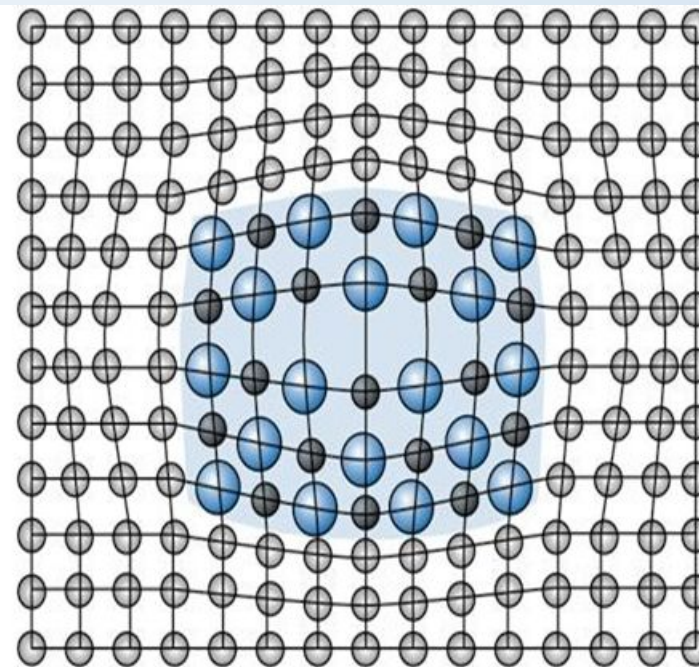
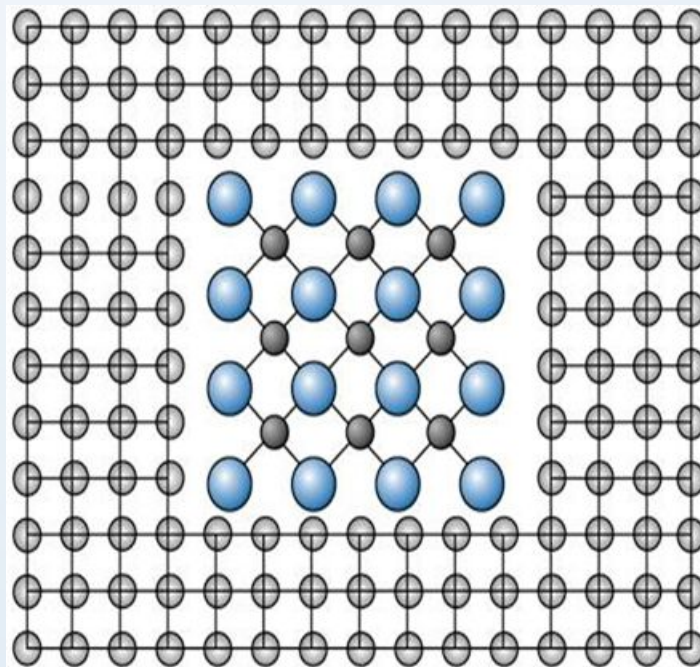


$$\cos \theta = \frac{\gamma_{\alpha\delta} - \gamma_{\beta\delta}}{\gamma_{\alpha\beta}}$$

Поверхностное натяжение на границе частица-зародыш тем меньше, чем более сходна их кристаллическая структура.

Поверхностная энергия границы зародыш-частица зависит от структуры. Существует три типа границ:

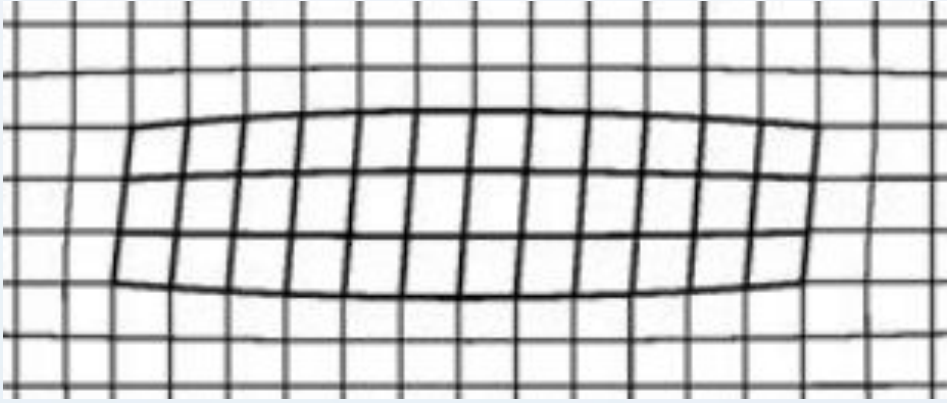
- полукогерентные;
- когерентные;
- некогерентные.



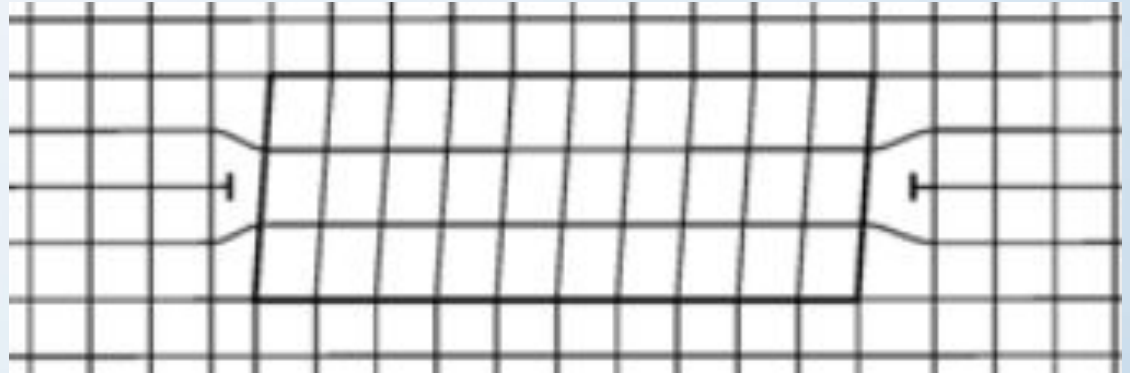
Принцип структурного и размерного соответствия

Конобеевский С.Т. При кристаллизации минимум свободной энергии обеспечивается при максимальном сходстве в расположении атомов на соприкасающихся гранях старых и новых фаз.

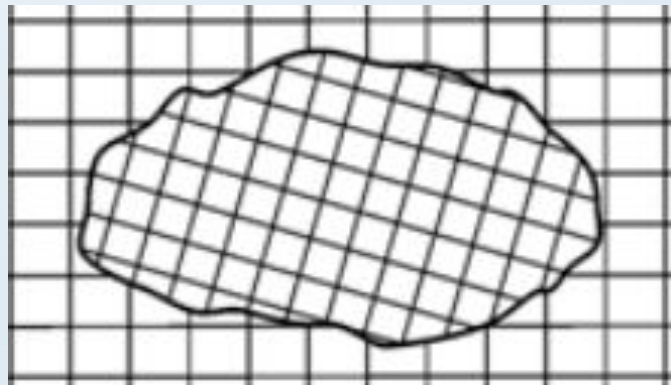
Поверхностная энергия границы зародыш-частица зависит от структуры. Существует три типа границ:



Когерентные межфазные границы

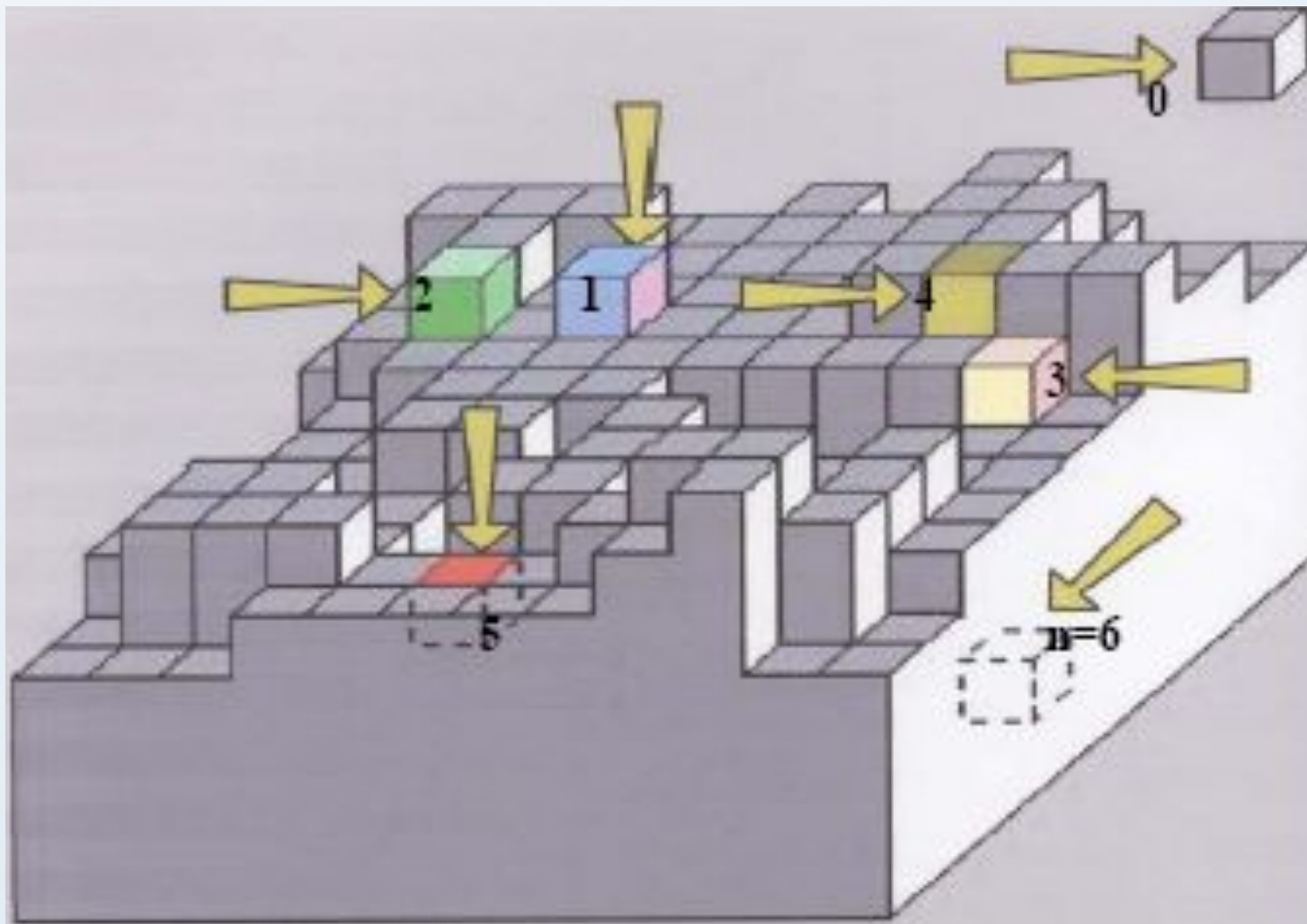


Полукогерентные



Некогерентные

Механизм роста кристаллов



Рост трехмерного зародыша возможен путем присоединения новых целых участков одноатомной толщины — двумерных зародышей.