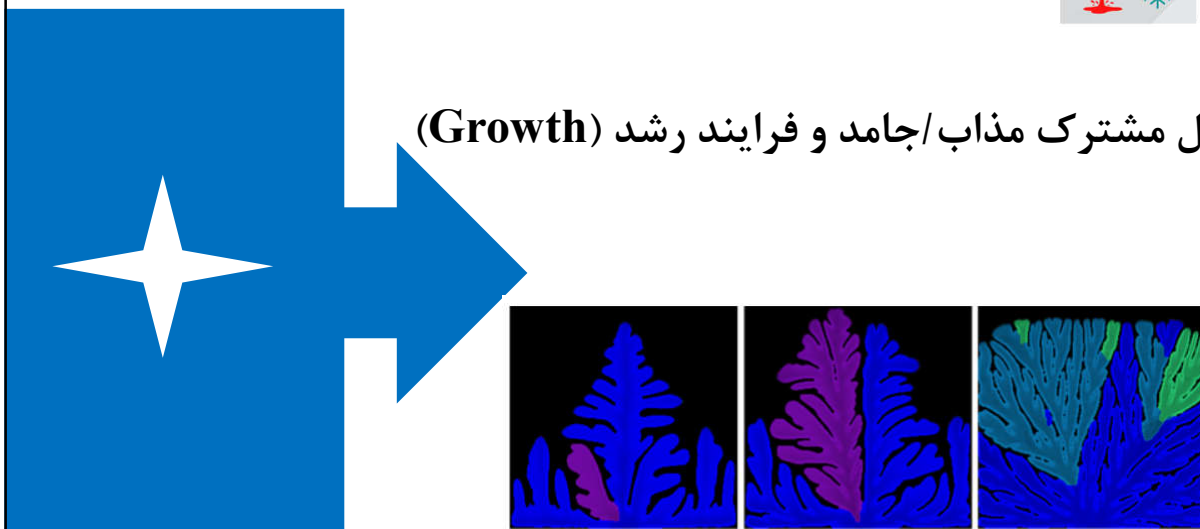


فصل مشترک مذاب/جامد و فرایند رشد (Growth)



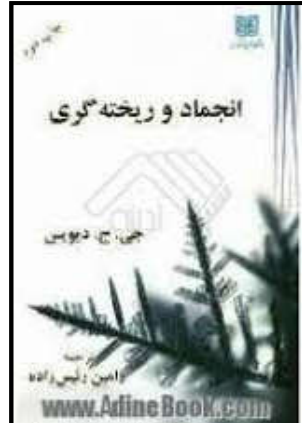
فهرست مطالب

- 1 مقدمه (تعریف فصل مشترک و رشد)
- 2 مشخصات فصل مشترک و انواع آن
- 3 عوامل موثر بر تشکیل نوع فصل مشترک، ترمودینامیک فصل مشترک، آنالیز جکسون و شرایط تشکیل فصل مشترک ناهموار و هموار (Facetted, Non-Facetted)
- 4 مکانیزم و نرخ رشد
- 5 عیوب رشد

References



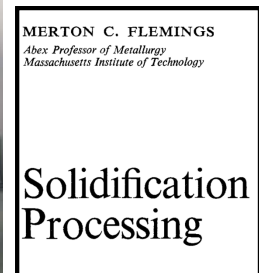
فصل پنجم



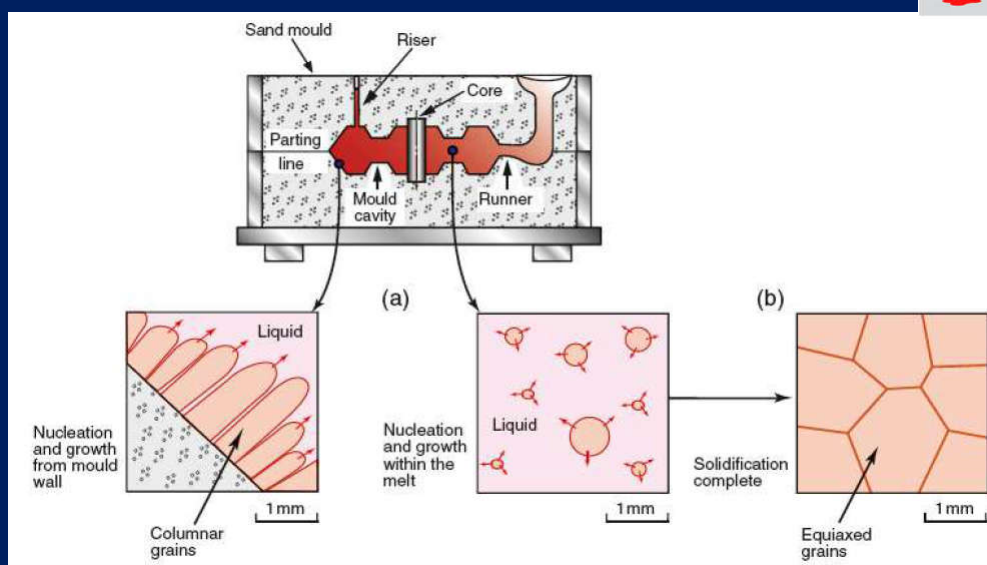
فصل سوم



فصل چهارم



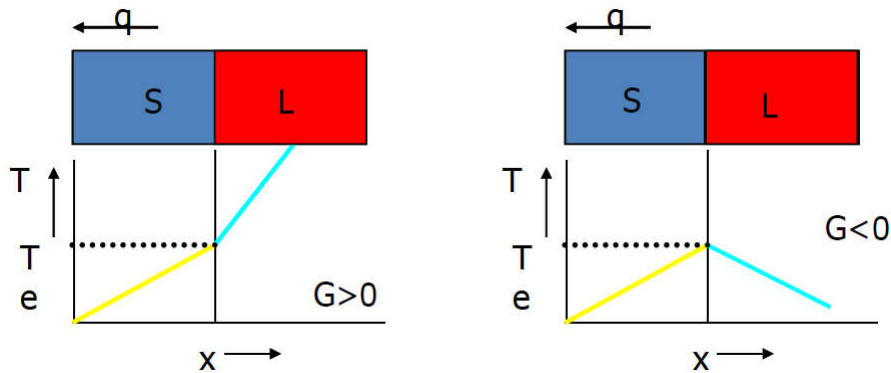
فصل نهم



مورفولوژی رشد در انجماد فلزات خالص



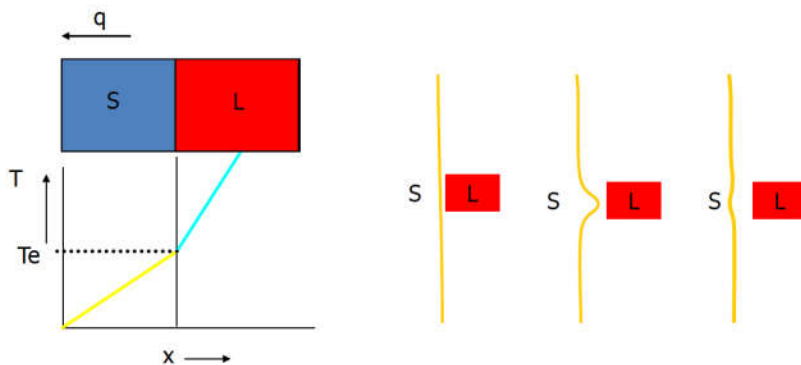
شیب حرارتی یا گرادیان حرارتی (Temperature Gradient) که با G نشان می‌دهند عبارت است از شیب حرارتی در جلوی فصل مشترک جامد-مایع در راستای رشد فصل مشترک.



مورفولوژی رشد در انجماد فلزات خالص



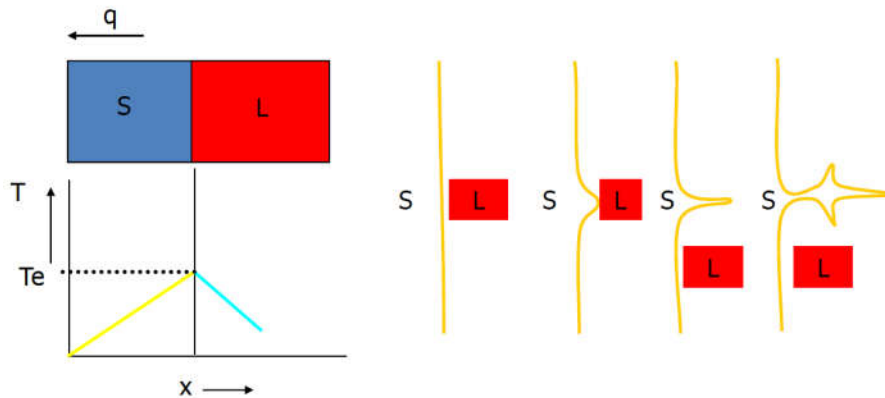
اگر شیب حرارتی در جلوی جبهه انجماد مثبت باشد و جبهه انجماد در داخل مذاب فوق‌گداز شده حرکت کند، هر میخچه‌ای که به طور اتفاقی در روی جبهه انجماد ایجاد شود نوک آن در فوق‌گداز قرار گرفته و ذوب میشود و جبهه انجماد مسطح می‌ماند.



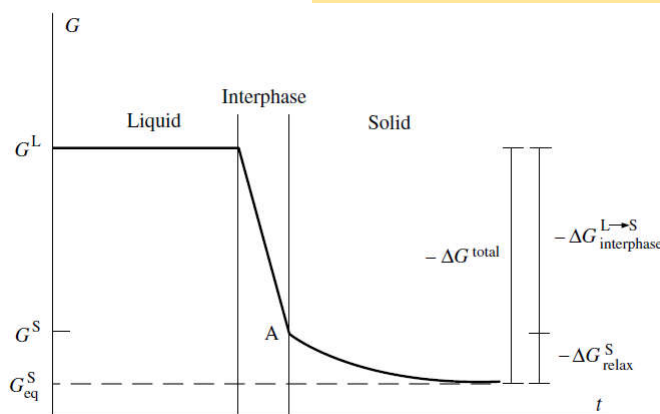
مورفولوژی رشد در انجماد فلزات خالص



اما در مواردی که شیب حرارتی در جلوی جبهه انجماد منفی باشد جبهه انجماد در داخل مذاب تحت تبرید شده حرکت می کند لذا هر میخچه ای که به طور اتفاقی در روی جبهه انجماد ایجاد شود نوک آن در تحت تبرید قرار گرفته و دندریت پایدار (از نوع حرارتی) تشکیل می شود.



فصل مشترک مذاب/ جامد



Gibbs' free energy of the atoms in the vicinity of the liquid/solid interphase.

the total driving force for solidification consists of two parts, one for rearranging the 'liquid' atoms into an ordered solid lattice, and the other for the relaxation process in the solid. The total driving force can be written (1 kmol instead of 'per atom')

$$-\Delta G^{\text{total}} = (-\Delta G_{\text{interphase}}^{\text{L} \rightarrow \text{S}}) + (-\Delta G_{\text{relax}}^{\text{S}})$$

تعریف فصل مشترک مذاب / جامد



به محض آنکه هسته جامد تشکیل شد، جامد و مایع در کنار هم قرار می گیرند و بدیهی است در این حالت منطقه یا مرزی در بین آن ها وجود دارد که اتم های آن در سطحی از انرژی قرار دارند که به هیچ یک از دو حالت مذکور تعلق نداشته ولی به طور نسبی و کم دامنه شباهت هایی را نیز به هریک از دو حالت فوق نشان می دهند. این منطقه را فصل مشترک جامد - مایع می نامند.

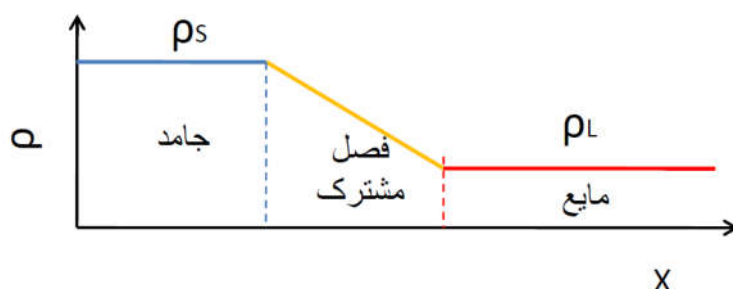
46

تعریف فصل مشترک مذاب / جامد



✓ تمام خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و ترمودینامیکی ماده در عرض فصل مشترک به صورت شیب دار تغییر می کند.

✓ چگالی جامد بیشتر از چگالی مایع باشد، در فصل مشترک جامد/مایع در جبهه انجماد، چگالی به صورت شیبدار تغییر کرده و از چگالی جامد به چگالی مایع می رسد.

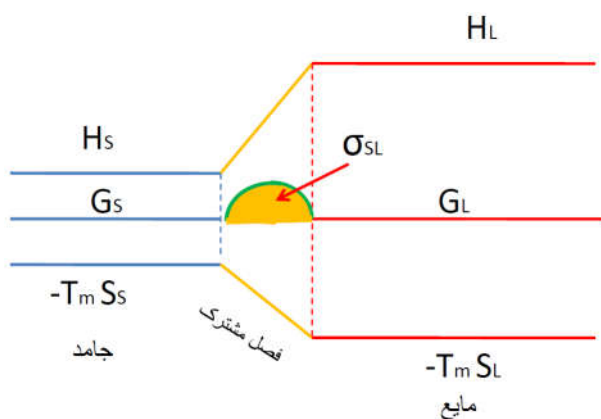


✓ به همین ترتیب خواص مکانیکی ماده از قبیل مدول یانگ و یا استحکام کششی و غیره نیز به صورت شیبدار در عرض فصل مشترک تغییر می کنند.



تعریف فصل مشترک مذاب / جامد

همچنین کمیت های آنتالپی و آنترופی هم در عرض فصل مشترک زبر به صورت شیبدار تغییر می کنند



اگر فرض کنیم که سیستم جامد/مایع در درجه حرارت تعادلی باشد میتوان تغییرات انرژی آزاد گیبس را در فصل مشترک جامد/مایع به صورت نمودار زیر نشان داد:

انرژی فصل مشترک مذاب / جامد



- ☐ مطالعه فصل مشترک مایع و جامد با مطالعه **اتم های سطحی** آغاز می شود.
- ☐ اتم های یک مجموعه با عدد همسایگی C_m و نیروی اتصال L_m مشخص شود.
- ☐ اتم های سطحی دارای **همسایه کمتری** بوده و به همین دلیل (بی نظمی) شرط پایداری آن ها **افزایش انرژی داخلی** است که به **تعداد باندهای حذف شده** بستگی دارد.

انرژی فصل مشترک مذاب / جامد

□ جدا کردن و ذوب هر اتم از این نوع به گرمای کمتری نیاز دارد که مقدار آن برابر تفاوت حاصل از گرمای نهان گداز اتمی و افزایش انرژی داخلی است.

$$L_m^s = (L_m - H^s)$$

مشخصات صفحه	عدد همسایگی	گرمای نهان گداز (اتمی)	انرژی سطحی (اتمی)
همسایگی درونی (تمام صفحات)	۱۲	L_m	۰
همسایگی سطحی [۱۱۱]	۹	$\frac{3}{4} L_m$	$\frac{1}{4}$
همسایگی سطحی [۱۰۰]	۸	$\frac{2}{3} L_m$	$\frac{1}{3}$

انرژی فصل مشترک مذاب / جامد

عنصر	انرژی فصل مشترک 10^{-3}Cal/Cm^2 (10^{-3}J/m^2)	عنصر	انرژی فصل مشترک 10^{-3}Cal/Cm^2 (10^{-3}J/m^2)	انرژی فصل مشترک گرمای نهان گداز
Hg	(۶۶) ۱۵/۷۶	Au	۰/۵۳	۰/۴۴
Mn	(۲۰۷) ۴۹/۴۴	Sn	۰/۴۸	۰/۴۲
Ag	(۱۲۶) ۳۰/۲۴	Co	۰/۴۶	۰/۴۱
Fe	(۲۰۵) ۴۸/۹۲	Pb	۰/۴۵	۰/۳۹
Cu	(۱۷۸) ۴۲/۴۸	Bi	۰/۴۴	۰/۳۳
Ni	(۲۶۰) ۶۱/۲	Sb	۰/۴۴	۰/۳

تعریف رشد در انجماد:

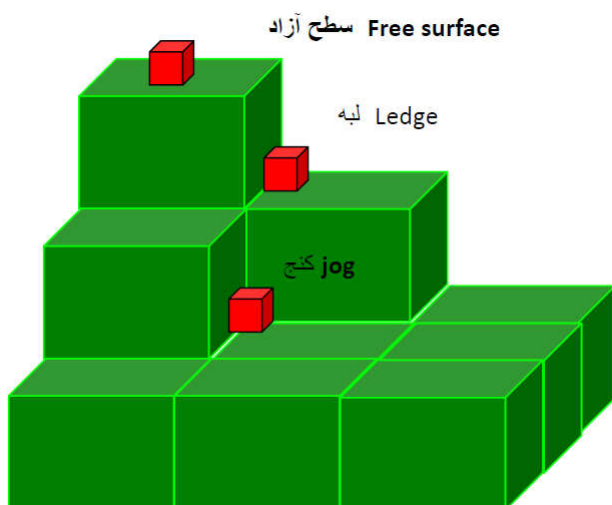
الحاق اتم ها و مولکول ها به فصل مشترک مایع - جامد و انتقال آن ها به فاز جامد.



عوامل موثر در رشد:

- ۱- ساختمان فصل مشترک
 - ۲- اثرات موئینگی (مسائل کشش سطحی)
 - ۳- انتقال حرارت و انتقال جرم در فصل مشترک
- (گرادیان های حرارتی و غلظتی در فصل مشترک و سینتیک انتقال اتم ها)

فاکتور جایابی Accomodation Factor



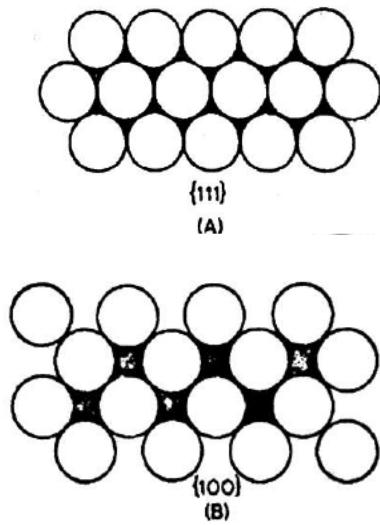
✓ احتمال الحاق موفقیت آمیز یک اتم به فصل مشترک با فاکتور جایابی سنجیده می شود.

✓ هرچه این احتمال بیشتر باشد فاکتور جایابی بیشتر است.

✓ اتم هایی که مایع را ترک کرده و به فصل مشترک جامد-مایع ملحق شده اند و در سه موقعیت **سطح آزاد**، **لبه** و **کنج** قرار گرفته اند

پرسش: فاکتور جایابی کدام موقعیت بیشتر است و چرا؟

فاکتور جایابی Accomodation Factor

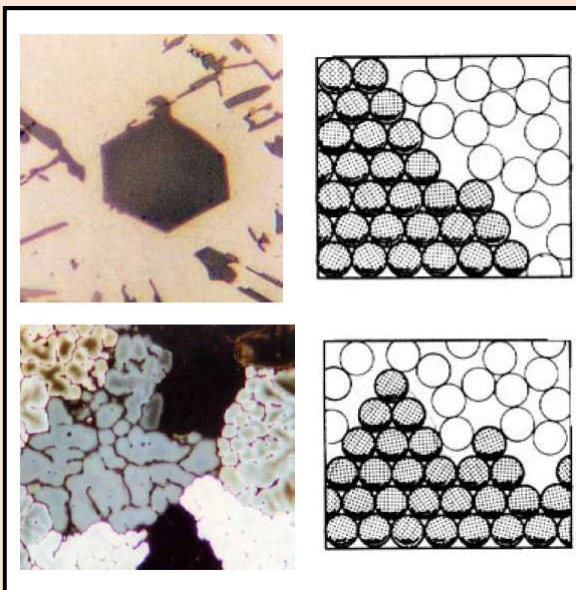


هرچه فشردگی اتمی در فصل مشترک بیشتر باشد
فاکتور جایابی کمتر است و هرچه اتم های فصل
 مشترک از هم فاصله دار تر باشند. **فاکتور جایابی**
 بیشتر است. در شکل های دو بعدی باهم مقایسه شده
 اند.

پرسش:

فاکتور جایابی FCC زیر صفحات $\{111\}$ و $\{100\}$
 در شبکه کدام صفحه بیشتر است و چرا؟

انواع فصل مشترک



Facetted

- Atomically smooth
- Non-metals
- Intermetallic phases

Non-facetted

- Atomically rough
- metals

❖ برای فصل مشترک نرم همچنین از عناوین فصل مشترک صاف، هموار
Close ,Sharp ,Smooth, Faceted, Non-diffused
Packed، نیز استفاده می شود.

❖ برای فصل مشترک زبر همچنین از عناوین فصل مشترک خشن، ناهموار
Rough, Non-faceted, Diffused، نیز استفاده می شود.

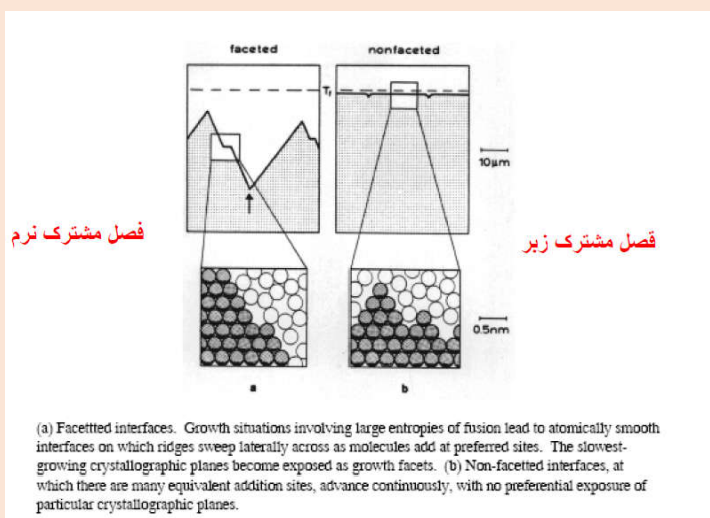
Faceted Interfaces

- small interfacial added-atom density
- small interfacial vacant site density
- narrow interfacial transition thickness,
e.g. 2–5 molecular spacings
- large free energy dissipation per layer
added

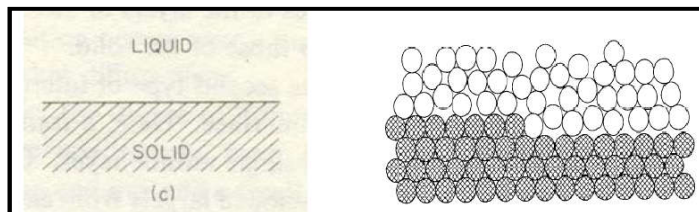
Non-faceted Interfaces

- higher interfacial concentration of added-atoms
- higher interfacial population of vacant sites
- difficulty in distinguishing added-atoms on one atomic layer from vacant sites on an adjacent layer
- relatively wide, i.e. diffuse, interfacial transition, e.g. 5–20 molecular spacings
- small free energy dissipated per layer added

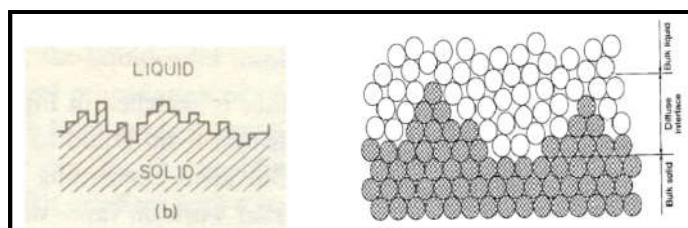
انواع فصل مشترک



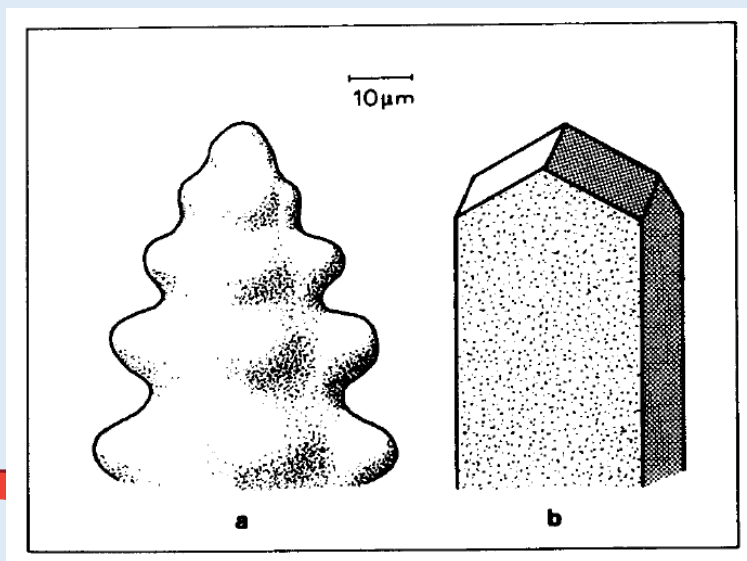
- اطلاعات در مورد نرم و زبر در مقیاس نانومتری (اتمی) به کار می رود.
- در مقیاس میکروسکوپی درست برعکس است. یعنی در تصاویر میکروسکوپی فصل مشترک نرم به شکل دندانه دار و زبر دیده می شود و فصل مشترک زبر به شکل خطوط صاف مشاهده می شود.



در فصل مشترک Facetted
انتقال اتم ها و ملکول ها از مایع
به جامد در عرض یک لایه اتمی
انجام می شود.

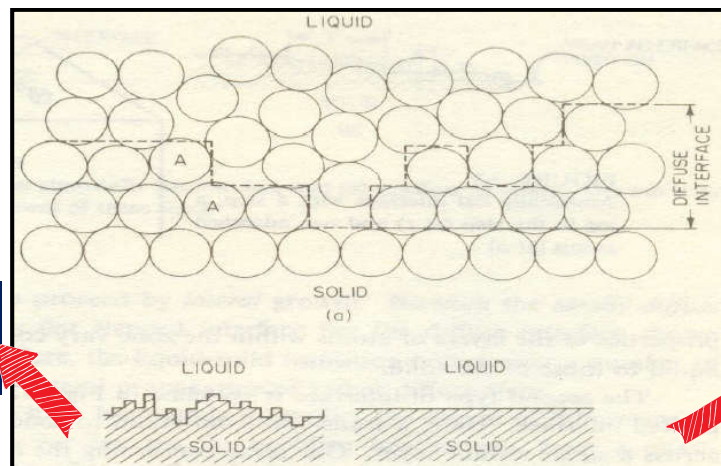


در فصل مشترک non-facetted
facetted انتقال اتم ها و
مولکول ها از مایع به جامد در
عرض چند لایه اتمی انجام می
شود. به عبارت دیگر ضخامت
فصل مشترک چند لایه اتمی
است.



Facetted

Non-Facetted



**Non
Facetted**

Facetted

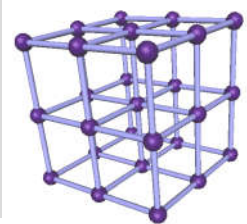
نکته: در فصل مشترک Facetted فاکتور جایابی و همچنین سرعت رشد پایین می باشند زیرا اتم های وارد شده باید مکان های خالی باقی مانده در یک صفحه را پر کنند. اما در فصل مشترک Non Facetted اتم در هر مکانی که وارد شود می تواند ملحق شود لذا فاکتور جایابی و سرعت رشد زیاد می باشند.

5

Solid-liquid interface structure



Solidification is by atom jumping from liquid into solid phases and attaching to the solid interface one by one. The easy that atom can attach themselves into growth solid interface depends on the interface structure. The interface structure is determined by thermodynamics of solidification.



آنالیز انرژی آزاد فصل مشترک

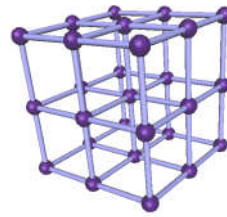


Suppose that an atom in solid has totally m bonds, each bond is then with energy of L_f/m .

For a perfect surface where all the possible atom positions are filled, the bonding energy for an atom at interface is

$$\frac{L_f}{m} (m_I + m_b)$$

In interface
In bulk



آنالیز انرژی آزاد فصل مشترک



For a non-perfect interface where only x fraction of atom positions are occupied

$$\frac{L_f}{m} (m_I x + m_b)$$

The difference between bonding energy at the perfect and fractal interfaces is

$$\frac{L_f}{m} (m_I + m_b) - \frac{L_f}{m} (m_I x + m_b) = \frac{L_f}{m} m_I (1 - x)$$

آنالیز انرژی آزاد فصل مشترک



N possible atom positions at interface

$$\Delta u = \frac{Nx}{2} \frac{L_f}{m} m_I (1-x) = \frac{N}{2} L_f \frac{m_I}{m} x(1-x)$$

The entropy for x occupations and 1-x vacancies

$$\Delta S_{\text{mix}} = -NK (x \ln x + (1-x) \ln(1-x))$$

The free energy change between the perfect and fractal

$$\Delta F = \Delta u - T \Delta S_{\text{mix}}$$

آنالیز انرژی آزاد فصل مشترک



$$\frac{\Delta F}{NKT_m} = \alpha x(1-x) + x \ln x + (1-x) \ln(1-x)$$

where

$$\alpha = \frac{\Delta H}{KT_m} \left(\frac{m_I}{m} \right)$$

۱- نوع ماده

۲- شرایط سرمایش (ΔT)

آنالیز جکسون

x کسر اشغال شده
اتم ها روی سطح

جکسون تغییرات انرژی سطحی را به ازای اضافه شدن اتم ها به فصل مشترک نرم بررسی کرده و رابطه زیر را ارائه داد:

ΔG_s

$$\frac{\Delta F_s}{NKT_m} = x \alpha (1-x) + x \ln x + (1-x) \ln (1-x)$$

N تعداد مکان های
ممکن روی سطح

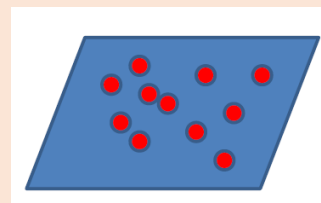
$$\alpha = \frac{\Delta H_m \xi}{KT_m} = \frac{\Delta S_f \xi}{K}$$

فاکتور
کریستالوگرافی

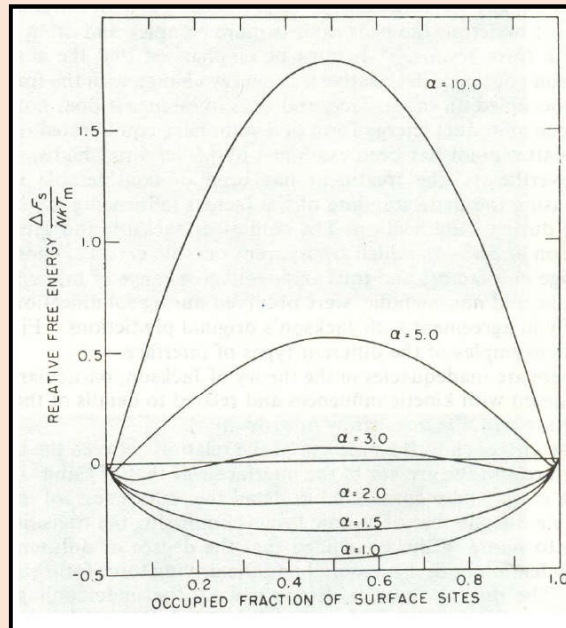
حداکثر عدد
همسایگی

$$\xi = \frac{\eta}{\gamma}$$

عدد همسایگی
در فصل مشترک



آنالیز جکسون



5

آنالیز جکسون



فصل مشترک زبر

① $\alpha \leq 2$

موادی که آنتروپی گداز پایین دارند مانند فلزات

فصل مشترک نرم

② $\alpha \geq 5$

غیرفلزات و مایعات آلی و غیر آلی

فصل مشترک بین دو حالت زبر و نرم

③ $2 < \alpha < 5$

سیلیسم و بیسموت

✓ آنالیز جکسون ارتباط بین جنس مواد و نوع فصل مشترک را مشخص می کند.

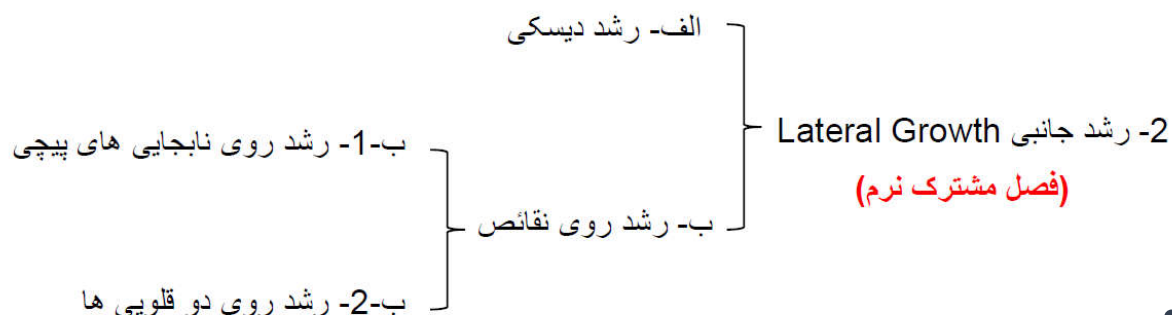
5

مکانیزم های رشد



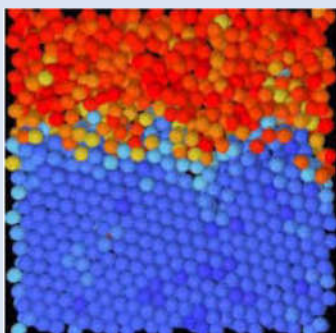
مکانیزمهای مختلف رشد بستگی به انواع مختلف فصل مشترک دارند. این مکانیزم ها به شرح ذیل هستند:

1- رشد پیوسته (Continuous Growth) (فصل مشترک زیر)



5

رشد پیوسته (continuous growth)



❖ فصل مشترک زیر است ← تمام مکان های فصل مشترک به طور یکسان قابلیت پذیرش اتم های وارد شده از مایع را دارند.

❖ اتم ها به صورت پیوسته و اتفاقی به فصل مشترک وارد می شوند و چون فاکتور جایابی بالا است هر اتم در هر موقعیت که وارد می شود میتواند به فصل مشترک ملحق شود.

5

رشد پیوسته (continuous growth)



An ideal diffuse liquid - solid interface is predicted to continuous growth at a rate varying linearly with the amount of undercooling at the interface.

• The jump rate of the atoms in a pure metal liquid :

$$\nu_l = 6D_l / \lambda^2$$

ν_l : jump rate of atoms in pure metal liquid

D_l : liquid diffusion coefficient

λ : the mean jump distance

$$D_l = \lambda^2 \nu_o \exp[-\Delta G_l / RT]$$

ν_o : atomic vibration frequency

$$\nu_l = 6\nu_o \exp[-\Delta G_l / RT]$$

ΔG_l : free energy of activation for liquid diffusion

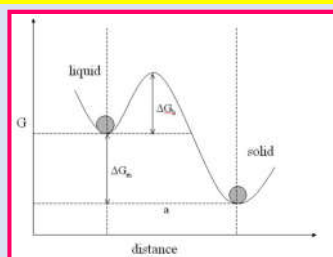
The rate of atoms jump from the liquid to solid

$$\nu_{ls} = \nu_l / 6 = \nu_o \exp[-\Delta G_l / RT]$$

The corresponding atomic jump rate from solid to liquid, ν_{sl} , involves the breaking the atomic bonds so, $\nu_{sl} = \nu_o \exp[-(\Delta G_l + \Delta G_m) / RT]$

5

رشد پیوسته (continuous growth)



ΔG_m : the free energy of melting

The net rate of interchange of atoms between solid to liquid :

$$\nu_{net} = \nu_{ls} - \nu_{sl} = \nu_o \exp[-\Delta G_l / RT] \cdot \{1 - \exp[-\Delta G_m / RT]\}$$

near the equilibrium freezing point, $\Delta G_m \ll RT$, so that

$$1 - \exp[-\Delta G_m / RT] \approx \Delta G_m / RT$$

$$\nu_{net} = \nu_o \exp[-\Delta G_l / RT] \cdot (\Delta G_m / RT) = D_l \Delta G_m / \lambda^2 RT$$

At T_m , the equilibrium freezing temp. $\Delta G_m = 0$

$$\Delta G_m = \Delta H - T_m \Delta S = 0$$

رشد پیوسته (continuous growth)



If undercooling should occur :

$$\Delta G_m = \Delta H - T\Delta S \neq 0$$

T : is the temp. at which freezing occurs. Now let $T = T_m - \Delta T$

$$\Delta G_m = \Delta H - T_m\Delta S + \Delta T\Delta S$$

Since most bulk metals tend to freeze at temp. very close to T_m

$$\Delta H - T_m\Delta S = 0 \Rightarrow \Delta S = \Delta H / T_m$$

$$\Delta G_m = \Delta H\Delta T / T_m$$

$$v_{net} = D_l \Delta H \Delta T / (\lambda^2 R T_m)$$

assumed λ equal to the lattice parameter (a),

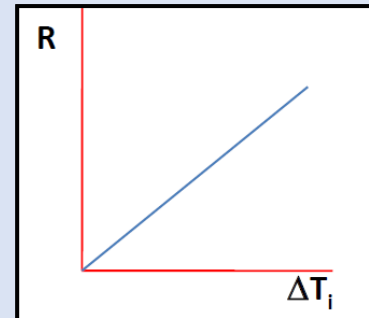
the rate of advance of the interface, $V = a \times v_{net}$

$$V = a v_{net} = \beta D_l \Delta H_m \Delta T / (a R T_m^2)$$

simplified

$$V = B \Delta T$$

the solidification rate of a diffuse interface is a linear function of the interface supercooling



Consider a pure nickel single crystal growing with a planar interface at a velocity of 10^{-5} m/s. Assuming growth by the continuous growth mechanism, calculate the growth constant and the kinetic undercooling.



Answer:

To conserve units consistency, the growth constant in Eq. (15.26) is written as:

$$\mu_o = \beta D_L \Delta H_f / (a k_B N_A T_f^2)$$

N_A is Avogadro's number. Assuming $\beta = 1$ (which is true if $a = \lambda$ and $v_{LS} = v_L/6$) and taking $D_L = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ it is calculated that $\mu_o = 7.84 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Note that, again for units consistency, the latent heat must be expressed in J/mole. Then: $\Delta T_k = V/\mu_o = 1.28 \cdot 10^{-3} \text{ K}$.

- 9-5 What is the approximate kinetic undercooling of the liquid-solid interface in a pure nickel single crystal growing with a plane front 10^{-3} cm/s ? (Assume continuous growth.) Explain why the solidification rate of metals is seldom limited by interface kinetics. Assume $D_L = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, $V_s = 6.6 \text{ cm}^3/\text{mol}$, $\Delta H = -4,320 \text{ cal/mol}$.

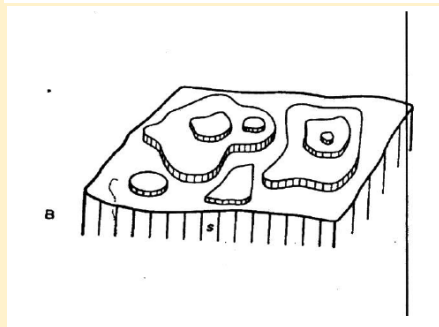
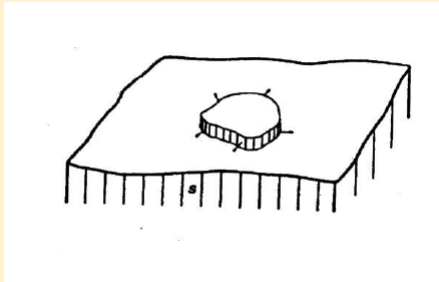
From equation 9-30:

$$\Delta T_K = - \frac{R a k_M^2}{D_L \Delta H_M}$$

$$= - \frac{(10^{-3})^3 \sqrt{\frac{6.6}{6.02 \times 10^{23}}} (1.99) (1726)^2}{(5 \times 10^{-5}) (-4320)}$$

$$\Delta T_K = 6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



■ در این نوع رشد فصل مشترک نرم است.

■ اگر یک اتم به صورت مجزا و منفرد مایع را ترک کرده و به فصل مشترک ملحق شود چون باعث افزایش انرژی می شود نمی تواند به صورت پایدار روی سطح بماند و لذا به مایع بر میگردد. (فاکتو جاییابی در این حالت پایین است).

■ اما اگر تعدادی اتم به صورت یکجا و خوشه ای به صورت یک دیسک به فصل مشترک وارد شوند، اگر شعاع دیسک از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد r^* این دیسک پایدار شده و به صورت جانبی رشد می کند تا یک صفحه کامل تشکیل شود.

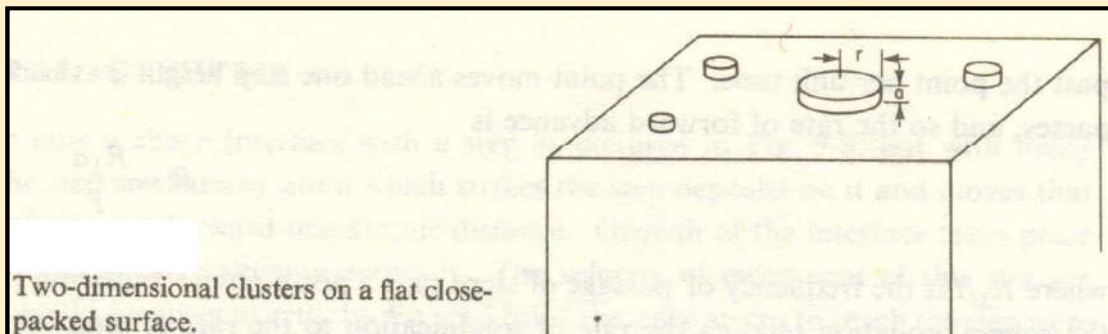
5

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



The free-energy barrier ΔG_{ai}^* required to form a critical two-dimensional cylindrical nucleus of step height a

$$\Delta G_{Gi}^* = 2\pi r^* a \sigma + \pi r^{*2} a \frac{\Delta G}{V_s}$$



Two-dimensional clusters on a flat close-packed surface.

5

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



the undercooling ΔT for which the critical nucleus of single radius of curvature r^* will neither melt nor freeze is

$$\Delta T = -\frac{\sigma T_M V_m}{\Delta H_m r^*}$$

the number of critical two dimensional nuclei per unit area n_{gi}^* is

$$n_{gi}^* = n_s e^{-(\Delta G_{gi}^*/kT)}$$

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



The rate of formation of new nuclei is then given simply as

$$I_{2d} = n_{gi}^* \omega^* v_{LS}$$

where I_{2d} is the nucleation rate (per unit area), n_A^* is the number of critical nuclei per unit area, and ω^* is the number of atoms sufficiently close to the edge of the critical nucleus so that they reach it when jumping from liquid to solid; v_{LS} is the jump frequency from liquid to solid.

rate of growth by two-dimensional nucleation

the rate of nucleation times the surface area of the growing face A .

$$R = AI_{2d}a$$

A is the surface area of the growing plane.

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



For a cylindrical nucleus this is

$$\omega^* = \frac{2\pi r^*}{a} (2 + g^{-1/2})$$

step width is proportional to $g^{-1/2}$

where g varies from unity for the sharp step to a very small number for very diffuse interfaces.

the equation for rate of growth by two-dimensional nucleation can now be written as

$$R = B_3 \frac{D_L}{D_{LM}} e^{(\pi\sigma^2 a V_s / k \Delta H \Delta T_k)}$$

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



where the preexponential B_3 depends on the variables ΔT_k , g , and A . D_{LM} is the liquid diffusion coefficient at the equilibrium melting point, and so D_L/D_{LM} represents a correction to the growth rate from varying diffusivity. This expression has the form

$$R = B_3 \frac{D_L}{D_{LM}} e^{-(B'_3/\Delta T_k)}$$

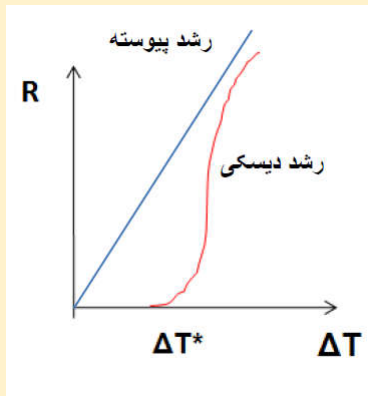
where both B_3 and B'_3 are constants. As in the case of homogeneous nucleation, quite large variations in B_3 should have little effect on overall growth rate.

سرعت رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



$$R = B_3 \frac{D_L}{D_{LM}} e^{-(B'_3/\Delta T_k)}$$

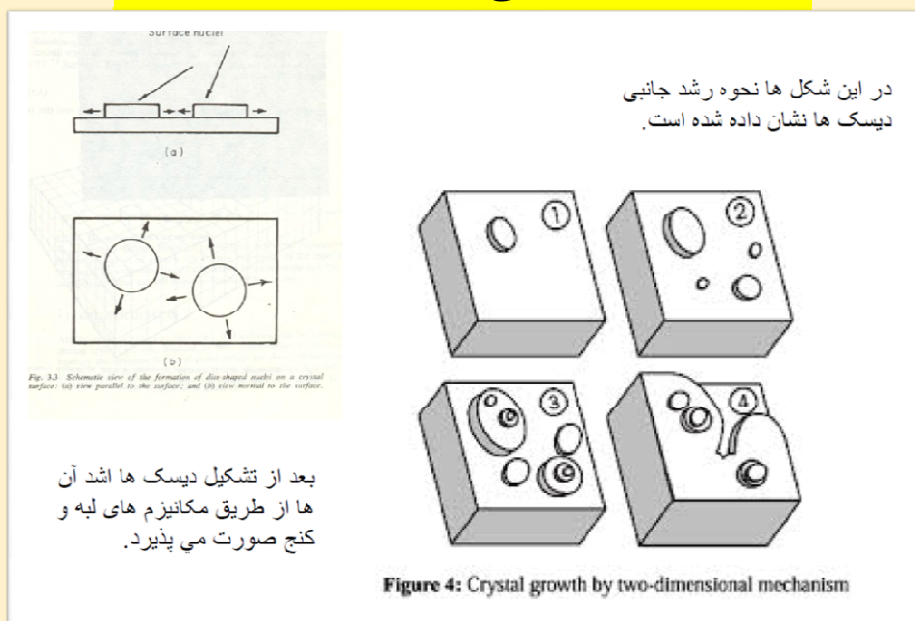
سرعت رشد دیسکی :



در تحت تبرید های زیاد سرعت رشد دیسکی به سرعت رشد پیوسته نزدیک شده لذا فصل مشترک نرم به فصل مشترک زبر تبدیل می شود.

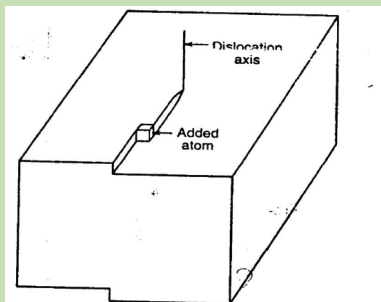
5

رشد دیسکی یا رشد دوبعدی



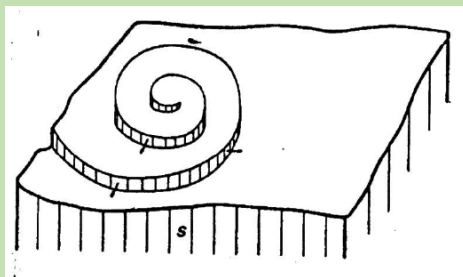
5

رشد روی نابجایی های پیچی (رشد حلزونی) Spiral Growth



➤ فصل مشترک از نوع نرم است

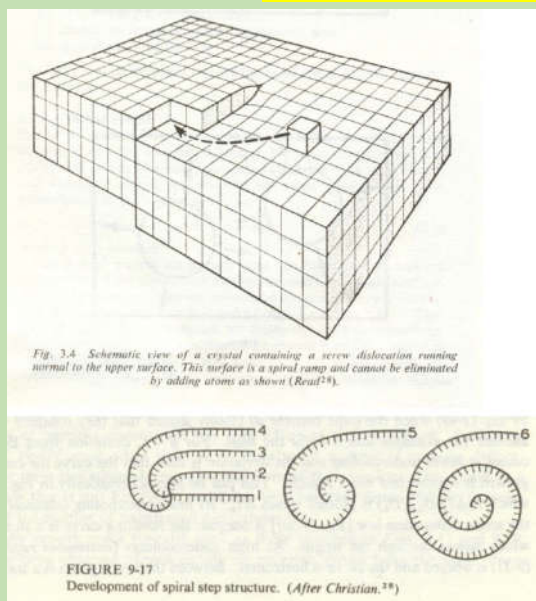
➤ اتم های وارد شده به فصل مشترک بر روی مکان های کنج
که به دلیل نابجایی های پیچی روی فصل مشترک وجود
دارند قرار میگیرند.



➤ این مکان ها با الحاق اتم ها از بین نمی روند بلکه صفحه
تشکیل شده درروی سطح حول محور نابجایی می چرخد.

5

رشد روی نابجایی های پیچی (رشد حلزونی) Spiral Growth



شکل مقابل نحوه رشد حلزونی

اضافه شدن اتم

ها به فصل مشترک سبب چرخش

صفحه فصل مشترک می شود و این

پدیده تا جایی ادامه می یابد که شعاع

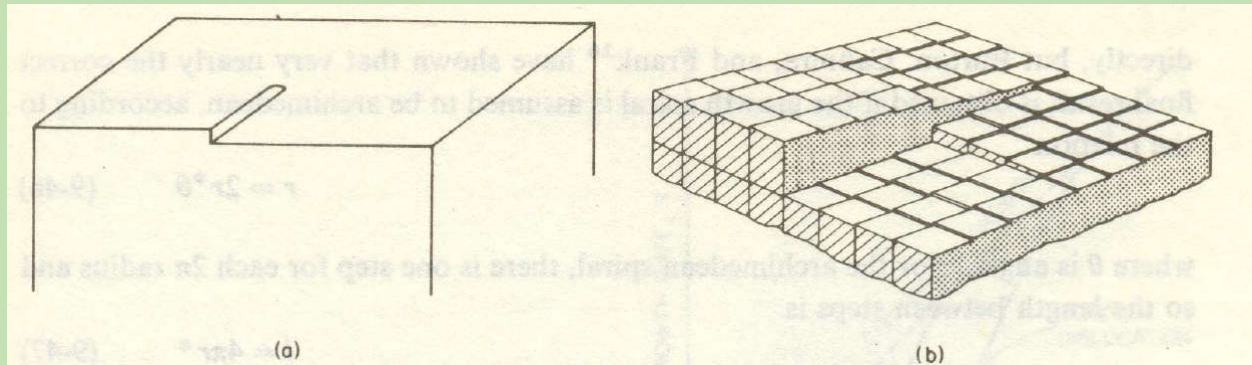
r^* چرخش به یک مقدار بحرانی

برسد.

5

رشد روی نابجایی های پیچی (رشد حلزونی)

Spiral Growth



در این مکانیزم سرعت رشد پایین است و به تعداد نابجایی های پیچی موجود روی سطح و فاصله آن ها از یکدیگر بستگی دارد.



5

سرعت رشد روی نابجایی های پیچی (رشد حلزونی)

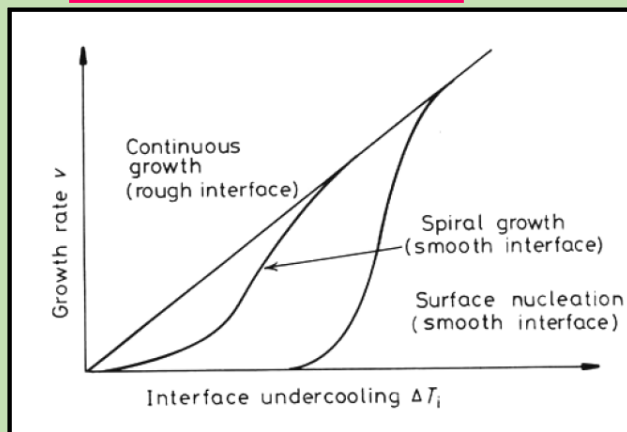
Spiral Growth



$$R = B_4 \frac{D_L}{D_{LM}} (\Delta T_k)^2$$

سرعت رشد حلزونی :

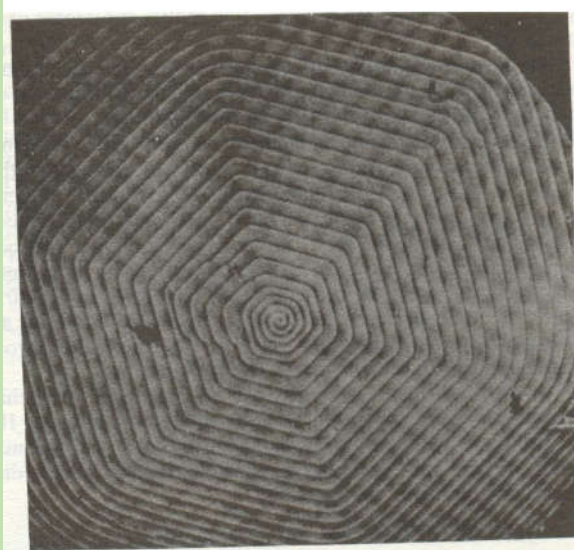
در مورد رشد حلزونی نیز با افزایش تحت تبرید، سرعت رشد زیاد شده



✓ در تحت تبرید های زیاد،
سرعت رشد حلزونی برابر
سرعت رشد پیوسته می شود
و فصل مشترک نرم به فصل
مشترک زبر تبدیل می شود.

5

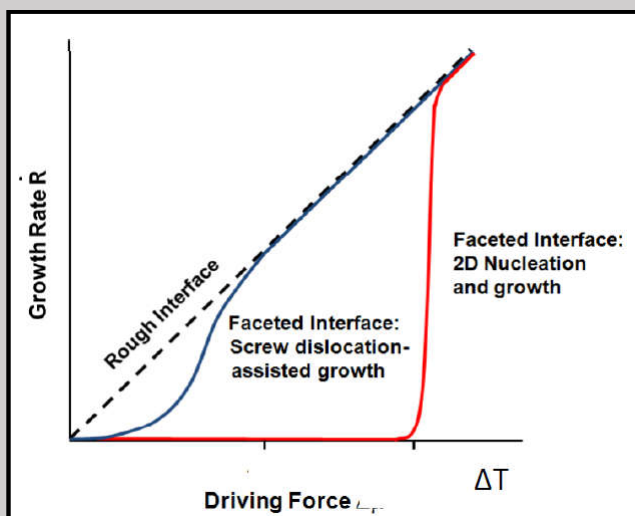
رشد روی نابجایی های پیچی (رشد حلزونی) Spiral Growth



این مکانیزم در رشد کریستال ها از محلول ها و از فاز بخار بسیار متداول است

5

رشد روی نابجایی های پیچی (رشد حلزونی) Spiral Growth



نوع فصل مشترک به جنس ماده و شرایط سرمایش بستگی دارد. چنانچه شرایط برای فصل مشترک نرم مهیا باشد، تمام مکانیزم های رشد دیسکی، رشد حلزونی و رشد روی دو قلویی ها ممکن است در نقاط مختلف فصل مشترک به صورت همزمان وارد عمل شوند.

5

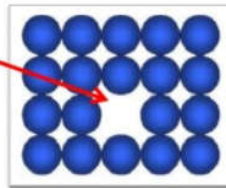
در خلال رشد عیوبی در **مقیاس اتمی** مانند **جای خالی و نابجایی ها** به وجود می آیند که به علت **افزایش آنتروپی** ماده از نظر ترمودینامیکی پایدار هستند.

تعداد جاهای خالی در جامدات در دمایی نزدیک به نقطه ذوب تعادلی از مرتبه 10^{-5} است.

این جاهای خالی در خلال انجماد به وجود می آیند اما پیش بینی نمی شود که پس از انجماد به صورت فوق اشباع باقی بمانند.

جای خالی

Point Defects - Vacancy



$$N_v = N_s \exp\left(\frac{-Q_v}{k_b T}\right)$$

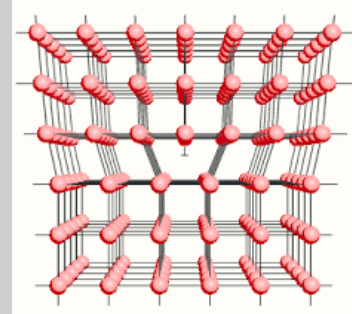
سرد کردن سریع جامد می تواند منجر به ایجاد فوق اشباع جاهای خالی در جامد گردد

چنان چه در سیستم ناخالصی وجود داشته باشد در حین تشکیل فصول مشترک سلولی یا دندریتی زیرساختاری از نابجایی ها به وجود خواهد آمد

وجود ناخالصی در خلال انجماد می تواند منجر به گسترش آرایه های نابجایی به صورت مرزهای فرعی گردد

دانسیتته نابجایی های به وجود آمده در حین رشد می تواند توسط تنش های حرارتی و مکانیکی افزایش یابد.

نابجایی



دانسیتته نابجایی ها از مرتبه 10^7 cm^{-3}

THE END