به‌نام دانای هستی‌بخش

جزوه خواص فیزیکی ۲

مدرس: دکتر محمد شاهمیری

تهیه‌کننده: هومن رحمانی

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject: خواص فیزیکی II

Year. Month. Date. ( )

خلاصه و نکات درس خواص فیزیکی II

الف) مهاجرت اتم در درون یک شبکه بلوری (نفوذ اتمی) : Diffusion in solids

۱- تعریف پدیده نفوذ

۲- تعیین و مقدار ضریب نفوذ اتمی (D)

۳- شرایط و توانایی حاکم بر نفوذ اتم

۳-۱- قانون اول فیک (Fick)

۳-۲- " دوم فیک و حل معادله دوم و بانیج های احتمالی

۳-۳- پارامترهای موثر بر نفوذ اتمی.

۴- حل تمرین و کاربردهای صنعتی پدیده نفوذ اتمی.

ب) تحولات فازی در جامدات :

۱- تعریف و تقسیم بندی تحولات فازی

- تحولات همراه با نفوذ اتمی

- " بدون " "

۲- جوانه زنی و رشد فاز جامد از جامد دیگر

۲-۱- انواع جوانه زنی ها :

- همگن

- غیر همگن

۲-۲- مکانیسم ها و مثال های جوانه زنی در سطوح فاز مادر

۲-۳- مکانیسم های رشد جوانه های فاز جامد

ج) مثال هایی از تحولات فازی در جامدات :

- ترک / سرسختی

- تحولات پوکشیدگی (خصوصاً در فولادها)

- تحولات Spindal

Massive

- تحولات منظم - نامنظم

- تحولات مارتنزیتی

در بحث تحولات فازی در جامدات باید با جزئیات پدیده انجماد و حالتی آن آشنایی کامل وجود داشته باشد

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject :

Year . Month . Date . ( )

در مثال اسپری عطر فاکتورهای زیر دخیل اند :

$\text{اسپری} = f(T, t, D, M, P)$ ← (T) ۱- دمای محیط (اتاق)

↓ (P) ۲- فشار

$P = \text{Const} = 1\ atm$ (D) ۳- فاصله

↓ $\left(\frac{M}{t}\right)$ ٤- نرخ خروج گاز از فرش (سیلندر، بدن) (بدیهه در واحد زمان)

$\text{اسپری} = f(T, t, D, M)$ (d) ۵- جهت حرکت ماده اسپری .

$\text{spray} = f(T, t, D, M, d)$ جهت یابی

3D

D_0 ضریب نفوذ

هر ماده ای یا ذره ای خاصیت خاص خود حرکت می کند .

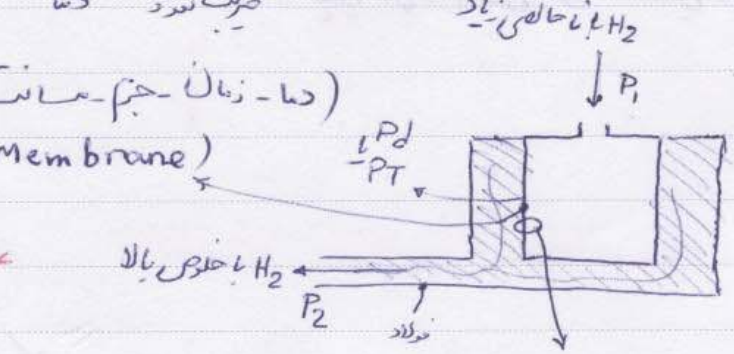
$\text{spray} = f(T, D_0)$

دما ضریب نفوذ

مثال دوم :

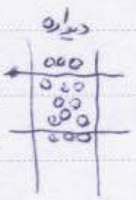
(دما - زمان - جرم - مسافت)

(غشاء، لایه نازک Membrane)



عبور به اندازه دانه‌ای لقم دارد

خروج هیدروژن ذاری از صفحه پلاستیکی



محاجرت نفوذ ، انتقال یک جرم درون یک سیستم جامد :

شکل، جنس، ماهیت اتم دارد. C غلظت یا آنالیز

" " دمای محیط حرکتی اتم ها مهاجرت دارد T دما

" " مسافت طی شده دارد L مسافت

" " زمان حرکت دارد

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject: ۳

Year. Month. Date. ( )

ضریب نفوذ Diffusion Coefficient (D)

طبق تعریف: جرائم مهاجرت اتمی را طی می‌کند وابسته به [redacted]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

- D: ثابت نفوذ
- D_0: عوامل ثابت اولیه
- Q: انرژی فعال‌سازی (Driving force)
- R: ثابت گازها
- T: دمای مطلق کار

اتم نفوذ کننده چگونه درون شبکه بلوری حرکت می‌کند؟

شبکه‌های بلوری دارای عیوب مختلف از جمله عیوب نقطه‌ای هستند. (Point Defects) حفره

(یک صفحه اتمی)

هر حفره دارای تعداد خاصی اتم همسایه است. در شبکه دارای ارتعاش خاص خود هستند. از نظر احتمالات فوریک از اتم‌های همسایه شانس پریدن به جای حفره را دارند. به مجرد پریدن یکی از اتم‌ها به درون حفره، به جای اتم پریده، خالی، یا یک حفره خلق می‌شود.

از دید اتم، اتم جای خود را با حفره عوض کرده است.

" " حفره، حفره " " " با اتم " "

پس در نهایت:

زوج اتم حفره دو شبکه بلوری جابجا شده‌اند یا اثر این عمل ظاهر شود.

یک اتم مانند اتم 4 از مکان اولیه خود حرکت یا نفوذ کرده است و به همین روش اتم‌های دیگر جای خود را با حفره تازه تشکیل شده عوض می‌کنند و ....

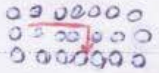
..... و در نهایت یک اتم در بلور جامد نفوذ یا حرکت می‌کند.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

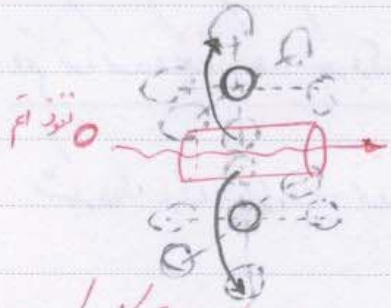
Subject:
Year. Month. Date. ( )

یکی از مکانیسم های نفوذ اتمی حرکت زوج (اتم-حفره) است.

نفوذ بین نشینی



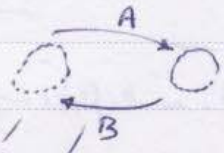
مکانیسم دیگر نفوذ اتم بین نشین در درون شبکه بلوری است. که بصورت بالا انجام می شود



عیوب خطی حرکت می کنند که باعث از بین رفتن دو اتم مجاور به مکان خود دیده باشد.

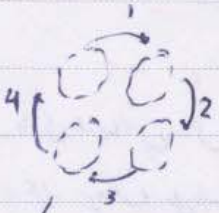
حالات خاص نفوذ جانشینی

۱- جابجایی مستقیم. Direct exchange



اتم A با جانشینی به جای B و بالعکس حرکت می کنند.

۲- مکانیسم حلقه ای Ring Mechanism



اتم $1 \rightarrow 2$
$2 \rightarrow 3$
$3 \rightarrow 4$
$4 \rightarrow 1$

بصورت حلقه ای جای خود را عوض می کنند

کلاً سخت کاری سطحی Surface hardening

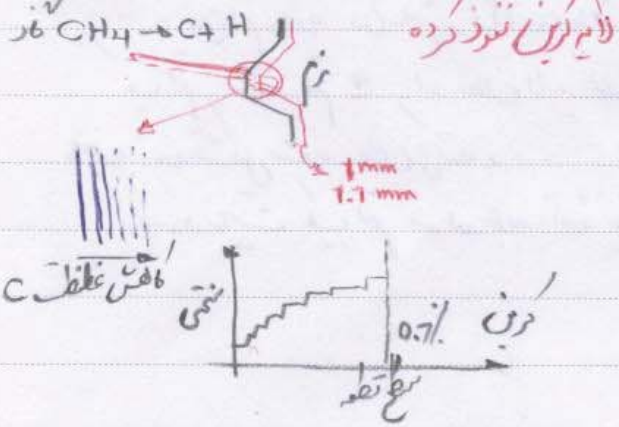
Carborizing کربن دهی سطحی

Nitrizing – نیتروژن دار یا

Nitrocarbing یا هر دو

در این دفعه لبه ها باید بسیار سخت باشند

در این کار با کربن دهی سطحی صورت می گیرد.



دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject: ۵

Year. Month. Date. ( )

چرا اصولاً مکانیسم نفوذاتمی فعال می‌شود؟ هولوتوپ = غیر یکنواختی = درون ساختار می‌تواند عامل نفوذ باشد.

عوامل نفوذ

غیر یکنواختی ← ۱) وجود شیب غلظت

" ← ۲) دمای (شیب دما)

" ← تنش (کرنش) درونی (شیب تنش)

" ← وجود اختلاف پتانسیل جاذبه

" ← وجود اختلاف میدان مغناطیسی یا الکتریکی

← طبیعت این موارد برای رسیدن به پایداری (پائین‌ترین تراز انرژی) صورت می‌گیرد.

ادامه یک نفوذ در جامدات:

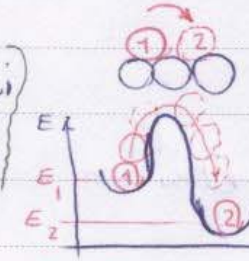
تعاریف تعدادی و مثال:

- نفوذ در گازها، مایعات و جامدات
- ضریب نفوذ D هر ماده
- عوامل نفوذ اتمی یا یونی غیره

عوامل نفوذ: ذاتی - جانشینی - بین نشینی

ترجیح اتم به تبدیل شدن به چه اساسی کاج می‌دهد؟

حرکت اتم از مکان 1 به 2



الف) رسیدن به انرژی پائین‌تر پس از عبور از سد پتانسیل

انرژی پتانسیل ← مشوق

$E_2 < E_1$

اتم باید از یک سد پتانسیل عبور کرده تا به انرژی پائین‌تر برسد.

حرکت اتم به صورت یک موج سینوسی

ب) نیروهای شیمیایی ج) شیب غلظت

افزایش دما در نفوذ برای ایجاد انرژی مشوق است.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

هر ماده‌ای در هر محیطی دارای یک ضریب نفوذ است.

مثال: $D = 7.34 \frac{cm^2}{s}$

Flux: تعداد اتم‌های گذرا از واحد سطح در واحد زمان عبور کرده

سیلان

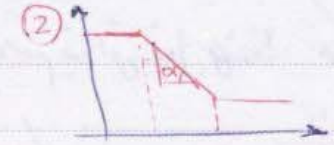
مقدار	تعداد	جرم	Flux :	سیلان	وزن

ماده‌ای که از واحد سطح در واحد زمان عبور می‌کند

$Flux : \left(\frac{atom}{m^2 s}\right)$

PAPCO

Subject:
Year. Month. Date. ( )



یک دیگر Flux است در مقدار آن پیوسته ثابت است.

② ولی شیب منحنی ثابت نیست:

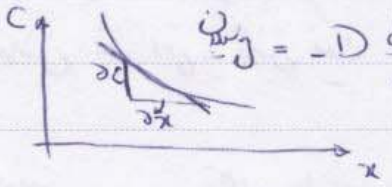
(تغییرات غلظت برحسب تغییرات فاصله)

نفوذ اتمی در اثر تغییر خواص:
- غلظت
- حرارت
- میدان الکتریکی
- میدان مغناطیسی
- جاذبه
- تنش های پسماند

قانون اول فیک: (نفوذ در حالت پایدار) سیلان اتمی در راستای محور x متناسب با شیب غلظت است.

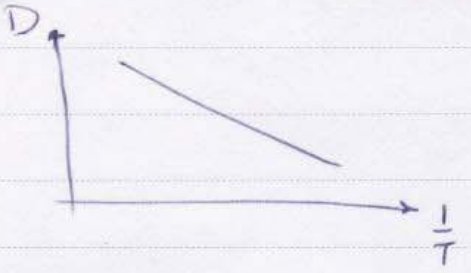
(کاربرد: غلظت پایدار است)

$$j = -D \frac{dc}{dx}$$



$$j = -D \frac{dc}{dx}$$

در حالت پایدار $D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$



معادله آرنیوس.

log D

ساختمان کریستالی در نفوذ تاثیر گذار است.

مثلاً در FCC چون متراکم است نفوذ بهتر است.

هم چنین در Q هم تاثیر گذار است.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

PaPCO

Subject: V

Year. Month. Date. ( )

مثال: در ۳۰۰ درجه ضریب نفوذ واندری مشوق در Si

$D(300^\circ C) = 7.8 \times 10^{-11}\ m^2/s$

$Q = 41.5\ kJ/mol$

ضریب نفوذ در ۵۰۰ درجه چقدر است؟

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

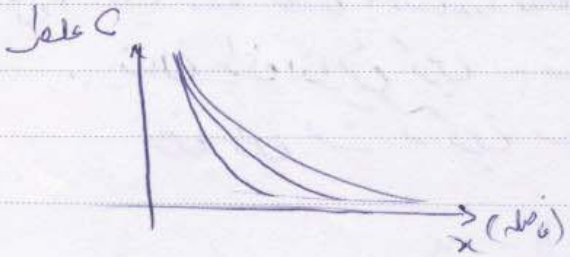
$$J = -D\frac{\Delta C}{\Delta x} = \sim\ kg/m^2 s$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

قانون دوم فیک:

غلظت C

در اثر مواقع شیب غلظت با زمان تغییر می‌کند



$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$\boxed{\frac{\partial C_x}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}}$$

C_x غلظت در فاصله x (متغیر)

t زمان

D ضریب نفوذ

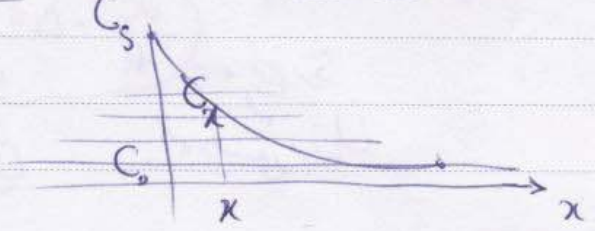
C_s غلظت ثابت در سطح

C_0 غلظت اولیه ماده

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial J}{\partial x}\ \checkmark$$

$$\boxed{\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)}$$

$C_s > C_0$



$$\frac{J_2 - J_1}{dx} = -\frac{dC}{dt} \qquad J = -D\frac{dC}{dx}$$

$$\frac{dJ}{dx} = -\frac{dC}{dt} \qquad \boxed{D\frac{dC}{dx^2} = \frac{dC}{dt}}$$

P4PCO

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject:
Year. Month. Date.

مثال

یک قطعه فولادی حاوی 0.25٪ کربن در سطح در دمای 950°C است. اگر مقدار کربن در سطح به 1.2٪ کربن افزایش یابد چقدر طول می‌کشد که در عمق 0.5 mm میزان کربن به 0.8٪ برسد.

$D = 1.6\times10^{-11}\ m^2/s$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = erf\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

$$\frac{1.2-0.8}{1.2-0.25} = erf\frac{0.5\times10^{-3}}{2\sqrt{1.6\times10^{-11}\,t}}$$

$t = 7.1\ h$ (کربن 0.25٪)

پس طبق فولاد در دمای $T=950^{\circ}C$ پس از 7.1h کربن کافی سطح به 1.2٪ و عمق به 0.8٪ کربن می‌رسد.

مثال: یک دنده فولادی با استاندارد 1020 در دمای 927° کربن دهی شده است. زمان برای افزایش کربن به مقدار 0.4٪ در عمق 0.5 میلیمتری در زیر سطح چقدر است؟ فرض براین است که کربن سطحی معادل 0.9 و کربن این فولاد برابر 0.2 است

$D = 1.28\times10^{-11}\ m^2/s$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = erf\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

$$\frac{0.9-0.4}{0.9-0.2} = erf\frac{0.5\times10^{-3}}{2\sqrt{1.28\times10^{-11}\,t}}$$

$t = 8567\ s \Rightarrow t = 143\ min$

قانون عدم تعیین: نفوذ ناپایدار.

در قانون اول: نفوذ پایدار با گذشت زمان نرخ نفوذ ثابت است.

در کاربردهای صنعتی (عملیات سخت‌کاری سطحی فولادها) ثابت نشده نرخ نفوذ متغیر است. نفوذ با زمان تغییر می‌کند.

مانند اگر معادلات درجه دوم دیفرانسیل:

$$\frac{dC}{dt} = D\frac{d^2C}{dx^2}$$

نرخ نفوذ ← وابستگی به زمان

برای قانون دوم باید براساس شرایط مرزی داده‌های آزمایش

پاسخ‌های تحلیلی را بکار برد.

P4PCO

Subject: 9

Year. Month. Date. ( )

فرضاً: اگر سیستم (نمونه) تحت در یک محلول ثابت سؤال نشود: (پاسخ) $\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

۱- یک لایه نازک (نمونه نمایم) فلزی بر روی یک جسم حجیم (محدود)

(آبکاری از هر نوع بر روی یک قطعه جهت جلوگیری از خوردگی)

۲- " " " " (نامحدود)

۳- " " بر روی یک لایه نازک دیگر (محدود)

(لایه‌ای از مواد مغناطیسی بر روی یک قطعه غیرمغناطیسی)

۴- " " " (نامحدود)

۵- بررسی نفوذ مواد رادیواکتیو به درون یک قطعه (نمونه) (تعیین D برای حالات مختلف)

- هموژن (یکنواخت سازی ساختار) سازی یک قطعه ریختگی

کلیه حالات فوق دارای پاسخ های خاص خود هستند.

مثال از نفوذ در جامد: نمونه خالصی از جنس گالیم در دمای $1100^\circ C$ درجه به مدت سه ساعت وارد دستگاهی خالص از سیلیسیم میشود. اگر مقدار گالیم سطحی برابر $10^{24}\ \frac{atoms}{m^3}$ درجه عمق از سطح مقدار آن برابر با $10^{22}\ \frac{atom}{m^3}$ می‌شود؟

$$\frac{10^{24} - 10^{22}}{10^{24} - 0} = \text{erf}\frac{x}{2\sqrt{7\times10^{-17}\times t}}$$

$D_{1100^\circ C} = 7\times10^{-17}\ m^2/s$

$3\times3600 = 1.08\times10^4\ sec$

$x = 3.17\ mm$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

P4PCO

Subject:

Year. Month. Date. ( )

ضریب نفوذ مس در $500^{\circ}C$ و $600^{\circ}C$ به ترتیب زیر است: (آلومینیم)

$D_{500^{\circ}C} = 4.8 \times 10^{-14}\ m^2/s$

$D_{600^{\circ}C} = 5.3 \times 10^{-13}\ m^2/s$

زمانی را بدست آورید که همان مقدار نفوذ در $500^{\circ}C$ را بوجود می آورد که در 10 ساعت در $600^{\circ}C$ بوجود می آورد:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = erf\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

دقت آن نقطه های غلط

$$\rightarrow D_{500}t_{500} = D_{600}t_{600}$$

$$t_{500} = \frac{D_{600}}{D_{500}}t_{600} = \frac{5.3 \times 10^{-13}}{4.8 \times 10^{-14}} \times 10 = 110.4$$

$$\boxed{t_{500} = 110.4\ h}$$

* پس اگر در $500^{\circ}C$ انیلکار انجام شود زمان بسیار بیشتری را نیاز دارد.

پارامترهای مؤثر بر نفوذ اتمی

۱- نوع مکانیسم نفوذ اتمی. بین نقص ها انرژی کمتری جهت جابجایی نیاز دارند.

۲- درجه حرارت تأثیر زیادی بر نفوذ دارد. (قابل تغییر برای بشر)

۳- نوع ساختمان بلوری. (در BCC نفوذ راحت تر است)

زیرا در fcc، hcp ضریب تراکم بیشتر است. (شعاع کمتر است)

۴- نوع عیب بلوری: در ساختمان های باز نفوذ راحت تر است. در راستای رواند، ترک های درونی

۵- انرژی پیوندی شبکه بلوری زمینه. تعیین کننده نفوذ ذاتی است. (هرقدر نقطه ذوب بالاتر انرژی پیوند قوی تر نفوذ بیشتر است)

۶- اندازه اتم

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

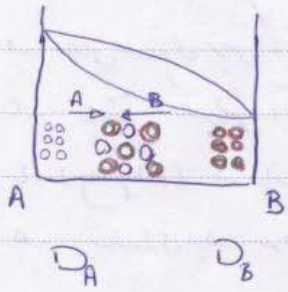
P4PCO

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

نکته: در بعضی $(C-x)$ (غلظت ماکزیمم) باشیب ثابت باشد به معنای پیروی از قانون اول فیک است.
و اگر بعضی $(C-x)$ یک خودار باشیب متغیر باشد به معنای پیروی از قانون دوم فیک است.

نکته: نفوذ در فرزدانه راحت‌تر صورت می‌گیرد. (کلا نفوذ در نابرستگی راحت‌تر صورت می‌گیرد.)

نفوذ در هم (Interdiffusion)



قانون یا پدیده کرکندال: (منهوم نوع فصل مشترک)
تنوع در بر دهای پدیده نفوذ در متالورژی صنعتی.

در این حالت هم A در B حرکت کرده $A \rightleftarrows B$
و هم B در A حرکت می‌کند و $\tilde{D}$ برابرات با:

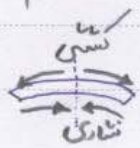
معادلات Darken

$$\tilde{D} = x_B D_A + x_A D_B$$

B درصد جرم — A درصد جرم

$$\tilde{v} = (D_A - D_B)\frac{\partial N_A}{\partial x}$$

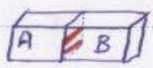
سرعت حرکت صفحه مارکر



نفوذ به علت غیر یکنواختی کرنش:

در اینجا اختلاف تنش و کرنش های موجود، موجب حرکت اتم ها می‌شود. چرا که این عدم یکنواختی نیروی محرکه برای حرکت اتم ها محسوب می‌شود.
نوع حرکت در اینجا بگونه‌ای است که اتم‌های پرانرژی به منطقه کم‌انرژی مهاجرت کرده تا سطح انرژی سیستم را کاهش دهند.

پدیده کرکندال (زوج نفوذی):
زوج نفوذی از اتصال دو فلز یا آلیاژ هم ایجاد می‌شود (مانند جوشکاری)



قبل از اتصال سیم نازک را بین دو قطعه قرار می‌دهیم
سپس دما را افزایش یافته و هم‌ها نفوذ می‌کنند. (نشان‌گر سرعت نفوذ در هر قطعه)

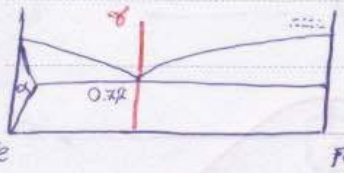
PqPCO

Subject: ۱۴

Year. Month. Date. ( )

تحولات فازی در جامدات : phase transformation in solids

در فولادی با 0.8C٪ که از 1000°C (محدوده γ) سرد می‌شود پس از نقطه یوتکتوئید چه اتفاقی رخ می‌دهد؟



دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

در دمای خیلی بالاتر از نقطه شروع ایجاد جمع برخی اتم‌ها در زمان حدود 10^{-10} s دوبهم جمع شده و خوشه‌ای را تشکیل می‌دهند.

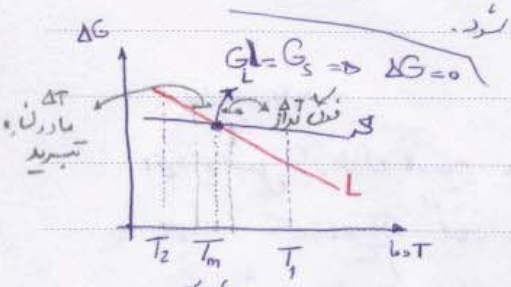
بطور موقت حدود 10^{-10} s مقداری اتم یک نطفه را تشکیل می‌دهند.

حدود 150° شتر از نقطه شروع ایجاد

100_150° بالاتر از ایجاد خوشه‌ها حدود 100 اتم را در بر می‌گیرند.

در دمای نزدیک ایجاد خوشه‌ها حدود 1000 اتم را در بر می‌گیرند.

فرضاً در 660°C برای Al هیچ اتفاقی رخ نمی‌دهد. باید تعادل برهم زده شود.



دمای رسمی ایجاد Al=660°C

خوشه = کلاستر

در هر دما:

فازی که انرژی کمتری دارد، پایدارتر است.

T_1) باتوجه به شکل در بالاتر از T_m ، مذاب پایدارتر است.

T_2) و در دمای کمتر از T_m ، جامد پایدارتر است.

تعادل در وجود دو $T_m = 660$ چه سبب است؟

$\Delta G = 0$ است.

فوق گداز ΔT = ΔT ماوردن تبرید

دمای مذاب به نقطه ذوب رسیده باشد

یعنی $\Delta G = 0$ و انرژی مشوق وجود ندارد.

باید $G_L \neq G_S$ شود یا $\Delta G \neq 0$.

در هنگام ایجاد باید دما از T_m کمتر شود (ماوردن تبرید ΔT)

در هنگام ذوب باید دما از T_m بالاتر رود تا $G_S \neq G_L$ (فوق گداز ΔT)

* قرارگرفتن در T_m یعنی $\Delta G = 0$ و در این دما هیچ اتفاقی نمی‌افتد چرا که انرژی مشوق ندارد.

$T = 660 \begin{matrix} +5 \\ -5 \end{matrix}$ (فوق گداز / ماوردن تبرید)

$\Delta G = -\Delta G_V + \Delta G_S$ (حجم / سطح)

(حجم زیاد در سطح کم پایدارتر است.)

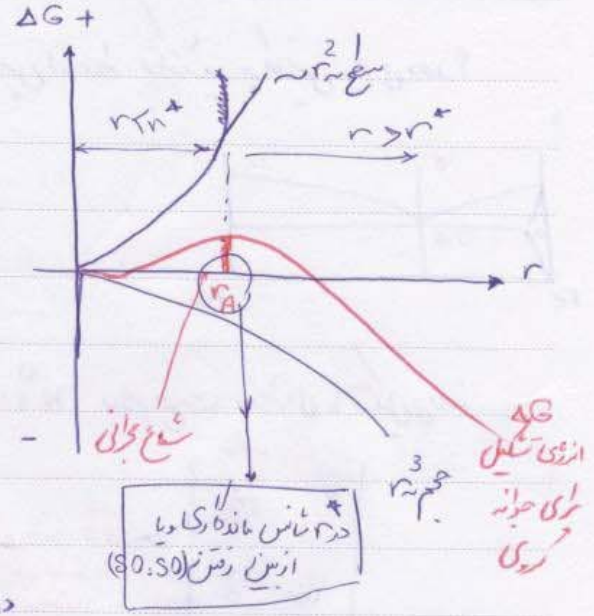
$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \Delta G_S$$

PAPCO

Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \Delta G_s$$



جوانه هایی که شعاع آن ها از r_A کمتر است بقا ندارند.

جوانه هایی که شعاع آن ها از r_A بزرگتر است بقا دارند چون موجب کاهش سطح انرژی میشوند.

در شعاع بحرانی $\frac{dG}{dr} = 0$

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad , \quad \Delta G^* = \frac{16}{3}\pi \left(\frac{r^3}{\Delta G^2} \right)$$

ادامه بحث انجماد:

انجماد با تشکیل جوانه های فاز جامد بالاتر از دمای رسمی.

انجماد Al $T_m = 660°C$ تفاز ولی طول عمرآنها به علت عدم کاهش انرژی کل سیستم، کوتاه بوده، مجدداً ذوب می شد.

- هرقدر دمای تشکیل جوانه های جامد بالاتر باشد طول عمر کمتر خواهد بود.
- با نزدیکتر شدن به دمای رسمی انجماد، طول عمر طولانی تر، تعداد جوانه ها زیادتر، ... تا عبور از دمای رسمی انجماد که تعدادی از جوانه ها شروع به رشد کرده اند، چنانچه $r > r^*$ باشند جامدگاری یافته و تشکیل یافته و رشد می کنند.

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \Delta G_s \qquad 4\pi r^2 = A_{L.S}$$

ΔG: انرژی تشکیل جوانه (بطورکلی)

ΔG_v: انرژی حجمی در واحد حجم

ΔG_s: انرژی سطحی در واحد سطح

$\gamma_{L.S}$: انرژی فصل مشترک مذاب (L) و جامد (S)

شعاع بحرانی $r = r^*$ $\quad \frac{dG}{dr} = 0 \rightarrow$ شعاع بحرانی $r^* = \left| \frac{2\gamma}{\Delta G_v} \right|$

$$\Delta G^* = \frac{16}{3}\pi \frac{r^3}{\Delta G_v^2}$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

(ΔT مادون سرد) نقش بسیار مهمی در ایجاد این ها می کند. تجربه نشان داده است که:

* ΔT وابسته به جنس مذاب نیست و برای اکثر فلزات خالص بین $\Delta T = 0.1^{\circ}C - 5^{\circ}C$ می باشد.
* در حالیکه اکثر از محاسبات تئوری ایجاد ΔT را محاسبه کنیم برای هر فلز ΔT خاصی بدست می آید و با میزان تجربی بسیار متفاوت است.

	تئوری	تجربی
Fe	$\Delta T = 200^{\circ}C$	$\Delta T = 1-5\ ^{\circ}C$
Ni	$\Delta T = 180\ ^{\circ}C$	$\Delta T = 1-5\ ^{\circ}C$

* ~~در هنگام رشد جوانه سرعت انرژی اتم ها به جوانه اصلی کاهش و بالاتر رفته و ظرفیت زیادی در~~

در هنگام رشد جوانه عیب ایجاد می شوند.

در هنگام رشد جوانه های جامد درون مذاب:
به علت ارتعاشات اتمی فوق العاده زیاد و مکان های اتمی مذاب بر روی پوسته یا سطح جوانه باشعاع بحرانی اتم های در حال جذب به انگونه مکان ها بر روی مکان های تعادلی قرار گرفته و در نهایت عیب بلوری ازهمین دوران درون بلور ها ایجاد می گردد.

دلیل اختلاف ΔT تئوری و تجربی در اساس تئوری جوانه زنی یکنواخت است. مثلاً فرض اول در این تئوری تأکید دارد که جوانه ها بطور یکنواخت درون مذاب تشکیل می شوند درصورتیکه می دانیم در بوته روی دیواره ها سریعتر از مکان های دیگر هسته تشکیل می شود.

پس گونه اصلاح شدهٔ این تئوری باید به حالت زیر باشد:

تئوری جوانه زنی غیر یکنواخت =
۱- جوانه های جامد با ارجحیت مکانی در زمانی درون مذاب تشکیل می شوند.
۲- " " " بصورت قطاعی از یک کره باشعاع r در نظر گرفته می شوند.

قطاعی از کره

محل های با ارجحیت مکانی برای رشد جوانه
(wall) ✓
نام طی برای تمام ناخالصی ها
اتم های حلال
دیواره قالب
موادی که از بیرون به مذاب اضافه می کنیم (مواد جوانه زا)

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

در تئوری جوانه زایی غیر یکنواخت که جوانه ها را به صورت قطاع در نظر گرفتیم فصل مشترک ها ۳ حالت مختلف پیدا می کنند:

Wetting angle: θ
زاویه آغشته شدن

با احتساب شکل قطاعی از یک کره انرژی سطحی مذاب و جامد به سه مؤلفه تجزیه می شود:

γ_{SW} و γ_{LW} [illegible] را حس می کنند.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

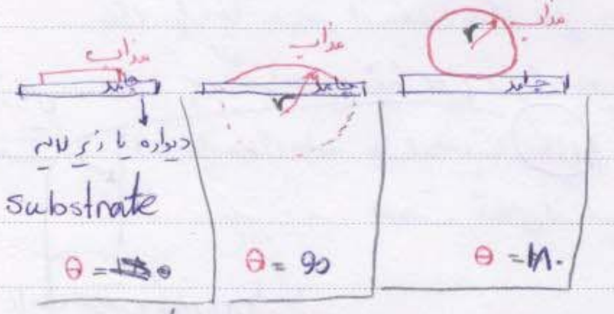
$$\Delta G_{\text{غیر یکنواخت}} = \frac{4\pi}{3}\frac{\Delta\gamma^3}{\Delta G_v^2}\left(2-3\cos\theta+\cos^3\theta\right)$$

(انرژی جوانه زایی)

$$\Delta G_{\text{غیر یکنواخت}} = \frac{1}{4}\,\Delta G_{\text{یکنواخت}}\left(2-3\cos\theta+\cos^3\theta\right)$$

(انرژی جوانه زایی)

ادامه بحث ایجاد آغشته پذیری:



$$\Delta G^*_{hetro}(180^\circ) = \Delta G^*_{homo}$$

$$\Delta G^*_{hetro}(90^\circ) = \Delta G^*_{homo}/2$$

$$\Delta G^*_{hetro}(0^\circ) = 0$$

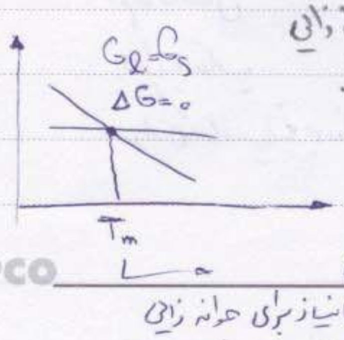
به ازای $\theta = 180^\circ$ داریم

ΔG انرژی جوانه زایی غیر یکنواخت = ΔG انرژی جوانه زایی یکنواخت

به ازای $\theta = 0$ داریم

$\Delta G_{Het} = 0$ انرژی جوانه زایی غیر یکنواخت

مانند نقطه ذوب که در آن $\Delta G = 0$ است.



L — در تعادل

∞ انرژی نیاز برای جوانه زایی

هیچ سدی در برابر جوانه زایی وجود ندارد

جوانه زنی یک فاز جامد درون فاز جامد دیگر (nucleation is solid state):

اول تبلور ثانویه

هنگامیکه یک محلول جامد فوق اشباع از دمای بالا آبدیده یا دمای محیط سردی شود و تجزیه فازی $\begin{cases}\gamma \rightarrow \alpha+\beta \\ \alpha \rightarrow \beta\end{cases}$ انجام می‌شود. یعنی فازهای $(\alpha+\beta)$ (یک مخلوط دوفازی) از یک تک فاز محلول جامد تولید می‌شود و یا اینکه فاز β از تک فاز α متولد می‌شود.

اگر زمان کافی برای رشد $(\alpha+\beta)$ و یا β داده شود، فازهای مادر (آلیاژ، ماترس، ...) را تا آخرین اتم استفاده کرده و به رشد خود ادامه می‌دهند.

اگر به هریک از تحولات بالا زمان کافی داده نشود، درصدی از فاز انجام می‌شود و بقیه فاز مادر (آلیاژ) منجمد می‌شود (بحث سینتیکی)

مانند بحث ایجاد، جوانه زنی فاز جامد α (یا فاز دیگری) یا $(\alpha+\beta)$ از دیدگاه جوانه زنی به دو طریق انجام می‌شود

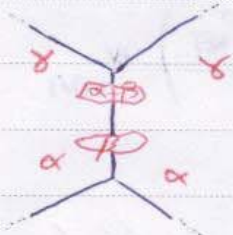
۱- جوانه زنی ناهمگن:

فاز جامد α بدون ارجحیت زمانی و مکانی درون تمام فاز جامد آلیاژ (مادر یا ماترس) جوانه زنی و سپس رشد می‌کند.
همانطور که در بحث ایجاد اشاره شد، در جامدات نیز جوانه زنی ناهمگن انجام می‌شود. (مگر در حالات خاص آزمایشگاهی)
جوانه زنی همواره بصورت ناهمگن انجام می‌شود.

۲- جوانه زنی همگن:

جوانه‌های فاز جامد α در مکان‌های خاصی از ساختار فاز آلیاژ یا مادر تشکیل و سپس رشد می‌کنند. (ارجحیت مکانی)

مثالهای ساختاری آن داده‌اند که: فاز جدید α بر روی هر نوع ناپیوستگی ساختار فاز مادر مانند:



- مرز دانه‌های دوگانه، سه‌گانه
- مرزهای ثانویه، دوقلویی، مرزهای فرعی و ...
- عیوب نقطه‌ای و مجموعه آنها
- عیوب خطی
- عیوب سطحی

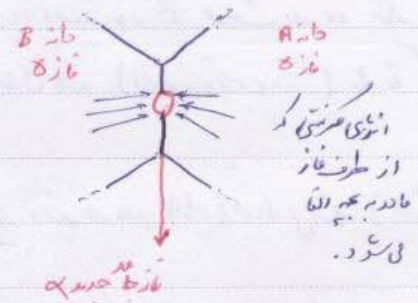
جوانه زنی می‌کند.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی
PAPCO

Subject:
Year. Month. Date. ( )

انرژی تشکیل جزاهای جامد α در فاز γ (تشریک ایجاد) = تغییرات انرژی سطحی (مخالف جوانه‌زایی) + تغییرات انرژی حجمی در واحد حجم (موافق جوانه‌زایی)

مرز دانه محل مجمع تعداد زیادی از انواع عیوب است.
(پر انرژی)



پس با سه انرژی مواجه است:
- انرژی حجمی — موافق رشد جوانه
- انرژی سطحی — مخالف رشد جوانه
- انرژی کرنشی فاز مادر — مخالف رشد جوانه

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\Delta G + A\gamma + \frac{1}{3}\Delta G_s$$

$$= -\frac{1}{3}(\Delta G_v - \Delta G_s) + A\gamma$$

$$\frac{\Delta G_{HET}}{\Delta G_{HOM}} = S(\theta) = \frac{(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2}{2}$$

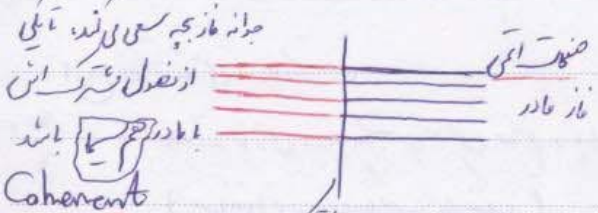
$$N_{HET} = \frac{C_{HET}}{C_0} \exp\left(\frac{\Delta G^*_{HOM} - \Delta G^*_{HET}}{KT}\right) N_{HOM}$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

✓ اتم‌های جوانه جدید با کاهش از مخالفت انرژی سطحی و با طوع انرژی مخالف دیگر جوانه‌زایی را طوری آغاز می‌کنند که فصل مشترک بین جوانه جدید α و فاز مادر γ دارای حداقل انرژی باشد. (توضیح در صفحه بعد)

Subject: ۱۹

Year. Month. Date. ( )



داشتن حداقل انرژی میان فاز مادر و بچه بلورهای زیر بحث می‌شود.

هم‌سیمایی: تطابق بلوری کامل بین فاز جدید و قدیم

نیم‌هم‌سیمایی: موضعی.

نیروی عدم تطابق

$$\delta = \frac{d_\beta - d_\alpha}{d_\alpha}$$

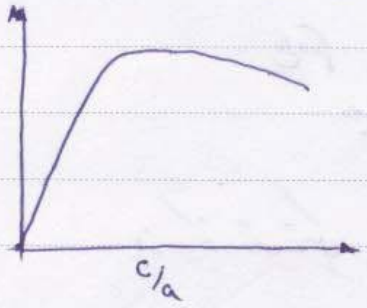
(d_α: فاصله صفحات فاز مادر، d_β: فاصله صفحات فاز بچه)

در جایی که در ادامه صفحه آتی فاز مادر صفحه آتی فاز بچه وجود نداشته باشد نابجایی موجود می‌آید.

به مرور زمان Coherent به Noncoherent تبدیل می‌شود.

شکل فاز جدید به ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری فاز مادر بستگی دارد به موجب کروی یا یا دانه‌ای بودن فاز جدید می‌شوند.

یعنی مثلاً مدل الاستیک فاز مادر وجه می‌شوند که جوانه کروی رشد کند.



$$\Delta G_s = \frac{2}{3}\mu\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 \cdot v \cdot f(c/a)$$

μ و v (مدل برشی و ضریب پواسون)

تعیین کننده شکل جوانه هستند.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

P4PCO

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject:
Year. Month. Date. ( )

انواع تحولات فازی در جامدات :

تحولات فازی در جامدات براساس مفاهیم و پارامترهای مختلفی تقسیم بندی می شود :
(ساختمان - ترمودینامیک - سینتیک)

- اولین نوع تقسیم بندی تحولات فازی توسط ویلیام گیبس انجام شد و پس از او افراد دیگری تقریبی گیبس را اصلاح کردند .
- نحوه حرکت اتم و سرعت آن اساس اکثر تقسیم بندی های تحولات فازی در متالورژیست .

گیبس :

✓ نوع اول : حرکت اتم با تغییر زیاد برد کوتاه .

✓ تحول بدون نفوذ .
- تحول جابه جایی
- تحول برشی
⊖ * مارتنزیتی

✓ نوع دوم : حرکت اتمی ، ارتفاع کم ، برد زیاد .

✓ تحول نفوذی .
⊖ * جوانه زنی و رشد .
- تجدید آرایش .

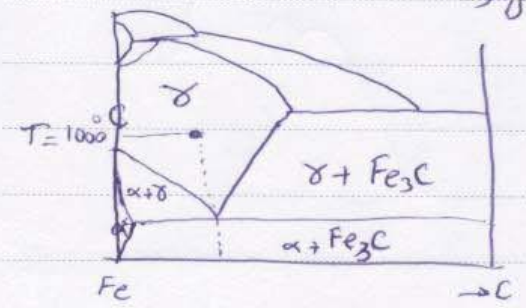
به بیان دیگر :

نوع اول : اتم ها با سرعت زیاد ، فواصلی در اندازه کسری از ثابت شبکه را بصورت گروهی طی کرده و فاز جدید را خلق می کنند .

نوع دوم : اتم ها با سرعت های کمتری از نوع اول فواصلی در ابعاد چندین فاصله اتمی یا ثابت شبکه ای را بصورت انفرادی طی کرده و فاز جدید را بوجود می آورند .

از دیدگاه ترمودینامیکی :

یکی از صفات ماده (مانند گرما ، ویژه ، ...) را ثابت به دما و یا حجم مشتق گرفته و اگر مشتق حاصل پیوسته یا ناپیوسته باشد نوع تحول و ماهیت آن تعریف می شود .



فولاد ساده کربنی با C:0.8 فرض است
با دورش از دمای T=1000°C تا دمای محیط برد می شود .

(ادامه در صفحه بعد)

PaPCO

روش اول: آهسته و پیوسته تا دمای محیط

ساختار در $T=1000^{\circ}C$ دانه بندی بصورت تشکیل α در مرز دانه δ.

ساختار دمای محیط کاملا پرلیتی

روش دوم: از $T=1000^{\circ}C$ مستقیما در آب کوئنچ تا دمای دلخواه. در این روش زمان رسیدن به دمای محیط خیلی کوتاه است.
لذا تحول پرلیتی زمان مورد نیاز وقوع خود را ندارد و δ به مارتنزیت تبدیل می‌شود.
از طرفی کاهش دما، باعث آزاد کردن مقدار زیادی انرژی $Q = E_{T=1000} - E_{T=T_R}$ می‌گردد.
به عبارتی اگر به Q زمان کافی داده نشود باعث تجزیه δ به فازهای پرلیت می‌گردد. در غیر اینصورت مقدار انرژی Q از طریق دیگری، تغییر در ساختمان کریستالی فاز δ (در تمام ساختمان یا بخشی از آن) آزاد خواهد شد.

رسیدن به پایداری اساسی ایجاد دگرگونی است.
در کوئنچ ساختمان فاز δ تغییر می‌کند.

اگر به انرژی آزاد شده در اثر کاهش دما (بصورت دیگر) زمان برای به حرکت در آوردن اتم‌های فاز اولیه جهت رسیدن به مکان‌های پایدارتری جهت جوانه زنی و رشد فاز جدید داده نشود. تحول با تغییر گونه‌های اتمی صورت می‌پذیرد و اثر:
زمان داده نشود انرژی به حرکت در آوردن اتم‌های فاز اولیه بصورت نوعی بدون تغییر بخشی از ساختمان بلوری فاز اولیه را به ساختمان دیگری تبدیل می‌کند که اصطلاحا تحول بدون نفوذ یا مارتنزیتی نامیده می‌شود.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject:
Year. Month. Date. ( )

جسمی که یک تک فاز باشد (مانند آلیاژ آلومینیوم، چدن پس) تحت تأثیر شرایط محیطی (به غیر از حالتی که در آن قرار دارد) جابجایی قرار می‌گیرد. چه اتفاق درونی رخ می‌دهد؟

۱- آیا ساختمان بلوری تغییر می‌کند؟ ۲- آیا آنالیز شیمیایی آن بر اساس عنوان فازی، تغییر می‌کند.

۳- ساختمان بلوری و آنالیز شیمیایی همزمان تغییر می‌کند؟

با چه سرعتی (زیاد یا کم) تحولات فوق رخ می‌دهد.

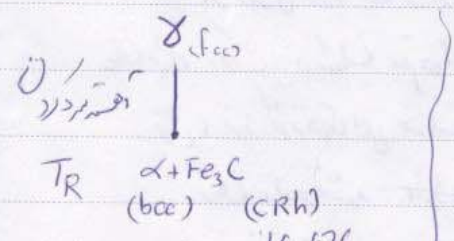
آیا با اولین تغییر آلیاژ به تعادل می‌رسد یا از یک حالت ناپایدار (حالت موجود) به حالت ناپایدار دیگری و سپس به پایداری اصلی می‌رسد؟

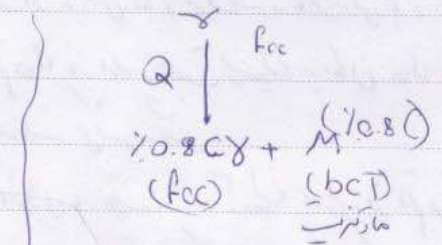
در جلسه گذشته به نوعی از تحولات فازی برخورد کردیم.

۱- تحولات بانفوذ برد بلند (چدن برای ثابت شبکه بلوری)

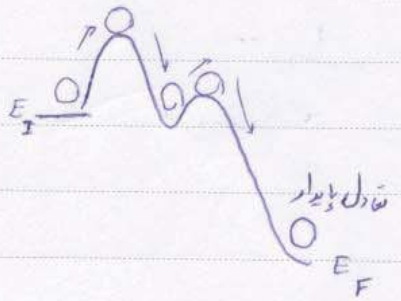
۲- تحولات بدون نفوذ اتمی برد کوتاه (کسری از ثابت شبکه)

تحولات بی‌نظم-منظم یا متحول) که بر حسب شرایط اعمال شده می‌توانند در سرد متحول در حالتی استنیته از نفوذ اتمی Banitic در حالتی دیگر بدون نفوذ اتمی از نقطه A به B حرکت کند.





پس نرخ ایجاد بسیار تأثیر گذار بر ساختار خواهد بود.

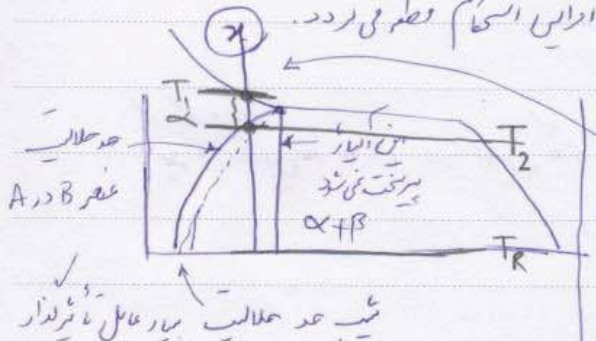


تحولات فازی اسپینودال در دمای $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$ که به صورت سینوسی تغییر می‌کند.

PAPCO
دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

(Precipitation Hardening) [Hardening] [Ageing] رسوب سختی - پیرسختی

پیرشدگی موجب اختلال در حرکت نابجایی شده و درنتیجه موجب افزایش استحکام فلز می گردد.



مکانیسم عملیات رسوب سختی / پیرسختی آلیاژ (X)

۱- آلیاژ برد شده قبلی $(\alpha+\beta)$ تا بالاترین دما در منطقه α نگاهداری به مدت زمان کافی (T_1) عملیات حرارتی انحلالی

۲- کوئنچ آلیاژ از T_1 تا دمای محیط (T_R)

۳- حرارت مجدد تا بالاترین دما در منطقه $\alpha+\beta$ (T_2)

۴- پس از خاتمه مرحله 3 آنقدر تا دمای محیط سرد می شود.

سرد شدن عادی که β در مرز دانه α جوانه می زند این ساختار موجب جلوگیری از حرکت نابجایی ها نمی شود.

قطعه پیرسختی شده که در فاز β بصورت پراکنده در مجموعه ساختار فاز α وجود دارد این ساختار موجب اختلال در حرکت نابجایی و افزایش استحکام ماده می گردد.

۴ (اندازه، شکل هندسی، ابعاد، فواصل ذرات β از نظم خاصی با دما و زمان نگاهداری در T_2 قابل کنترل است.)

0.5 inch 1.5h

در عملیات انحلالی: فاز β مجدداً در α حل و محلول جامد فوق اشباع α تشکیل می شود.

در کوئنچ: دانسیته عیوب خصوصاً عیوب نقطه ای افزایش می یابد. (افزایش حفره)

در دمای محیط تعداد حفره ها بیشتر از حالت عادی است.

سپس ذرات فاز β در این خزانه حفره ها تشکیل و رشد می کنند.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject:
Year. Month. Date. ( )
دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

ادامه سیل پرسختی

یادآوری:

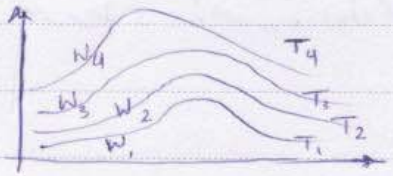
- محلول جامد فوق اشباع در اثر سرد شدن به مجموعه دو فازی تجزیه می‌شود. فاز زمینه + فاز ثانویه (در جزئیات بیشتر)

چگونگی تشکیل فاز رسوبی از اولین گام تا آخرین اندازه و شکل آن.

GP
Guner - preston

$$\alpha_0 \rightarrow \alpha_1 + GP \rightarrow \alpha_2 + \theta'' \rightarrow \alpha_3 + \theta' \rightarrow \alpha_4 + \theta$$

افزایش دما موجب کاهش زمان پیرسختی می‌گردد.



$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ دمای محلول

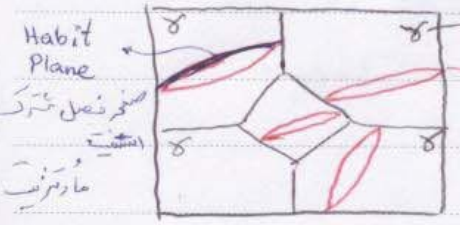
$W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ درصد وزنی

۸ فضای کنترل

۲ تحولات مارتنزیتی:

(تحولات بدون نفوذ، تحولات برشی، تحولات جابه‌جایی، تحولات نظامی ...)

در این تحول که اولین بار در اثر کوئنچ فولاد در آب سرد، مشاهده شد، بخشی از دانه‌های آستنیت با تغییر شکل برشی و با تغییر ساختمان بلوری از FCC → BCT بصورت عدسی شکل ظاهر شدند.



در این تحول، اتم‌ها با حرکت گروهی، بیش از یک فاصله بین‌اتمی، آستنیت را طی کرده (با مکانیسم برشی) و فاز جدیدی را بوجود می‌آورند.

فاز مارتنزیت بسیار سخت و شکننده است و مقاومت به سایش فولاد را بالا می‌برد.

P4PCO

Subject: ۲۵

Year. Month. Date. ( )

تئوری های مختلفی در از دهه ۴۰ تاکنون برای تشریح وتوجیه تحولات مارتنزیتی ارائه شده که نتها شکل داخل گرده بلکه بر پیچیدگی آن افزوده است.

۱- ۵ مارتنزیت بسیار سخت است. منظور در آلیاژهای آهن، نرم است.

۲- با سرعت های بسیار بالا شکل می شود.

۳- منظور در فولادها اتفاق می افتد؟ خیر در کاربردها هم اتفاق می افتد.

بدون نفوذ بدون تغییر مارتنزیتی به معنای حرکت دسته ای از اتم ها با ثابت بودن هم پیوندی (موج)

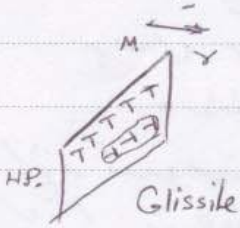
به علت تشکیل فاز مارتنزیت و اعوجاج شبکه ای فاز مارتنزیت باید اعوجاج را جبران دهد.

مکانیسم جبران ۵ دوقلویی است.

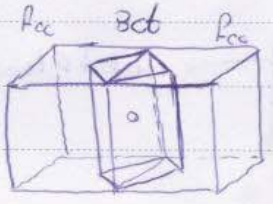
دوقلویی موجب کاهش انرژی داخلی می گردد.

سرعت رشد فاز مارتنزیت بسیار بالا بوده و در آن نیازمند فصل مشترک Glissile است یعنی بدون نیاز به نفوذ اتمی.

اگر قبول شود که فصل مشترک فاز Glissile است و به انتقال نیازی نیست اگر قبول نشود که فصل مشترک Glissile است باید در فصل مشترک دو نوع نابجایی وجود داشته باشد و دسته ای نابجایی در هنگام حرکت صفحه HP با هم برخورد کرده و تولید جاک و گیر می کند یعنی به نوعی باعث کندی حرکت می شوند و فصل مشترک نمی تواند با سرعت حرکت کند که خلاف مشاهدات تجربی است. پس در فصل مشترک نابجایی های همان دارم Glissile است.



در فصل مشترک باید یک خط عبور نابجایی داشته باشیم.



$2FCC \rightarrow 1BCT$

۱۷٪ انقباض در جهت c و ۱۲٪ انبساط در جهات دیگر.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

Subject:
Year. Month. Date. ( )

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

تحول مارتنزیت :

خلاصه :

۱- تحول مارتنزیت در خط و سطح توسط تنش برشی فعال می‌شود .

۲- آنالیز شیمیایی فاز اولیه (آستنیت γ در فولادها) و مارتنزیت یکسان است که خود دلیلی بر عدم فعال شدن مکانیسم نفوذ اتمی (پرد بلند) است .

۳- اتم‌های همسایه یکسان هستند . (قبل و بعد از تحول)

۴- فصل مشترک آستنیت و مارتنزیت صفحه‌ای بنام Habit plane است .

۵- رشد مارتنزیت با سرعت‌های بسیار بالا تا (1100 M/Sec) گزارش شده است .
لذا فصل مشترک دارای یکسری نابجایی و بدون نفوذ حرکت می‌کند .

[وجود دررسی نابجایی در فصل مشترک = تلاقی و تولید Kink و Jog (یعنی عدم حرکت)]

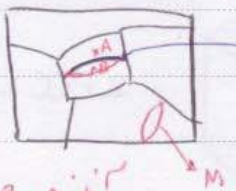
ماهیت فصل مشترک = Glissile و هم‌سیا .

۶- باید حداقل یک خط بنام Invariant line در فصل مشترک باشد که در اثر وقوع تحول مارتنزیت بدون چرخش و اعوجاج باقی بماند .

Bain با استفاده از تعاریف اولیه سلول واحد در بلورشناسی سلول واحد جدید بصورت tetragonal (فاز مارتنزیت) از سلول واحد F.C.C (فاز مادر) تعریف نمود .
پس از تقابل با ثوابت شبکه بلوری مارتنزیت تجربی در فولادها ثابت کرد .
در اثر تبدیل FCC → BCT محور C انبساط و دو محور a و b انبساط یافتند .
براساس مدل بین (Bain Model) :

* روابط بلوری خاصی بین فاز مارتنزیت و استنیت تعریف می‌شود .

کوئنچ در آب سرد صورت
می‌گیرد بلکه در روش‌های مخصوص و در نیتریک .

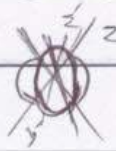


آنالیز A و B فرق می‌کنند .

HP

شبکه‌ی لینید Invariant line عمود بر Habit P. است .

در مدل Bain با استفاده از بیضی برای BCT ، دایره برای FCC در تحول مارتنزیت به این نتیجه می‌رسیم که خطوط تقاطع ازدیاد ، دچار اعوجاج می‌شوند .



P4PCO

Subject: ۲۷

Year. Month. Date. ( )

با یک مکانیزم تغییر شکل با چرخش ماژ مارتنزیت (بدون تغییر شکل) γ_{yz} ، γ_{yz} برابر نقش تنش در کریستال وجود Strain invariable line انتقال می‌شود.

همانطور که ملاحظه می‌شود: با انتخاب مارتنزیت بدون تغییر و اعوجاج به شکل کره نمی‌توان خطی بصورت (ILS) یافت که در اثر وقوع تحول مارتنزیتی ثابت باقی بماند. تمام خط‌ها، دارای طول ثابت ولی چرخش می‌یابند. اگر از جسمی مکانیسم تغییر شکل دیگری با Rigid body rotation استفاده شود و ماژ مارتنزیت (شکل بدون تغییر) چرخش پیدا کند می‌توان خطی یافت که دارای خصلت (ILS) باشد. این مکانیسم تغییر شکل در تحول مارتنزیت بصورت خطوط دوقلویی یا لغزش درون ماژ مارتنزیت جلوه می‌کند. پس علت ظاهر شدن خطوط لغزش و یا بندهای دوقلویی در ماژهای مارتنزیت همان مکانیسم تغییر شکل است.

مکانیسم Rigid body rotation

Rigid body rotation

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

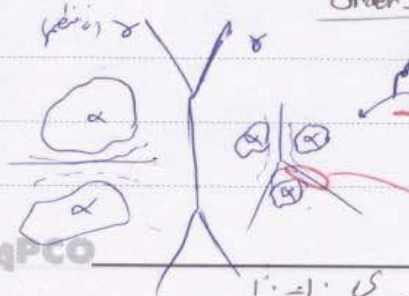
تحولات نظمی (order-disorder)

برخی آلیاژها/ ترکیبات بینابینی در حالت جامد، در $T > T_c$ (دمای بحرانی تحول) دارای ساختمان اتمی بی‌نظم (disorder) و $T < T_c$ ساختمان اتمی منظم یا order می‌شود. در Au-Cu کشف گردید ولی در آلیاژهای زیادی مشاهده شده است.

خصوصاً مواد مغناطیسی خانواده $[(Pt-Co)-(Cu-Pt)-(Pt-Fe)]$

بخاطر نوع حرکت خاص اتم‌ها در ساختمان‌های منظم دستکاری این نوع مواد خیلی مشکل است. استحکام مواد دیگر است. (حرکت زوجی جایگاهی‌ها)

عملیات حرارتی منظم سازی Order-Annealing



جزاء‌های نامنظم

Domain (ب)

Anti phase Boundry

Anti phase Boundry مرزی از تلاقی دو جزء منظم

Antiphase دارای یک بردار است که در حین یکی شدن حرکت می‌کرد.

domain های مناطق منظم هستند.

Subject:
Year. Month. Date. ( )

مرزهای دوقلو کمترین میزان سطح انرژی را در میان مرزها دارا هستند.

این موضوع در Anti phase B. هم صادق بوده و در نتیجه مرزهای دوقلوی در Anti phase B. کمترین میزان سطح انرژی را دارا نیستند.

در هنگام تابش اشعه x (x-ray) شکست‌های غیرمجاز هم وجود داشته باشند نتیجه‌ی میگیریم که تحمل (D/D) در آن‌ها بیشتر بوده است.

سه نوع نابجایی‌ها:
در مواد منظم، نابجایی‌ها تنها حرکت می‌کنند. نابجایی ۱: حرکت سیلان پلاستیک و ایجاد پله‌ای در طرفین صفحه لغزش

نابجایی ۲: برگردان نظم در طرفین صفحه لغزش.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

PqPCO