به نام خدا

مرکز دانلود رایگان
مهندسی متالورژی و مواد

---

www.Iran-mavad.com

خواص مکانیکی مواد ۱ — جلسه اول — ۸۴/۷/۳ — میان ترم (نسبت اول) 1X — پایان ترم (حضوری نیست) 2X

(1) Introduction to dislocation , D.Hull

(2) Mechanical Metallurgy , Dieter

بخش اول: عیب بلوری (نابجایی‌ها)

بخش دوم: مکانیزم‌هایی که باعث مقدم شدن می‌شود

بلور فضای منظمی از نقاط مادی است. هر جای نظمی که در بلور بوجود بیاید، از دید ما عیب خواهد بود.

عیب بلوری از لحاظ هندسی:
1- عیب نقطه‌ای (صفر بعدی)
2- عیب خطی (یک بعدی)
3- عیب سطحی (دو بعدی)

(1) عیب نقطه‌ای:

- جای خالی — Vacancy
- اتم‌های بین نشین — Intertition
- ناخالصی‌ها — Impunities

در جای خالی، خمیدگی ایجاد می‌شود بنابراین اتم‌های همسایه جا به جا می‌شوند. این جا به جایی یک تغییر انرژی یک برهمکنش distortion موضعی است. این عیب یک انرژی دارد. این انرژی مربوط است با مقدار انرژی که برای جا به جایی آن تا خارج بلور صرف می‌کنیم. این عیب حتی در حالت تعادل ترمودینامیکی نیز وجود دارد.

$$n_v = N \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

- n_v: تعداد Vac های در حال تعادل در دمای T
- N: تعداد اتم‌های شبکه
- E: انرژی لازم برای ساختن یک Vacancy
- k: ثابت بولتزمن
- T: دمای مطلق (K)

طبق رابطه با افزایش دما T، n_v افزایش می‌یابد.

بعنوان مثال E برای مس تقریباً 0.7ev است.

یعنی در دمای $T=300K$ داریم $\frac{n_v}{N} \simeq 10^{-2}$

اما در دمای $T=1200K$:

یعنی از هر 1000 اتم یک Vac داریم $\frac{n_v}{N} = 10^{-3}$

$$\Delta G = nE - T\Delta S$$

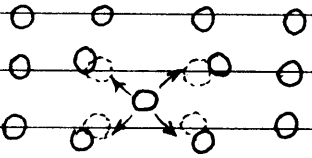
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

Vacancy ها نواحی هستند جون در شبکه انتظار وجود یک اتم وجود دارد ولی اتم وجود ندارد. نفوذ و مقاومت به علت وجود همین Vac ها است. به عنوان مثال اگر بخواهیم طلا در مس را هم بسنجیم و دما را مثلا 1000 بالا ببریم هم نفوذ می کنند بطوری که این نفوذ شدت زیاد طلا از جایی نمونه برداریم ترکیب دومی را خواهیم داشت.

اتم ها با حرکت Vac ها جابجا می شوند و می توانند حرکت کنند. البته خود اتم ها هم می توانند با هم جابجا شوند. (با عامل وصلی حرکت اتم ها، Vac ها هستند. Vac ها بصورت خطی روی خطوط نیز یکی مثل حرارت آنرژی انرژی آنرژی آنرژی تا خواص نمایشی نیروی حرکت تشکیل حلول جامد در بالا، پایین بردن سطح انرژی است.

(2) اتم های بین نشین (اتم های همجنس با خود شبکه):

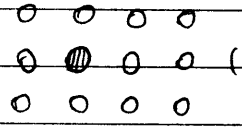


در اینجا یک انرژی به سیستم افزوده می شود. انرژی مورد نیاز برای جا دادن اتم از جنس خود شبکه بسیار بالا است و در عمل در شرایط عادی چنین چیزی وجود ندارد. مگر اشعه انرژی شدید به سیستم برخورد کند (مثلا بمباران هسته ای)

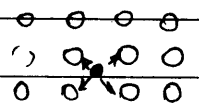
(3) ناخالصی ها:

در دو صورت می توانند وجود داشته باشند

(a) جانشین



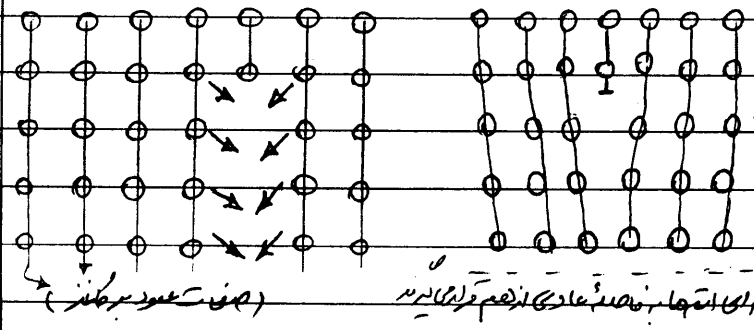
(b) بین نشین



عیوب خطی

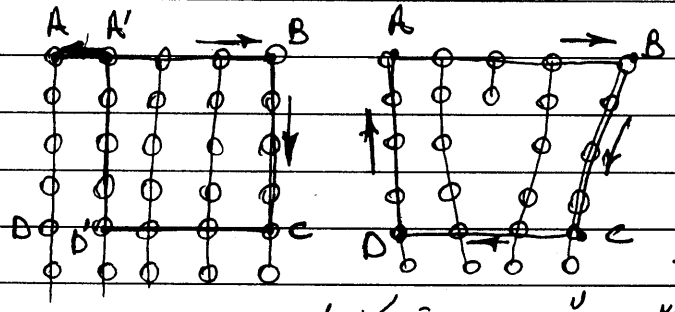
نابجایی ها dislocations و

اگر در بلور وصفی ای به طور کامل نباشد اینهم وصفی ای را وارد وصفیت بلور نکنیم تغییر فرم الاستیک ایجاد می شود



بردار برگرز

وزنه حضور بلور برای ما نقطه تراکم مهم است یعنی وصفیت موازی با هم تفاوتی ندارند بنابراین از اندیس صحیح است روی نیم. بردار Burgers خود شخصیت نابجایی است. اگر وجهت حرکت عقربه های ساعت



که بردار برگرز حول خط نابجایی دوران کنیم و آن بردار را همیشه به جایی دوری از بلور منتقل کنیم که نابجایی وجود ندارد. بردارهای که بردار را تکمیل کند بردار برگرز است

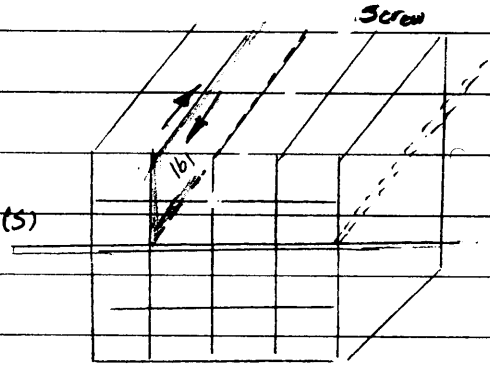
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

جلسه دوم ۸۴/۷/۵

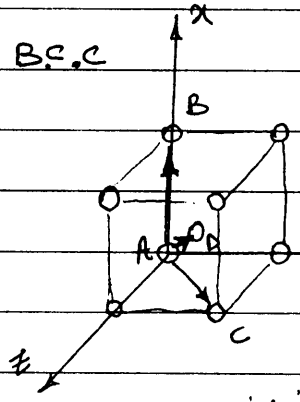
برای تعریف جابجایی یک بردار برگرز تعریف می‌کنیم. بردار برگرز یک جهت بلوری است و جهات بلوری در دهانه‌های بلورشناسی مشخص شده‌اند. با این دهانه‌های بلوری می‌توانیم آن را تعریف کنیم.

edge dislocation (نابجایی پیچی) ⟺ بردار برگرز آن همواره عمود بر خط نابجایی است
screw dislocation (نابجایی پیچی) ⟺ بردار برگرز آن موازی خط نابجایی است
Mixed dislocation (نابجایی مختلط) ⟺ بردار برگرز و خط نابجایی زاویه خاصی دارند



نابجایی مختصاتی دو بعدی پیچی و پله‌ای بوجود آمده است.
screw dislocation

شبکه بلوری صفحه‌ای است صفحه‌ای که اگر بخواهیم آن را در یابیم آن شبکه بدون نابجایی و منظم است، نابجایی در لغزش در راستای صفحه واقع است. این نابجایی بردار برگرز موازی خط نابجایی است
بردار برگرز برداری است بین دو اتم شبکه



$\vec{AB} = \vec{b} = a[100] = a$
$\vec{AC} = \vec{b} = a[011] = a\sqrt{2}$
$\vec{AD} = \vec{b} = \frac{a}{2}[111] = \frac{a\sqrt{3}}{2}$

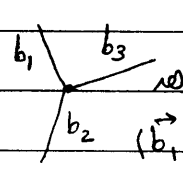
جهت — بزرگی بردار برگرز

در شبکه BCC به عنوان مثال داریم:
بنابراین بردار برگرز را می‌توان با دو نوع جهت و با بزرگی مشخص کرد.
مثلاً بردار برگرز به صورت $\frac{a}{2}[110]$ بیان می‌شود می‌توانیم بگوییم در BCC می‌توانند وجود داشته باشند این بردار مخصوص FCC است

بردار برگرز چون یک جهت بلوری است مستقل از خط نابجایی است. یعنی با تغییر بردار برگرز خط نابجایی تغییر نمی‌کند. آنچه تغییر می‌کند زاویه بین بردار برگرز و خط نابجایی است (مثلاً پیچی ← پله‌ای یا برعکس ممکن است تغییر کند)

اصول خط نابجایی:

یک خط نابجایی در داخل بلور نمی‌تواند انتهای آزاد داشته باشد یا به سطح بلور می‌رسد (مفهوم شبکه نابجایی مطرح می‌شود)
یا با نابجایی‌های دیگر تشکیل گره نابجایی می‌دهد
یا حلقه بسته تشکیل می‌دهد



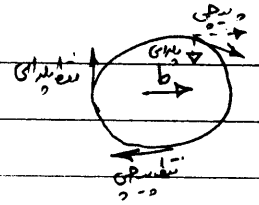
$(\vec{b_1} + \vec{b_2} + \vec{b_3} = 0)$ گره

در نابجایی تعداد زیادی از اتم‌ها در جاهای مختلف نابجایی‌های مختلفی داریم

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در اینجا به نابجایی ها اشاره داریم.



دانسیته نابجایی:

$$\text{دانسیته نابجایی} \left(\frac{1}{cm^2}\right) = \frac{\text{طول کل نابجایی}}{\text{حجم}}$$

$$\text{دانسیته نابجایی} \left(\frac{1}{cm^2}\right) = \frac{\text{تعداد خطوط نابجایی}}{\text{واحد سطح}}$$

(حتی تعریف دانسیته برای طول نابجایی ها صحیح است)
این بسیار قابل دسترسی نیست. بنابراین ساده می کنیم. البته مقداری که به دست می آوریم صحیح تنها برای مقایسه است. وقت اضافی لازم نداریم.

معمولاً در حالت عادی (وقتی تنش نداریم) این مقدار حدود 10^6 خط بر cm^2 است. اگر این مقدار روی صفحات مختلف شبکه بررسی کنیم تفاوت خیلی زیاد نیست. بنابراین فرقی نمی کند کدام صفحه را انتخاب کنیم. این مقدار ممکن است در اثر عملیات مکانیکی یا حرارتی متفاوت باشد تا 10^{15} یا 10^{11} خط در سانتیمتر مربع افزایش یابد. این مقدار دانسیته نابجایی است بیشتر فلزی و سایر خواص مکانیکی مرتبط با این کمیت است.

حرکت نابجایی:

۱- حرکت لغزشی (لغزش)

۲- حرکت صعودی (صعود)

نابجایی یک عیب خطی است که می تواند در داخل بلور حرکت کند. این حرکت به دو صورت زیر است:

لغزش: یک نابجایی می تواند روی سطح لغزش خود در جهت لغزش، حرکت لغزشی انجام دهد.
این حرکت حاصل تأثیر تنش یا به عبارتی نیرویی است که به آن می رسد

سطح لغزش: سطحی است که خط نابجایی و بردار برگرز آن را در بر می گیرد. در نابجایی پیچی سطح لغزش منحصر به فرد است زیرا دو بردار مضرب هم هستند و صفحه ای تشکیل می دهند که شامل آن است. بنابراین تنها یک موقعیت وجود دارد. در نابجایی پیچی سطح لغزش نیز مشخص است زیرا بردار برگرز و خط نابجایی بالاجبار موازی اند و دو خط موازی در هر حالتی تشکیل یک صفحه می دهند. پس یک صفحه وجود دارد.

جهت لغزش: جهت لغزش همان جهت بردار برگرز نابجایی است.
نابجایی در هر جهتی نمی تواند روی سطح لغزش حرکت کند بلکه تنها در جهات لغزش می تواند حرکت کند.

چه وقت می تواند؟ شرط لغزش این است که سطح لغزش نابجایی سطح فشرده باشد. بنابراین جهت لغزش هم باید جهت فشرده باشد
پس: «نابجایی روی یک سطح فشرده در جهت فشرده می تواند حرکت کند.»

s.a.m

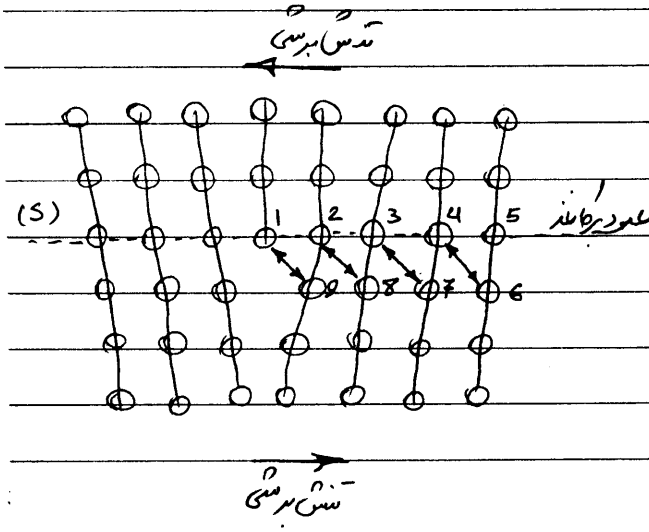
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

شبکه بلوری	سطوح لغزش	جهات لغزش	سیستم لغزش
F.C.C	$\{111\}$ 4	$\langle 110\rangle$ 3	$\{111\}\langle 110\rangle$ 12 ①
B.C.C	$\{110\}$ 6	$\langle 111\rangle$ 2	$\{110\}\langle 111\rangle$ 12 ③
H.C.P	$\{0001\}$ 1	$\langle 11\bar{2}0\rangle$ 3	$\{0001\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 3 ②

در هر شبکه بلوری سطح لغزش و جهت لغزش در روابط ارضای لغزش صدق می کند.
در FCC صفحه $\{111\}$ صفحه لغزش داریم به عنوان مثال.
بدیهی است که سیستم لغزش هر چه بیشتر باشد لغزش بهتر انجام می شود ولی فشردگی عامل اول تعیین نشده است بنابراین اگر بخواهیم طبقه بندی کنیم به ترتیب FCC ، B.C.C, H.C.P خواهد بود.
صفحه $\{110\}$ در BCC خیلی کمتر از صفحه $\{111\}$ FCC فشرده است
صفحه $\{0001\}$ در H.C.P فشردگی دقیقاً برابر $\{111\}$ FCC است. چون ترتیب قرار گرفتن اتم ها به هم دیگر دو بعدی است.
بنابراین لغزش در Al بهتر نسبت به Fe است هم صفحه، Mg بهتر از آهن و کمتر از Al حرکت می دهد

حرکت لغزشی یا جابجایی:
حرکت نابجایی را از دو دیدی می توان بررسی کرد یکی مکانیزم لغزشی است یعنی چه جوری لغزش انجام می شود
دومین نتیجه لغزشی است یعنی چه تغیراتی در اثر لغزش بوجود می آید.

مکانیزم لغزش:
توجه می کنیم که اتم هایی که در روی خط نابجایی قرار گرفته اند پیوند جهارم ندارند.
اگر بلورتحت تنش برشی قرار بگیرد در اثر تنش اتم های شده پیوندها می توانند جابجا شوند. حالت الاستیک اتم ها باقی می شود که با اولین تغییر پیوند خط نابجایی از موقعیت (1) به (2) جابجا می شود



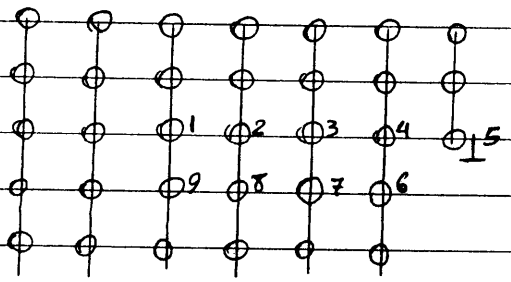
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

و این چنین ترتیب پرینت ها به اتمام می رسد.

بنابراین ناحیه ای با تعداد پرینت ها حرکت می کند

ناحیه ای مشتق از اتم ها است. قابل تصور نیست که این مشتق بتواند در جهت حرکت کند چون اصلا جایی برای این حرکت وجود ندارد. پس لحاظ نظری نادرست است این حرکت تغییر موقعیت پرینت هاست. تقریبا مانند حرکت یک موج که ساده نیست است ولی موج حرکت می کند. و اینجا هم اتم ها به صورت سیار از جای حرکت نمی کنند



پرینت های بعد از نوشتن
- 1 ↔ 9
- 2 ↔ 8
- 3 ↔ 7
- 4 ↔ 6
- 5 → موقعیت جدید ناحیه ای

پرینت های قبل از نوشتن
- 1 → پرینت جدید نداشت
- 2 ↔ 9
- 3 ↔ 8
- 4 ↔ 7
- 5 ↔ 6

نقطه شروع نوشتن ناحیه ای شروع می شود

مشکل نشدن به معنی نزدیکی اتم ها بنابراین:

علت نیاز به نوشتن این است که با نوشتن کمتر تغییر پرینت ها راحت تر صورت پذیرد.

باید بگویم خواندن و نوشتن دو مشکل بزرگ هارد دیسک بدون حضور ناحیه ای نیاز به تنش بسیار بالایی دارد که ما نمی توانیم تأمین کنیم. پس وجود ناحیه ای نوشتن را ساده می کند

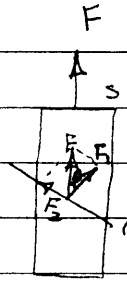
s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

جلسه سوم ۱۰/۷/۸۴

نتیجه: تنش تغییر شکل پیدا میکند است



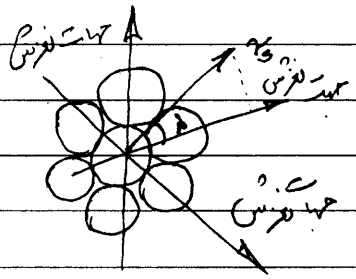
$\sigma = \frac{F}{S}$

$F_1 = F\sin\theta \qquad \tau_S = \frac{F\sin\theta}{S/\cos\theta}$

$F_{\frac{1}{2}} = F\cos\theta$

تنش برشی $\tau_S = \frac{F_2}{S'} \qquad \tau_S = \frac{F}{S}\sin\theta\cos\theta$

$S = S'\cos\theta \qquad \tau_S = \frac{F}{2S}\sin 2\theta$



$\tau_{RS} = \frac{F}{2S}\sin 2\theta\cos\lambda$

مؤلفه تنش برشی در جهت حرکت نابجایی:

همانطور که دیده می شود مؤلفه تنش برشی

در جهت حرکت نابجایی اثر می کند تنش نرمال و زاویه صفحه لغزش این را دارد

در واقع همین مقدار جهت تغییراتی دهد و دارد و میزان تنش برشی در صفحات مختلف

متفاوت خواهد بود. با این مؤلفه تنش نابجایی حرکت کند و فرض می کنیم که

به انتهای بلور برسد و بصورت پله ای از بلور بیرون بیاید. اندازه پله را اندازه b خواهد

بود و یک مؤلفه در جهت تنش نیز دارد. بنابراین در لغزش کار انجام می شود و انرژی

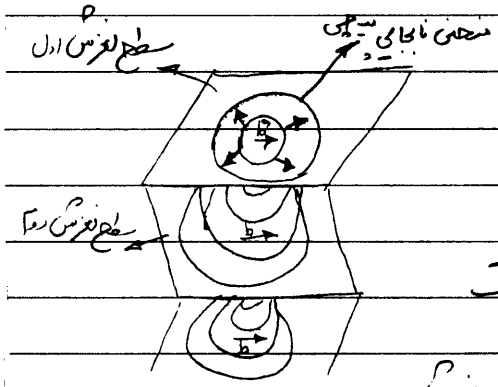
آن که از نیروی خارجی داده می شود و هر چیز طبیعت سعی می کند که حالت

این انرژی بصورت حرارت آزاد شود. بنابراین اندازه گیری می کنیم (با کرنش سنج) البته همچنین دلیلی ندارد که هر نابجایی در اثر لغزش

بالاخره به سطح برسد و یک اندازه پله ایجاد کند. یعنی اگر به انتها نرسد، در هر حال در لغزش کرنش ایجاد می کند و مؤلفه تنش کرنش دارد.

نابجایی پیچی فقط روی سطح لغزش حرکت می کند. نابجایی پیچی سطح لغزش مشخصی ندارد و می تواند سطح لغزش خود را عوض کند

اما نابجایی پله ای نمی تواند از سطح لغزش خود خارج شود



لغزش تقاطعی (متقاطع Cross slip)

مکانیزم لغزش مربوط به نابجایی پیچی است.

همواره در اثر تنش برشی همراه با حرکت نابجایی وارد می شود.

بنابراین نابجایی همواره عمود بر سطح خود حرکت می کند

اگر نابجایی بصورت حلقه ای باشد، نیروی وارده بر آن بصورت شعاعی است

پس حلقه نابجایی در اثر تنش همواره منبسط می شود.

وقتی نابجایی پیچی می رسد که نتواند حرکت کند (مثلاً مانع) مجبور می شود سطح لغزش

خود را عوض کند (متقاطع) که سطح لغزش خود را عوض می کند مجدداً شروع به لغزش می کند

لغزش تقاطعی از لغزش ساده روی سطح مشکل تر است (انرژی بیشتری لازم دارد) اما قابلیت تغییر بیشتری دارد

نابجایی پله ای، چون نابجایی پله ای نمی تواند سطح لغزش خود را عوض کند، اما پیچی می تواند (با لغزش تقاطعی)

نابجایی حرکت علامت Reversible دارد، وقتی برگردد منطقه پلاستیک شده دیگر پشت ندارد (اگر نسبت شده نمی شود) بنابراین منطقه الاستیک

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

حرکت صعودی (خزش نابجایی پله‌ای)

حرکت صعودی برای نابجایی پیچی مفهوم ندارد چون سطح لغزش خود را با نوار تقاطعی خود عوض می‌کند

برای تشریح بهتر از مجموعه اتم‌های روی خط نابجایی لبه استفاده می‌کنیم

اگر اتم A را از شبکه خارج کنیم، خط نابجایی یک پله بالا رفته و سطح لغزش (S) به (S') تبدیل می‌شود. این پدیده صعود مثبت نامیده می‌شود.

حال اگر در مجاورت اتم A یک اتم دیگر اضافه شود، خط نابجایی تغییر می‌کند

به این حالت صعود منفی می‌گویند. در هر دو حالت خط نابجایی به اندازه یک پارامتر شبکه جابجا می‌شود

بنابراین می‌توانیم بگوییم برای این پدیده تفسیر نیم:

صعود مثبت
- تفوذ Vacancy ها ← خروج خط نابجایی و جذب آن‌ها در خط (در اثر Vacancy ↓)
- تولید یک اتم بین نشین زیر خط نابجایی و حرکت آن در شبکه (تفوذ)

توضیح: منظور این است چون اطراف اتم A یک منطقه منبسط است، خود اتم A به صورت بین نشین درمی‌آید و شروع به حرکت می‌کند

اتم بین نشین از خود یک انرژی القا شده دارد بنابراین احتمال وقوع آن بسیار کم است ولی وقتی اتفاق می‌افتد از طرف اثر حرکت یک اتم روی اتم‌های اطراف انرژی بالایی نیاز دارد یعنی اگر جایی نخواهد به حال تعادل باشد همان زیر خط نابجایی است که منطقه منبسط است.

صعود منفی
- تفوذ اتم‌های بین نشین ← خروج خط نابجایی و جذب آن‌ها در خط (از لحاظ انرژی بسیار احتمالی دارد)
- تولید یک Vacancy ← خط نابجایی و حرکت آن در شبکه (در اثر Vacancy ↑)

اگر اتم‌های بین نشین از خود شبکه خارج شده و با شبکه جای خالی پر کنند به آن‌ها اتم‌های جانشینی گفته می‌شود که بسیار کم‌تر از اتم‌های خود شبکه تشکیل می‌شوند. نتیجه‌ی این نوع صعود مثبت Vacancy ها را کنترل می‌شود

حال این طور می‌توانیم بگوییم که خط نابجایی یک اتم نیست بلکه تعداد بسیار زیادی از اتم‌ها را تشکیل دهند و وقتی یک Vacancy حرکت کند، سبب خط نابجایی احتمال اینکه خود اتم‌ها جابجا شوند بسیار است. در نتیجه احتمالی جذب شود بخشی از خط نابجایی منطبق بالا تشکیل می‌شود یک پله‌ای ایجاد می‌شود (jog)

بنابراین صعود عبارت است از تولید jog روی خط نابجایی و حرکت jog روی خط نابجایی

خط نابجایی همیشه همراه با jog است

$$U_{cc} = U_0 + U_V + U_m$$

- U_0: انرژی خط نابجایی
- U_V: انرژی تولید jog
- U_m: انرژی تولید Vacancy
- انرژی حرکت Vacancy

انرژی حرکت Vacancy ها بیشتر از انرژی تولید آن‌ها می‌باشد

احتمال جذب Vacancy و ایجاد صعود زیاد است زیرا

برای حرکت Vacancy در بلور به تبادل اتم نیاز است

اما برای تعادل Vacancy ها کمتر از حد تعادل می‌باشد

انرژی صعود منفی کمتر است

جهت صعود را بیشتر تنش‌ها تعیین می‌کنند یا Vacancy

حرکت jog

Vacancy ← جذب

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

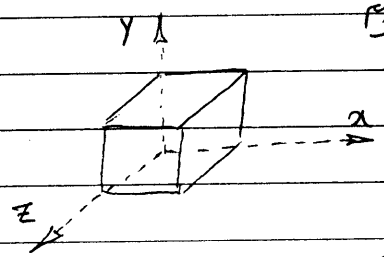
در وضعیت مساوی آن حالتی را داریم که Uncertainty از یک تعادل بسیار صعودی کند.

« الاستیسیته نابجایی »

نشتم در اطراف خط نابجایی اتم‌ها جابجا می‌شوند تا آن خط را وصل کنند. این جابجایی به صورت الاستیک یعنی در اطراف خط نابجایی یک میدان برشی الاستیک وجود دارد که از این میدان برشی داریم می‌توانیم میدان تنش را بدست آوریم و از روی میدان تنش می‌توانیم انرژی را حساب کنیم. در نتیجه انرژی ذخیره می‌شود.

۸۴/۷/۱۲ جلسه چهارم

وقتی صحبت از الاستیک داریم یک میدان برشی در نزدیکی خط نابجایی وجود دارد. از روی فرمول‌های تنش را داشته باشیم می‌توانیم و انرژی این میدان را با میدان‌های دیگر که می‌تواند وجود نابجایی باشد یا نباشد را بدست آوریم. بنابراین برای کنترل خواص یک نابجایی باید بتوانیم میدان تنش و کرنش را در اطراف آن بدست آوریم

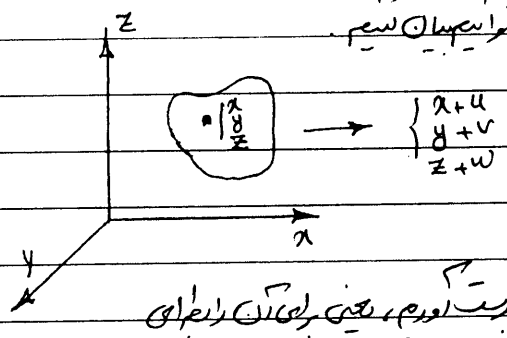


برای این المان ۶ مؤلفه تنش کرنش می‌توانیم

ε_x	σ_x	γ_{yz}	τ_{yz}	ε_x	X
ε_y	σ_y	γ_{xz}	τ_{xz}	ε_y	Y
ε_z	σ_z	γ_{xy}	τ_{xy}	ε_z	Z

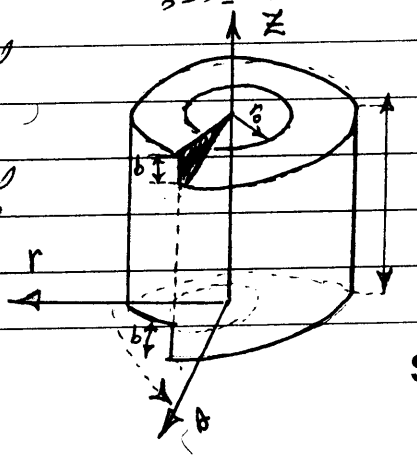
تنش ← کرنش

متصور شویم. بنابراین ۶ مؤلفه کرنش هم می‌توانیم داشته باشیم. پس میدان‌های تنش و کرنش را برای این مؤلفه‌ها می‌توانیم بیان کنیم.



از جسم یک شبکه‌ی بسیار ریز تصور کنیم به تغییر شکل می‌دهیم، بعد از تغییر شکل نقاط $\begin{matrix}x\\y\\z\end{matrix}$ تبدیل می‌شوند به $\begin{matrix}x+u\\y+v\\z+w\end{matrix}$ که u و v و w به ترتیب جابجایی‌ها در x و y و z هستند. اگر u و v و w را برای تمام نقاط جسم بدست آوریم، یعنی برای آن را داشته باشیم می‌توانیم کرنش را بدست آورده‌ایم. u و v و w می‌توانند هر کدام تابع x و y و z باشند.

« میدان تنش حول یک نابجایی پیچی »



اگر بردار Burgers را در نظر بگیریم (ترجمه‌ای) و این بردار را روی صفحه‌ای عمود بر خط نابجایی که صفحه‌ی ماده‌ای از دست نداده‌ایم اگر این جسم را در جهت محور استوانه بکشانیم، اندازه‌ها و محورها را $R\theta Z$ انتخاب کنیم، تنش‌هایی که می‌تواند وجود داشته باشد بر حسب Z است

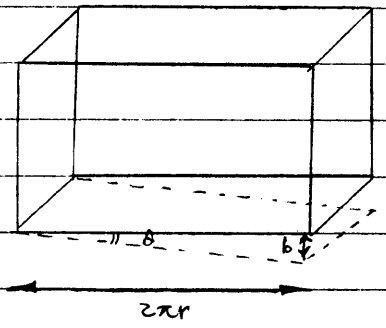
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

$$\frac{\gamma}{\theta z} = \varepsilon_{\theta z} = \frac{b}{2\pi r}$$

$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r} \quad \text{(Screw)}$$

در نقطه‌ای که روی یک دور نظر گرفته‌ایم و 360° روی جسم گرخیده، اندازه‌ی b باید خواهیم آمد. درست مانند اینکه یک نابجایی دورانی قرار گرفته باشد یعنی مدار گرد شدن نابجایی باعث ایجاد برداری برابر با b می‌شود.

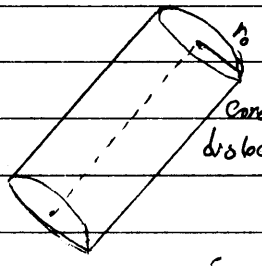


اگر این Rink را باز کنیم یک مکعب مستطیل می‌شود
سپس برای این مکعب یک اندازه b (یا $\frac{b}{2}$) پایین آوردیم
به جای اینکه برای آن دیگر آن را ثابت نگه داشتیم
سپس آن را به حالت اولیه برگردانیم $\frac{b}{2\pi r}$ است و در جهت z است
چون تمام جابجایی ها در جهت z است.
اگر محور z را مخصوص گرفتن نقطه‌ای بگیریم بنابراین دستگاه داریم:

$$\tau_{xz} = -\frac{Gb}{2\pi}\frac{y}{x^2+y^2}$$

$$\tau_{yz} = \frac{Gb}{2\pi}\frac{x}{x^2+y^2}$$

$(r > r_0)$ (Screw)



رابطه‌ای که ما دیدیم میدان تنش براساس نابجایی متناسب با $\frac{1}{r}$ است
یعنی $r \to 0$ تنش بینهایت در داخل شبکه $\tau \to \infty$
مفهوم ندارد.
برای این مورد که با Rink
از نقطه‌ای گرفتیم یعنی برای هر خط نابجایی
یک محدوده‌ای داریم یک شعاعی مانند r_0 که آن
core of dislocation می‌گوییم که در این فاصله از این اصطلاحات
نیستند. ما در اینجا حالتی را در نظر گرفتیم که شعاع اثر نابجایی بی‌نهایت شده. به همین دلیل برای میدان
تنش و کرنش از فرمولهای بدست آمده استفاده می‌کنیم. یعنی فرض می‌کنیم ماده سرتاسر است. اما وقتی خیلی
نزدیک خط نابجایی می‌شویم دیگر نمی‌توانیم ماده را پیوسته فرض کنیم. چرا که در آنجا باید جابجایی اتم به اتم
را در نظر بگیریم اما این را نکردیم. ما نقطه‌ها را در نظر گرفتیم و جابجایی آن‌ها را حساب کردیم. پس بنابراین
برای استفاده از فرمولهای محدودیت قائل می‌شویم و در اطراف نابجایی نمی‌توانیم بگوییم r_0 مورد کوچکی است
در حدود b تا 5b.

« میدان تنش (نابجایی پیچی) »

اگر از همین روشی که استفاده کردیم یا از یکی از روابط 1 و 2 و 3 این نتایج بدست می‌آید:

$$\sigma_x = -Dy\frac{3x^2+y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

$$\sigma_y = Dy\frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x+\sigma_y)$$

$$\tau_{yz}=0,\quad \tau_{xz}=0$$

$$\tau_{xy} = Dx\frac{x^2-y^2}{(x^2+y^2)^2}$$

$$D = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}$$

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

ν ضریب پواسون $\quad \nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad \Rightarrow \quad \nu = \left| \frac{\text{کرنش عرضی}}{\text{کرنش محوری}} \right|$

برروی تقارن استوانه‌ای می‌توان نوشت:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -D\frac{\sin\theta}{r}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \qquad \text{(edge)}$$

$$\tau_{\theta r} = D\frac{\cos\theta}{r}$$

همانطور که ملاحظه می‌شود نزدیک جایی که میدان تنش، زاویه θ بستگی دارد در جایی که در اطراف نابجایی پیچی میدان تنش به θ بستگی ندارد. از تعریف این نابجایی‌ها نیز چنین برمی‌آید

«انرژی الاستیک»

هر نابجایی یک انرژی الاستیک در سیستم ذخیره کرده که می‌توانیم آن را براساس کرنش حاصله، بدست آوریم.
ما تقوانیم را به دو قسمت تقسیم کردیم، یعنی نابجایی در اطراف خودش و منطقه‌ای دارد. Core و خود میدان تنش که قوانین ماکروسکوپی صادق نبود. بنابراین انرژی کل ذخیره شده در سیستم از دو قسمت تشکیل شده

Energy elast. tot = Energy elast. dis + Energy elast. Core

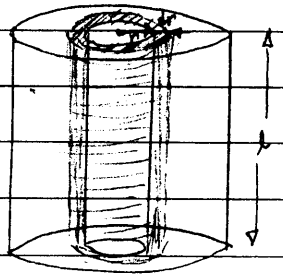
انرژی Core را نمی‌خواهیم بدست آوریم بنابراین انرژی مربوط به Core را نمی‌توانیم محاسبه کنیم و آن را فرض می‌کنیم.

چون انرژی فضای الاستیک را با دقت نمی‌توانیم بنابراین مهم نیست که $E_{elast\ core}$ چقدر است. انرژی نابجایی را بدست آوریم تقریبا صحیح است، می‌توانیم مقداری برای آن فرض کنیم.

در یک محیط کرنش یافته می‌توانیم انرژی برواحد حجم را حساب کنیم:

مقدار $\frac{1}{2}\tau\gamma$ سطح زیر نمودار تنش کرنش یا به عبارتی مساحت مثلث است بنابراین الاستیک

$$\frac{dE}{dV} = \frac{1}{2}\tau\gamma$$



اگر Rink را در نظر بگیریم: $dV = 2\pi r\,dr\,b$ اگر b را برابر فرض کنیم

$$\Rightarrow dE = \frac{1}{2}\left(2\pi r\,dr \times b\frac{\tau^2}{2\pi r}\right)$$

انرژی که محاسبه می‌کنیم برواحد طول خواهد بود

$$dE = \frac{1}{2}\tau b\,dr$$

این یک رابطه‌ای است برای Rink

حالا برای نابجایی پیچی و پیچ‌ها جایگزین می‌کنیم

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

برای نابجایی پیچی: $dE = \frac{1}{2}\tau b\, dr$

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi r}$$

$$dE = \frac{1}{2}\frac{Gb}{2\pi r} b\, dr$$

$$E = \int_{r_0}^{r_1} \frac{Gb^2}{4\pi}\frac{dr}{r}$$

$$E_{\substack{(screw)\\elast}} = \frac{Gb^2}{4\pi}\ln\frac{r_1}{r_0}$$

برای نابجایی لبه‌ای: $dE = \frac{1}{2}\tau b\, dr$

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\frac{\cos\theta}{r}$$

$$dE = \frac{1}{2}\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} b\frac{\cos\theta}{r} dr$$

$$E = \int_{r_0}^{r_1} \frac{1}{2}\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)}\frac{\cos\theta}{r} dr \quad (1)$$

$$E_{\substack{(edge)\\elast}} = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)}\ln\frac{r_1}{r_0}$$

انرژی الاستیک بر واحد طول

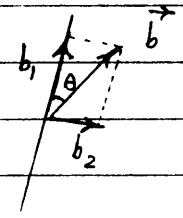
r_0 را در اینجا تعریف می‌کنیم. به شدتی به نابجایی‌ها دارد:

- نابجایی کم: r_1 = ابعاد بلور (حل بلور)
- نابجایی زیاد: r_1 = فاصله متوسط نابجایی‌ها

(1) چون در اینجا $\cos\theta$ داریم، برای راحتی کار انرژی الاستیک را روی سطح $\theta = 0$ (یا سطح $\pi/2$) در نظر می‌گیریم

انرژی الاستیک نابجایی مختلط:

اگر b مولفه پیچی نابجایی مختلط و b_2 مولفه لبه‌ای آن باشد می‌توانیم بنویسیم:



$$E_{\substack{elast\\(mixed)}} = E_{\substack{elast\\(screw)}} + E_{\substack{elast\\(edge)}}$$

$$= \left[\frac{Gb_1^2}{4\pi}\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{Gb_2^2}{4\pi(1-\nu)}\ln\frac{r_1}{r_0}\right]$$

$b_1 = b\cos\theta$

$b_2 = b\sin\theta$

$$= \left[\frac{Gb^2\cos^2\theta}{4\pi}\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{Gb^2\sin^2\theta}{4\pi(1-\nu)}\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)\right]$$

$$= \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)}\ln\frac{r_1}{r_0}\left[(1-\nu)\cos^2\theta + \sin^2\theta\right]$$

$$= \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)}\ln\frac{r_1}{r_0}\left[1-\nu\cos^2\theta\right]$$

انرژی الاستیک بر واحد طول نابجایی مختلط

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اگر دقت کنیم، متوجه خواهیم شد چون b_1 کوچکتر از یک است بنابراین انرژی الاستیک بردار اصطکاک نابجایی پله از بیشتر از انرژی الاستیک بردار اصطکاک پیچی است. انرژی الاستیک بردار اصطکاک نابجایی مختلط مقداری بین این دو مقدار است.

نتیجه می‌گیریم هر چه درآمدن نابجایی پیچی محتمل‌تر از نابجایی لبه‌ای است.

در حالت کلی به دست آمده α تقریباً مقدار ثابتی است، α هم به صورت تقریبی انرژی الاستیک بردار اصطکاک نابجایی با b^2 متناسب است یعنی ضریبی از آن است.

$$E_{el} = \alpha G b^2$$

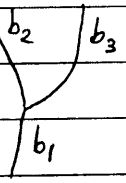
α بر حسب نابجایی فرق می‌کند. ضریبی است که همواره کوچکتر از یک است.

اگر از یک بلور صحبت کنیم شبکه بلور مشخص و در این صورت معمولاً برشی هم ثابت است پس در یک حالت خاص:

$$E_{el} \propto b^2$$

"تفوق واکنش"

در داخل یک بلور چون انرژی الاستیک بردار اصطکاک متناسب با b^2 است. می‌توانیم با برقرار شدن برداری بر روی اتمان ترکیب و تجزیه نابجایی‌ها (بردار برگرز) را پیش‌بینی کنیم.



$$\vec{b_1} \longrightarrow \vec{b_2} + \vec{b_3}$$

شبکه اگر بردار b تجزیه شود، حالت روبرو تجزیه می‌شود.

تفوق واکنش می‌گوید نابجایی اتمان نیست که انرژی کاهش یابد.

یعنی انرژی الاستیک بردار اصطکاک نابجایی اولیه بیشتر از انرژی الاستیک بردار اصطکاک دو نابجایی به وجود آمده باشد. (یعنی در جهت کاهش انرژی برویم)

به عبارت دیگر باید داشته باشیم:

$$b_1^2 > b_2^2 + b_3^2$$

عکس این مطلب هم به همین ترتیب است. یعنی اگر قرار باشد دو نابجایی ترکیب شوند باید در جهت کاهش انرژی باشد تا اتمان پذیر باشد.

به عنوان مثال در شبکه FCC یک نابجایی مهم داریم: $\frac{a}{2}[110]$ بردار برگرز آن بین اتم‌ها است ولی اتم‌ها صفحاتی هستند (یکی از صفحات است) که اتم‌ها آن‌ها را نشان می‌دهند.

$$\frac{a}{2}[110] \longrightarrow \frac{a}{6}[121] + \frac{a}{6}[2\bar{1}1]$$

یک تجزیه‌ای مد نظر است که از لحاظ برداری درست است:

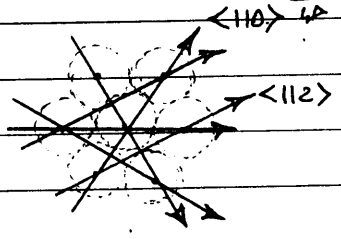
$$\begin{cases} a/2(1) = a/6(1) + a/6(2) \\ a/2(1) = a/6(2) + a/6(1) \\ a/2(0) = a/6(1) + a/6(\bar{1}) \end{cases}$$

اگر بخواهیم از لحاظ انرژی بررسی کنیم:

$$(a^2/4 + a^2/4 + 0) \longrightarrow (a^2/36 + 4a^2/36 + a^2/36) + (4a^2/36 + a^2/36 + a^2/36)$$

$$a^2/2 \longrightarrow a^2/3$$

یعنی از لحاظ انرژی هم این تجزیه اتمان پذیر است.



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

مثال دیسلوکیشن BCC از نظر برداری :

$$\frac{a}{2}[111] \longrightarrow \frac{a}{3}[111] + \frac{a}{6}[11\bar{1}]$$

از لحاظ انرژی :

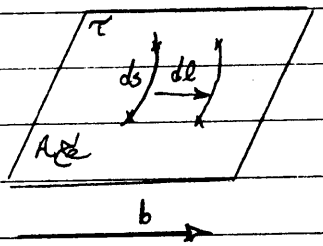
$$\left[\frac{a^2}{4}+\frac{a^2}{4}+\frac{a^2}{4}\right] \longrightarrow \left[\frac{a^2}{9}+\frac{a^2}{9}+\frac{a^2}{9}\right]+\left[3\times\frac{a^2}{36}\right]$$

$$\frac{3a^2}{4} \longrightarrow \frac{5a^2}{12}$$

پس از لحاظ انرژی قابل انجام است.

« جلسه پنجم » ۱۷/۷/۸۷

« نیرو روی خط نابجایی »



اثر تنش برروی سطح نابجایی ایجاد می شود متناظر با آن یک نیرو وجود دارد و برعکس هر نیرو یک تنش متناظر دارد. این تنش میزان تمایل تنش برای حرکت نابجایی است. این تنش می تواند خارجی باشد و ما ایجاد کنیم یا داخلی باشد مثل اثر میدان تنش دو نابجایی بر یکدیگر. ابتدا نیرو بر اثر تنش ایجاد شده بر روی نابجایی

نیرو جابجایی

$$W = \left(\frac{ds.dl}{A}\right) b \times \tau A$$

$$W = \tau b\, ds\, dl$$

$$F = \frac{W}{dl} = \tau b\, ds$$

$$f = \tau b$$

نیرو بر واحد طول نابجایی

بررسی سطح لغزش می بینیم که تنش τ بر سطح نابجایی وارد می شود می خواهیم ببینیم چه نیرویی بر نابجایی وارد می شود؟ وقتی می گوییم بر اثر تنش τ یک انسان کوچک نابجایی مثل ds به اندازه dl حرکت کند سطح جاروب شده $ds.dl$ است. نیروی که بر کل صفحه A وارد می شود (τA) است. $\left(\frac{ds\,dl}{A}\right)$ کسری از سطح است که تنش روی آن اثر می کند.

برای این جابجا شدن :

جابجایی روی سطح برابر : $\left(\frac{ds.dl}{A}\right) b$

چون اثر جابجایی تمام سطح A را جاروب کرده جابجایی به اندازه برداری برآیند طرح شده بود. بنابراین جابجایی کسری از سطح جاروب شده به اندازه جابجایی صورت گرفته است.

W برابر است با نیرو در جهت ایجاد نابجایی به اندازه dl است.

جهت نیرو همیشه عمود بر خط نابجایی است. زیرا جهت حرکت همواره خط نابجایی است.

چون دو لبه نابجایی ثابت است، حرکت نابجایی به معنای ازدیاد طول و خمیده شدن آن است.

دو انتها یا گره نابجایی برابر است یا برطرف شده است بنابراین آن ها نمی توانند حرکت کنند.

ازدیاد طول نابجایی یعنی از انرژی بیشتر، پس حرکت نابجایی همراه با ازدیاد انرژی است

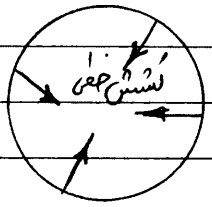
پس یک نیروی المثنی در جهت کاهش انرژی است. به این نیروی عکس العمل تنش خط می گوییم. در واقع نیرویی است که می خواهد طول نابجایی (یعنی انرژی) را Min کند

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

یا اگر حفره نابجایی داشته باشیم، تنش خطی در جهت کاهش سطح عمل می‌کند.



تنش خطی: افزایش انرژی به ازای افزایش واحد طول نابجایی است (از جنس نیرو)

تنش خطی $T = \alpha G b^2$

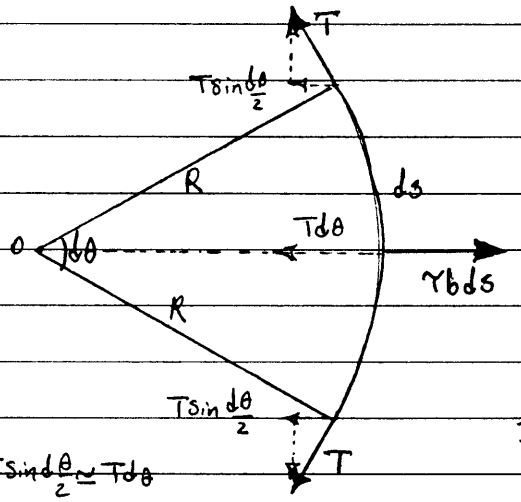
می‌توانیم تنش خطی را برحسب تنش اعمال شده محاسبه کنیم.

τ: تنش

τb: نیروی واحد طول

$\tau b ds$: نیروی وارد بر طول ds

$T d\theta$: برآیند نیروهای وارد بر اثر تنش خطی



نابجایی با طول ds را در نظر می‌گیریم که شعاع انحنای آن R و زاویه انحنای آن $d\theta$ باشد. تنش τ در جهت عمود بر ds نیرو وارد می‌کند. نیروها را تصویر می‌کنیم روی محور افقی. نیروی τbds از طرف میدان تنش وارد می‌شود که تنش خطی باید از خمیدگی نابجایی جلوگیری کند. بنابراین برآیند به صورت عمود بر هر خط نابجایی وارد می‌شود. مؤلفه‌های عمودی یکدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین مجموع نیروهای بازدارنده $2T\sin\frac{d\theta}{2}$ می‌شود و چون $d\theta$ کوچک است برابر $Td\theta$ می‌شود. برای اینکه این دو نیرو با هم متعادل شوند داریم:

$$Td\theta = \tau b\, ds \xrightarrow{ds = R d\theta} R = \frac{T}{\tau b} \Rightarrow R = \frac{\alpha G b}{\tau}$$

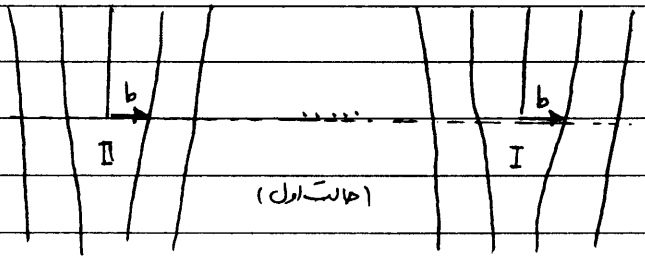
معادله بین سطح انحنا و تنش اعمال شده:

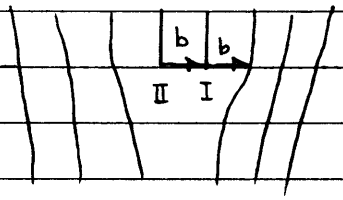
نیروی بین دو نابجایی:

فرض کنیم تنش‌هایی که توانند داخلی یا خارجی باشند. در اینجا اگر تنش داخلی یعنی نیروی بین دو نابجایی را بررسی کنیم.

قبل از اینکه از لحاظ کمی بررسی کنیم از لحاظ کیفی می‌نویسیم:

اگر دو نابجایی لبه‌ای روی یک سطح لغزش در نظر بگیریم و برداربرگرس هر دو b باشد و در فاصله دور از هم باشند به طوری که هیچ برهم‌کنشی با هم نداشته باشند (هیچ نیرویی) این حالت را با حالتی دو نابجایی هم‌علامت مقایسه می‌کنیم





حالت اول: $E_{el} = E_{el(I)} + E_{el(II)} = \alpha G b^2 + \alpha G b^2 = 2\alpha G b^2$

حالت دوم: $E_{el} = \alpha G (2b)^2 = 4\alpha G b^2$

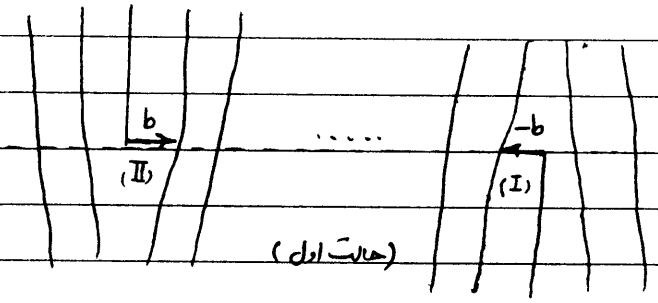
s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

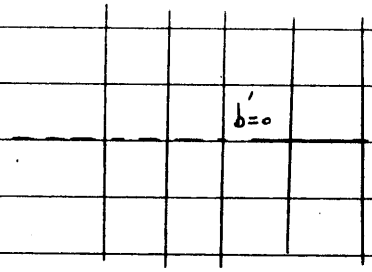
در حالت دوم فرض کردیم دو نابجایی آنقدر به هم نزدیک شوند که به هم برسند یعنی دو نیم صفحه دو نابجایی هم مقابل هم قرار گیرند. در یک حالت اگر همان برآیند بردارهای برگرز را مانند یک نابجایی با بردار برگرز nb خواهیم داشت.
با توجه به این حالت انرژی دو برابر شده و چنین چیزی اتفاق نمی‌افتد. از آنجایی که انرژی افزایشی می‌یابد پس باید یک نیروی دافعه بین این دو نابجایی وجود داشته باشد.

یک حالت ساده را در نظر می‌گیریم:
دو نابجایی در یک سطح لغزش
در فاصله $2b$ از هم و بردار برگرز در جهات خلاف جهت هم



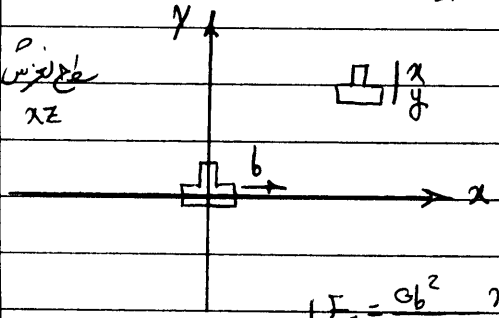
انرژی الاستیک را می‌یابیم:
$E_{el} = E_{elI} + E_{elII} = \alpha Gb^2 + \alpha G(-b)^2$: در حالت اول
$= 2\alpha Gb^2$

حال اگر دو نابجایی به هم نزدیک شوند.
دو نیم صفحه اضافی در این حالت
مکمل هم هستند پس نابجایی‌ها
از بین می‌روند. یا نابجایی جدید با بردار برگرز صفر داریم.



$E_{el} = 0$

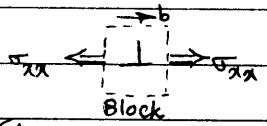
بنابراین یک انرژی داریم پس یک نیروی جاذبه باید وجود داشته باشد.
پس نابجایی‌ها می‌توانند با هم واکنش جاذبه داشته باشند. پس می‌توانیم نیروی بین آن‌ها را محاسبه کنیم:



کاسب نیروی بین دو نابجایی پارالل:
در اینجا یک حالت ساده را در نظر می‌گیریم:
یک نابجایی در مبدأ مختصات (منطبق بر محور z)
و یک نابجایی به فاصله‌ی نابجایی قبلی در مختصات (x, y)
در اینجا نیرو وارد می‌شود. با جایگذاری تنش‌های
σ_{xx} و τ_{xy} در روابط نیرو به دست می‌آید.
در واقع فرض کردیم نابجایی‌ها منطبق بر محور z
طول بی‌نهایت دارند. یعنی در راستای z
هیچ نیرو وارد نمی‌شود. همچنین فرض کردیم
نابجایی‌ها مختصات درون صفحه‌ی کریستالی دارند.

$$\begin{cases} F_x = \tau_{xy} b \\ F_y = \sigma_{xx} b \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_x = \dfrac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} \dfrac{x(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2} \\ F_y = -\dfrac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} \dfrac{y(3x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2} \end{cases}$$



نیرویی که در جهت x وارد می‌شود می‌تواند باعث صعود نابجایی یک کندرصعود صعود و انرژی زیادی لازم دارد. این نیرو جاذبه

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

موردی نیست. نیروهای برهم برای ما F_x است. زیرا در جهت نیرو (جهت x) اثری نمی‌کند. پس نابجایی‌ها فاصله‌ی خود را براساس نیروی F_x تنظیم می‌کنند.

σ_{xx} حتی با نیرو در جهت y وارد می‌کند. زیرا این کشش حتی نسبت poisson در جهت x دارد.

σ_{yy} حتی با نیرو در جهت x وارد می‌کند. زیرا این کشش حتی نسبت poisson در جهت x دارد.

روی F_x بیشتر بحث می‌کنیم:

$$F_x = \frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2}$$

نیروی $F_x = 0$ زمانی است که $x = 0$ یا $|x| = |y|$

یعنی وقتی دو نابجایی روی محورها یا 45° از آن‌ها نیروی صفر نیروی در جهت افقی به هم وارد نمی‌کنند

حالا علامت F_x را بررسی می‌کنیم:

علامت F_x بستگی به علامت x، (x^2-y^2) و b^2 دارد

b^2 بی‌معنی است این علامت ظاهر شد که ما در برآیند نیروها برای هر دو جهت در نظر گرفتیم. بنابراین صورت $b_1 b_2$ می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

اثر اصطکاک را در نظر $b_1 b_2 > 0$ حل می‌کنیم:

① $|x| > |y|$: $x > 0$, $F_x > 0$

② $|x| < |y|$: $x > 0$, $F_x < 0$

③ $|x| < |y|$: $x < 0$, $F_x > 0$

④ $|x| > |y|$: $x < 0$, $F_x < 0$

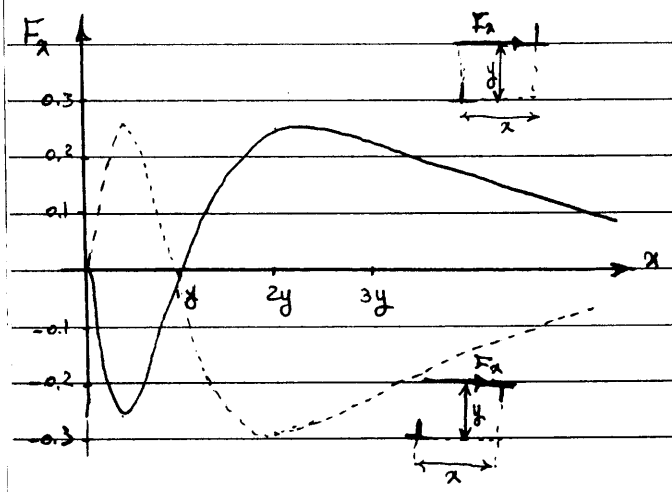
⑤ $|x| > |y|$: $x < 0$, $F_x < 0$

⑥ $|x| < |y|$: $x < 0$, $F_x > 0$

⑦ $|x| < |y|$: $x > 0$, $F_x < 0$

⑧ $|x| > |y|$: $x > 0$, $F_x > 0$

اگر $b_1 b_2 < 0$ باشد طبیعت‌ها عکس می‌شود.



نمودار F_x اگر $y = 0$ باشد می‌بینیم که $F_x \propto \frac{1}{x}$

روابط منفی F_x را برحسب x رسم می‌کنیم، x را برحسب y بی‌بعد می‌کرده‌ایم منفی برابر است.

برای نابجایی‌های هم‌نام و منفی خاصیت برای نابجایی غیرهم‌نام رسم شده‌اند. جهت مثبت F_x را در جهت x گرفته‌ایم

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۸۴/۷/۱۹ «جلسه ششم»

«بررسی نابجایی‌ها در شبکه‌های مختلف بلوری»

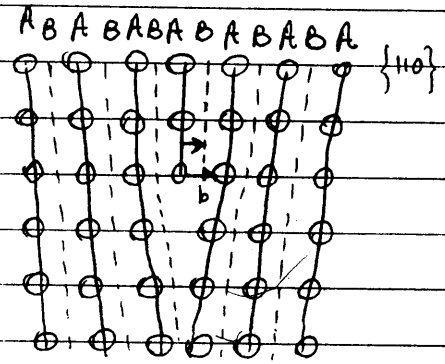
نابجایی در شبکه F.C.C :

شبکه F.C.C چون از لحاظ تراکم وجه‌ی از لحاظ سیستم‌های لغزش از سایر شبکه‌ها با اهمیت‌تر است

صفحه لغزش کرده نوع {111}

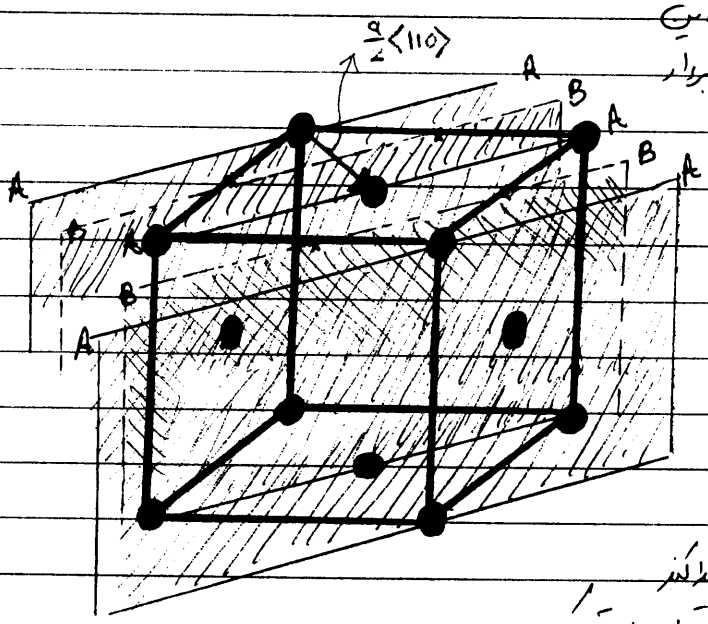
جهت لغزش کرده <110>

کوچکترین بردار برگرس در جهت لغزش: $\frac{a}{2}\langle 110\rangle$



شبکه‌های پایه‌ای با صفحات {111} عمود بر صفحه لغزش قرار می‌گیرند

بنابراین: $\vec{b}=\frac{a}{2}\langle 110\rangle$ این بردار برگرس در صفحه {111} سازی قرار گرفته است. شکل Unit cell پایین هم بردار $\frac{a}{2}\langle 110\rangle$ بین دو صفحه A {111} قرار گرفته است که اگر یکی از این صفحات سازی نامتقی با بقیه این بردار برگرس صفحات جابجا خواهد شد.



همان این صفحات نسبت به هم چگونه قرار گرفته‌اند؟

در کریستالوگرافی اصلی داشتیم مبنی بر اینکه تمام صفحات سازی اتمی مثل یکسان دارند.

اگر صفحه سازی دیگری با این صفحات بتوانیم بر روی آن نقاط مادی وجود داشته باشد، همان اتم‌های مثل خواهد داشت (B) براین جا از وسط دو مثل یک صفحه می‌توانیم روی این صفحات نقاط مادی وجود دارد چون اگر از وسط بیاییم روی صفحات نقاط مادی وجود ندارد. صحیح این است که روی شبکه FCC قرار صفحات به صورت ABABAB است.

حال روی شبکه‌های بالا ما دو نوع صفحه AB داریم یعنی یا بروی صفحه نامتقی قرار هم وجود داشته باشد اما این دو نوع صفحه نیروی واقع دارند و می‌خواهند از هم دور شوند. دور شدن آن‌ها منجر به تجزیه نابجایی خواهد شد.

یعنی در FCC نابجایی $\frac{a}{2}\langle 110\rangle$ حتماً به دو نابجایی تجزیه می‌شود:

$$\frac{a}{2}[110] \longrightarrow \frac{a}{6}[121]+\frac{a}{6}[2\bar{1}1]$$

"Shocklay" partial dislocations

(نابجایی‌های جزئی)

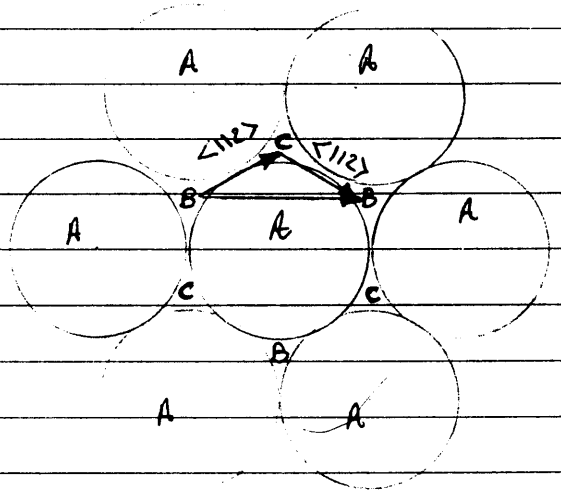
همانطور که دیدیم این تجزیه هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ انرژی امکان پذیر است.

پس در F.C.C کوچکترین بردار برگرس در جهت لغزش تجزیه می‌شود.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

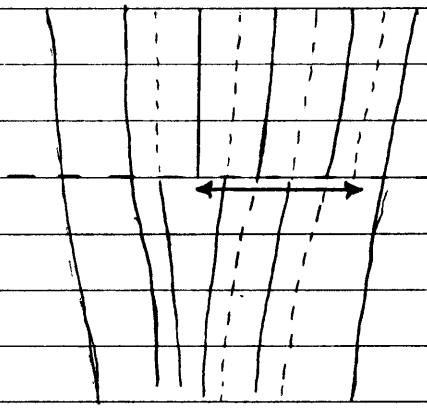
Type: (1) perfect dislocation : در حرکت این نابجایی اتمی به جای می‌شود در site ای متوالی بعدی با site خودش یکسان است.
(2) partial dislocation : در حرکت این نابجایی، اتم‌ها به site غیرمشابه با خودش می‌روند.



نابجایی پیچی در صفحه {111} بود
این صفحه یک صفحه اتم به صورت Hexagonal تر تشکیل شده است
اتم‌های B در لایه بالای اتم‌های A قرار گرفته‌اند و در "B" site
در site "C" اتم وجود ندارد.
بردار برگرز ما بین دو اتم B است یعنی یا بین دو اتم A یا بین
دو اتم B و یا دو اتم C. ما در اینجا بین دو اتم B را در نظر می‌گیریم
این بردار تجزیه می‌شود به صورت:

$$\vec{BB} \longrightarrow \vec{BC} + \vec{CB}$$

بردار $\vec{BC}$ و $\vec{CB}$ از نوع $\langle 112 \rangle$ هستند.
وقتی این عبارت شکسته شد طبق قرار داد ما در مورد یک مطلب توضیح می‌دهیم که ۴ مورد یک مطلب توضیح داده می‌شود.
ابتدا نابجایی $\frac{a}{2}\langle 110 \rangle$ تجزیه می‌شود
بعد نابجایی $\frac{a}{6}\langle 211 \rangle + \frac{a}{6}\langle 121 \rangle$ با مقدار انرژی کمتر، یا ابتدا دو نیم صفحه باید از هم جدا شوند تا نابجایی تجزیه شود یا ابتدا
بردار $\vec{BB}$ تجزیه می‌شود $\vec{BC} + \vec{CB}$ یعنی ابتدا اتم از خواهد جابجا شود بنابراین تقریباً از B site به B site
بعد طبق اول به C-site می‌رود یعنی به B-site
این حرکت از یک صفحه دیگر انجام می‌شود. بنابراین بین اتم‌ها در شکل دوم قرار گرفته‌اند، پس اتم B از خواهد به
B site می‌رود باید از روی سطح A عبور کند. پس باید از لابلای آن‌ها رد شود یعنی نتیجه این می‌شود اتم از روی
انرژی عبور می‌کند به site بعدی نظر بسیار این یعنی تجزیه نابجایی به جهت کاهش انرژی.

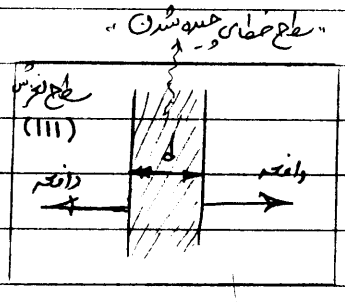


تقسیم دو نیم صفحه از هم دور می‌شوند پس یک فاصله بین آن‌ها وجود دارد.
این دو نیم صفحه باهم جذب هستند اولی عیب را به وجود می‌آورد. دومی
عیب را برطرف می‌کند. پس قسمتی بین این دو نیم صفحه یک عیب
باقی می‌ماند عیب اتم‌های B رفته از c-site به
یعنی قسمت اولی اتم‌های B را به c site می‌برد و دومی از c-site به
B site می‌برد و عیب را برطرف می‌کند.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

سطح سمی این دو نابجایی یک جابجایی بوجود آورده که شبیه جابجایی است که در اثر عیب سطح خطای جمع شدن ایجاد می‌شود. یعنی سطحی بوجود آمده که سه تا از سطح های اتم ها عوض شده. این سطح روی سطح لغزش واقع است.



لغتیم این دو نابجایی یک نیروی فاصله وجود دارد که آن‌ها را از هم دور می‌کند. اگر این فاصله تنها نیروی وارد بر آن‌ها بود باید تا بی‌نهایت از هم دور می‌شدند اما یک اتفاق دیگر هم افتاده و آن اینکه بین این دو نابجایی یک عیب بوجود آمده که هر چه این دو دورتر می‌شوند این عیب بزرگتر می‌شود. این عیب خطای جمع شدن هزینه یک عیب است پس یک انرژی بر واحد سطح دارد. پس هر چه این سطح بیشتر شود این انرژی هم بیشتر می‌شود. پس دو نابجایی اینطور تعریف می‌شوند که فاصله بوجود آمده انرژی است و چه از این سطح خطای جمع شدن بوجود آمده آن است.

پس این دو در یک فاصله d با هم به تعادل می‌رسند و با حفظ فاصله با هم حرکت می‌کنند. (البته نیروی خارجی اعمال شود)

نیروی کدو نابجایی بر هم وارد می‌کنند از هم دور شوند (بر واحد طول):

$$F = \frac{G(b_1 b_2)}{2\pi d}$$

F: نیرو بر واحد طول
d: فاصله نابجایی‌ها
G: Shacklay

حالا اگر انرژی بر واحد سطح خطای جمع شدن را γ بنامیم، آنگاه مقدار انرژی لازم برای یک واحد سطح نیروی که بوجود می‌آید برابر γ خواهد بود. یعنی ($\gamma = F$) از نظر دیمانسیون هم یکی هستند.

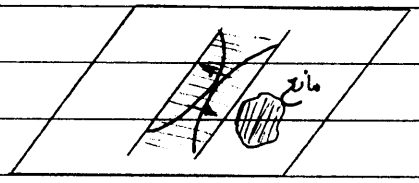
یعنی فاصله نابجایی‌ها با γ رابطه عکس دارد.

یعنی در Al فاصله نابجایی‌ها از هم زیاد است زیرا γ کم است و در Si نابجایی‌ها به هم نزدیکترند.

$$\gamma = F \longrightarrow d = \frac{G(b_1 b_2)}{2\pi\gamma}$$

(γ: انرژی لازم برای واحد سطح)

نابجایی‌های $\frac{a}{2}\langle 110 \rangle$ وقتی تجزیه شدند به دو نابجایی پدر ایجاد می‌شود یعنی نابجایی‌های Shacklay هستند. علت آن هم بلوری هستند. علت آن نابجایی اولیه به صورت مستقیم بعد از تجزیه دو نابجایی به ایجاد می‌شود. علت آن هم این است که در اثر تجزیه زاویه بین بردار برگرز آن‌ها خط نابجایی بیشتر به صورت زاویه‌ای است (یعنی بردار برگرز هم نباشد) یعنی نمی‌تواند صد درصد لغزش تنشی انجام دهد) است به سختی امکان است بتواند لغزش متقاطعی انجام دهد. مثلاً اگر به یک مانع برخورد کند و یا به هر علتی نتواند پیشروی کند. این دو نابجایی مجدداً با هم ترکیب می‌شوند به یک نابجایی پیچی ایجاد می‌شود که می‌تواند سطح لغزش خود را عوض و بعد از اینکه سطح لغزش را عوض کرد از مانع گذشت مجدداً از هم تجزیه شوند. البته ترکیب آن‌ها دوباره احتیاج به انرژی است که این انرژی را تنش ایجاد شده (در اثر برخورد با مانع یا هر چیز دیگری) تأمین می‌کند.



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

نابجایی جزئی FRANK (Frank partial dislocation):

یک نابجایی پیچی است که بردار برگرس آن در جهت <111> است.
و یا به عبارتی نیم صفحهٔ اضافی آن {111} باشد (عمود بر جهت <111> و صفحه {111} عمود است)
بردار برگرس فرانک $\frac{a}{3}[111]$ است. کریستال FCC بخشی از قطعه سکه است.
نابجایی فرانک غیر متحرک است. زیرا سطح لغزش آن سطح {111} نیست (بردار برگرس آن عمود بر سطح لغزش است)
علت اینکه این نابجایی ها بررسی می شوند این است می تواند باعث توقف نابجایی های دیگر شود و میدان تنش موجود
بیاورد و در صنعت به مکانیزم های تغییر شکل اثری ندارد. (در کارهای صنعتی اهمیت دارد)
(Sessile dislocation)

{111}

A
C
B
A
C
B
A

ABC/BCABC : (S-F)
(Simple Frank)
اگر صفحهٔ A ناقص باشد
در ترتیب صفحات جای A خالی است، یعنی یک نقص بوجود آمده

{111}

A
C
B
C
A
C
B
A

ABCA/C/BCABC : (D-F)
(Double Frank)
اگر یک صفحه اضافه کنیم
بین دو صفحهٔ A و B اگر نوع اتم صفحه ای قرار دهیم این صفحه باید
C باشد.
در ترتیب صفحات جای دو صفحه خالی است، پس دو نقص جدید شدن بوجود آمده

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

چهاروجهی Thampson

در شبکه FCC یک چهاروجهی تعریف می‌کنیم و می‌توانیم بردارهای جابجایی حرکت نابجایی‌ها را بیابیم. تمام سیستم‌های لغزش در FCC $\{111\}\langle 110\rangle$ است صفحات $\{111\}$ چهار صفحه غیرموازی است. از این چهار صفحه چهاروجهی بنا شده است. هر کدام از این چهار صفحه یک چهاروجهی می‌سازند.

این چهاروجهی منتظم است یعنی تمام چهاروجهی‌های آن مثلث‌های متساوی‌الاضلاع هستند و هر کدام از این مثلث‌ها موازی یکی از صفحات $\{111\}$ است.

وجوه چهاروجهی موازی صفحات لغزش

یال‌های چهاروجهی موازی جهات لغزش

حال می‌توانیم انواع نابجایی‌ها در این چهاروجهی تعریف کنیم و به صورت جمع‌برداری آن‌ها را جمع کنیم

اگر قصور B را در وجه مقابل ACD با بردار $\vec{B\delta}$ نشان دهیم و همین‌طور قصور C را با $\vec{C\gamma}$ و D را با $\vec{D\beta}$ و قصور A را با $\vec{A\alpha}$ نشان دهیم آنگاه هر نابجایی که بردار برگرز آن موازی یکی از یال‌های AB، AC، AD و یا یکی از BC، BD و یا CD باشد نابجایی طول است و هر نابجایی که بردار برگرز آن موازی $A\delta$، $B\beta$، $C\alpha$ و یا $D\gamma$ باشد نابجایی جزء است (یک جزء نیز لغزش می‌کند).

نابجایی‌های کامل: $\vec{A\alpha}$، $\vec{B\beta}$، $\vec{C\gamma}$، $\vec{D\delta}$

نابجایی طول → (یک جزء Shockley) + (یک نابجایی کامل)

$$\vec{D\delta} + \vec{\delta A} \longrightarrow \vec{DA}$$

$$\frac{a}{3}[111] + \frac{a}{6}[11\bar{2}] = \frac{a}{2}[110]$$

$$\frac{3a^2}{9} + \frac{6a^2}{36} \qquad \frac{a^2}{2}$$

$$\frac{a^2}{2}$$

$$\frac{a}{6}[12\bar{1}] + \frac{a}{6}[2\bar{1}1]$$

$$\frac{a^2}{3}$$

حال اگر یک نابجایی کامل را به یک جزء Shockley و یک نابجایی کامل دیگر تجزیه کنیم و از انرژی نابجایی‌ها صرف‌نظر کنیم می‌بینیم که انرژی کل نابجایی‌ها کم شده است بنابراین تجزیه شدن نابجایی‌ها به نابجایی‌های کوچک‌تر انرژی سیستم را کم می‌کند.

مثال

$$\vec{D\delta} + \vec{\delta A} \longrightarrow \vec{A\gamma} + \vec{\gamma D}$$

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

« Lomer-Cottrell »

یکی دیگر از نابجایی‌های غیرمتحرک است و در صفحات نشست به صفحه {111} بوجود می‌آید.

از دو صفحه (111) و (1̄11) دو صفحه نشست به موازات هم، به موازات لبه (11̄1) نابجایی $\frac{a}{2}[101]$ موازی صفحه (111) نابجایی $\frac{a}{2}[01\bar{1}]$ موازی صفحه (1̄11) تشکیل می‌دهند. این دو نابجایی با برخورد شونده، جزء (1) موازی صفحه (111) و جزء (2) موازی صفحه (1̄11) انشعاب می‌کنند.

این دو نابجایی حاصل از برخورد یک سطح خطای جمع شدن بوجود می‌آید.

از این نابجایی حاصل مرکب دو صفحه نشست غیر متحرک می‌باشد. اولین نابجایی که تشکیل می‌شود

$\frac{a}{6}[\bar{1}12] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$ خواهد بود

ترکیب (3) انجام می‌شود

از لحاظ انرژی به ثبت انجام می‌پذیرد.

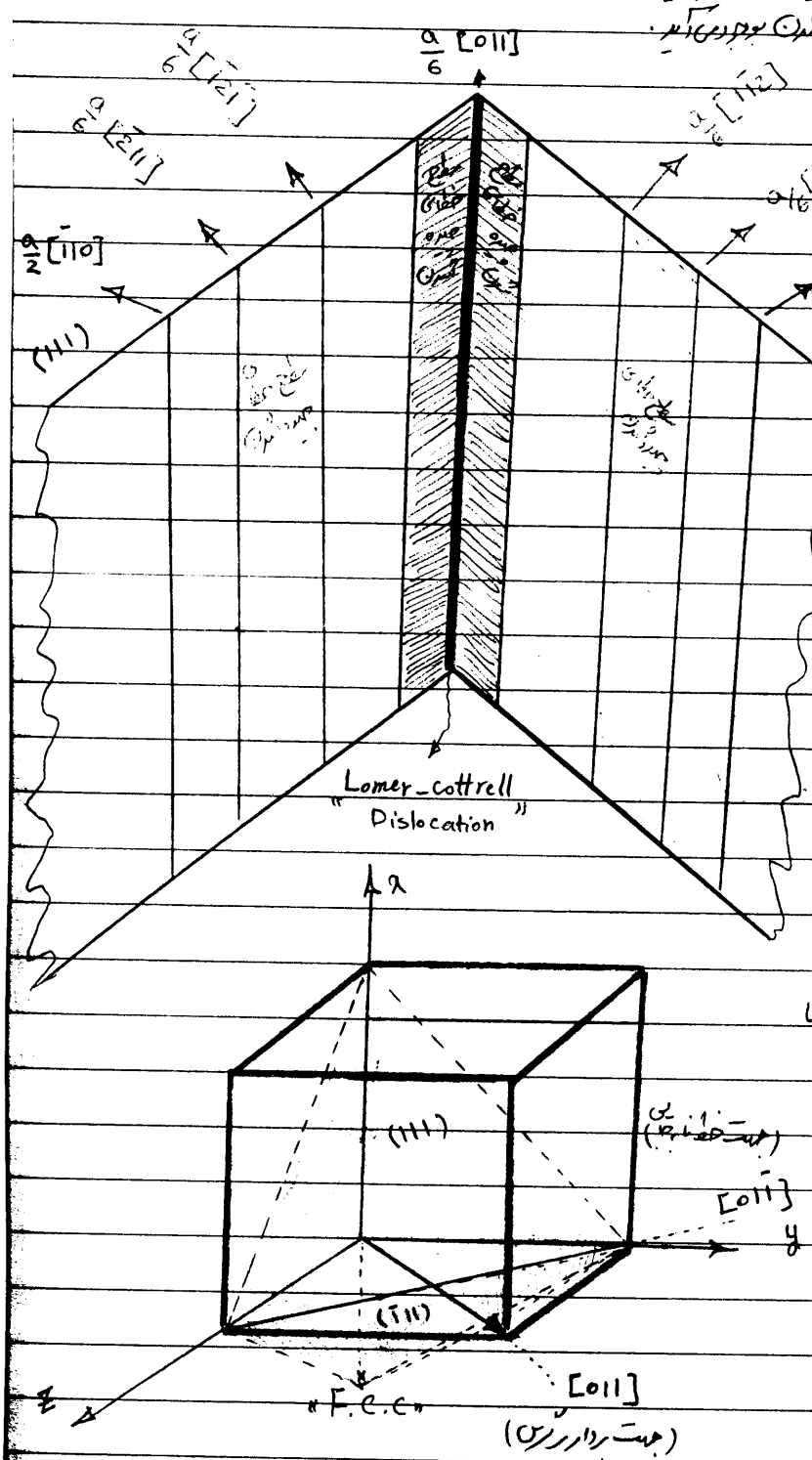
در جهت $\frac{a}{6}[011]$ در سطح خطای جمع شدن خواهیم داشت. این نابجایی غیرمتحرک است.

(1) $\frac{a}{2}[\bar{1}10] \rightarrow \frac{a}{6}[\bar{2}11] + \frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}]$

(2) $\frac{a}{2}[101] \rightarrow \frac{a}{6}[211] + \frac{a}{6}[1\bar{1}2]$

(3) $\frac{a}{6}[\bar{1}2\bar{1}] + \frac{a}{6}[1\bar{1}2] \rightarrow \frac{a}{6}[011]$

$\frac{a^2}{6}$ $\frac{a^2}{6}$ $\frac{a^2}{18}$

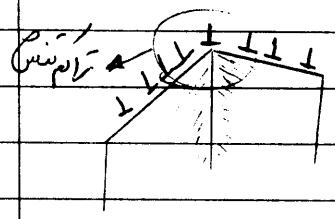


بنابراین در صفحه نشست Lomer-Cottrell بوجود می‌آید ($\frac{a}{6}[011]$). بردار برگرز آن بوجود فشرده است اما بعلت غیرمتحرک بودن آن این است که سطح لغزش آن {111} نیست نوع خطاهای جمع شدن غیرمتحرک در صفحه {111} است در صفحات نشست غیرمتحرک جهت <110> است و بردار برگرز هم در جهت <110> است. صفحاتی که جهت <110> بر روی آن قرار دارد از نوع {001} خواهد بود (یعنی سطوح جانبی مکعب)

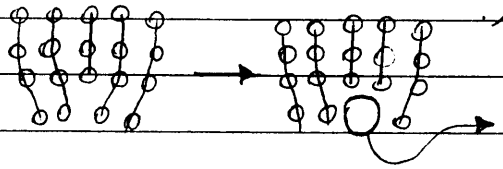
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

صفحه (111) را در مکعب مشخص کردیم، برای مشخص کردن صفحه $(\bar{1}11)$، چون x در جهت منفی قطع می‌کند نقطه ۱- را روی محور a مشخص می‌کنیم و روی محورهای y و z به اندازه یک واحد جدا می‌کنیم، و وصل می‌کنیم. محل برخورد دو صفحه خط $[0\bar{1}1]$ است (جهت خط‌نابجایی) و جهت بردار برگرس $[0\bar{1}1]$ است و همواره روی صفحه (111) یعنی قاعده مربعی مکعب قرار گرفته‌اند. پس مطابق لغزش سطح (110) است که سطح فشرده نیست، پس هر چند جهت لغزش با جهت فشرده است نابجایی قوی تولید حرکت کند.



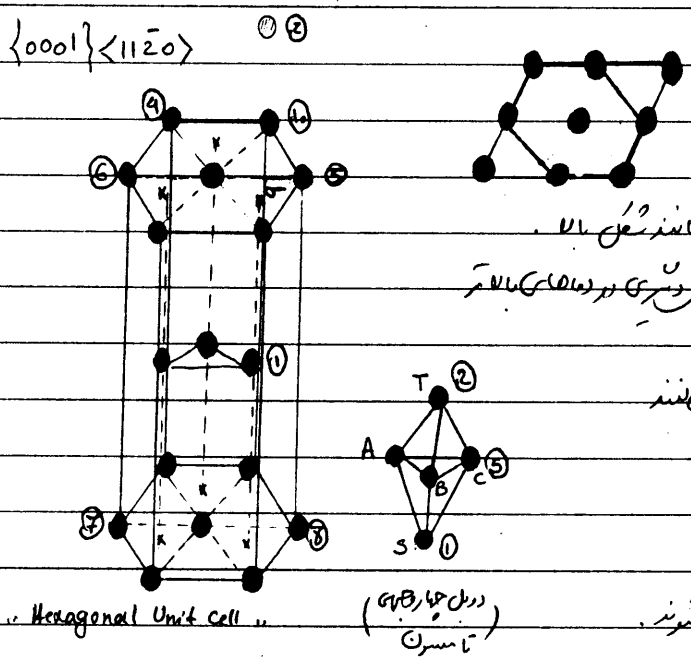
پس وقتی که یک نابجایی غیرمتحرک بوجود می‌آید وقتی نابجایی دیگر مزاحمش می‌شوند تا شتری شود و در آن منطقه تراکم تنش بوجود می‌آید. مثلاً وقتی به مرز دانه رسیده‌ایم یا یک رسوب در سر راه داریم این تراکم تنش ایجاد می‌شود که می‌تواند سبب شکست یا سد یا به عبارتی باعث شکل‌گیری جوانه‌های ترک شوند.



یکی از این نمونه‌ها تئوری است که نابجایی‌ها در هم ادغام شوند. مثلاً دو عدد نابجایی پیچی با علامت خلاف یکدیگر هستند یک جوانه ترک بوجود می‌آید.

وقتی جای یک خط، دو خط نابجایی پیچی داشته باشیم، میدان تنش افزایش می‌یابد و می‌تواند جوانه ترک بوجود آید.

« نابجایی در شبکه H.C.P »



صفحات متراکم در این شبکه {0001} هستند و جهات فشرده جهات <11$\bar{2}$0> و تراکم این شبکه دقیقاً مانند شبکه FCC است مانند شکل بالا.

غیر از سیستم لغزش {0001}<11$\bar{2}$0> سیستم‌های دیگری در دماهای بالا هم ممکن می‌توانند وجود داشته باشند.

در مورد HCP هم یک چهاروجهی تامسون تعریف می‌شود البته یک دوبل چهاروجهی برای آن تعریف می‌کنیم می‌دانیم در شبکه هگزاگونال سه در قاعده هگزاگونال یک صفحه میانی متشکل از 3 اتم قرار گرفته.

نابجایی‌ها در H.C.P توسط این چهاروجهی مشخص می‌شوند.

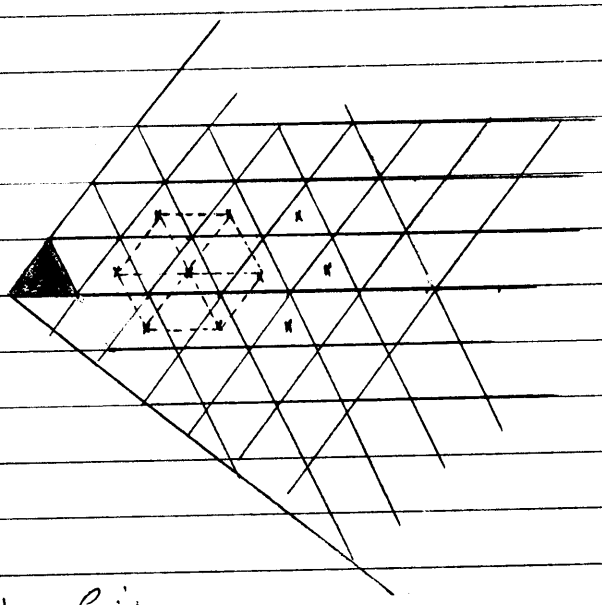
نوع	AB	ST	AC
جهت بردار برگرس	$[11\bar{2}0]$	$[0001]$	$[\bar{1}100]$
اندازه بردار	a	c	$a/\sqrt{3}$
انرژی متناسب با توان	a^2	$c^2=\frac{8}{3}a^2$	$\frac{1}{3}a^2$

حضور نوع نابجایی در HCP را بدین صورت بررسی می‌کنیم.

نوع ST در جهت z یا همان c است. نوع AC یکی از مزدهای Shockley است.

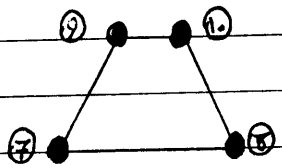
s.a.m

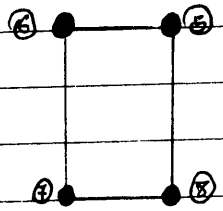
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



این شکل در سیستم بلورشناسی Trigonal
قسمی از Hexagonal است.

صفحات عادی لغزش متقاطع سطح Base است
یعنی {0001}<11$\bar{2}$0> اما سطح پرسیم نیز می‌تواند وارد
لغزش شود مثلاً سطح منشوری {10$\bar{1}$0} مثلاً
یا صفحات هرمی مثل {10$\bar{1}$1}





این صفحات در دماهای بالا فعال می‌شوند و بعلت تنش برشی
Hexagonal داشتند یعنی مثلاً نسبت $\frac{c}{a}$ می‌تواند تغییر کرده باشد
یعنی اتم‌ها کمی بهم نزدیک‌تر یا دورتر شده باشند

بنابراین تغییر شکل در Hexagonal در دماهای بالا به‌راحتی انجام می‌شود به دو علت:
۱- سیستم‌های لغزش منشوری در هرمی آن فعال می‌شوند
۲- سطوح لغزش متقاطع می‌شوند.

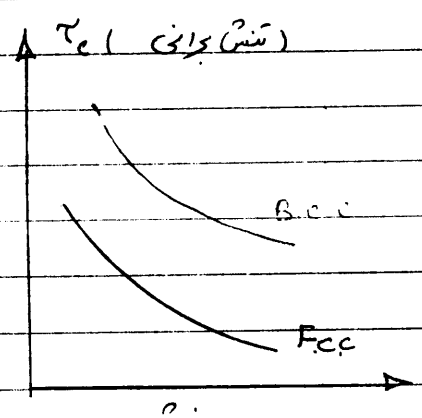
توضیح آنکه وقتی فقط صفحات Base فعال بودند، چون صفحات بهم متوازی هستند هیچ راه‌های سیمی نمی‌تواند
لغزش کند. اما وقتی دو سطح پرسیم فعال می‌شوند سطوح لغزش متقاطع داریم و راه‌های پیچیده‌تری می‌تواند سطح لغزش
خود را تغییر دهد و حرکت کند.
البته این قابلیت در دماهای بالاتر شکل‌پذیری بهتر است اما در آلیاژهای دما و هزاران بیشتر از دمای اتاق است.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

جلسه هشتم ۸۴/۷/۲۶

« ناجایی در شبکه BCC »



« مبدای لغزش »

سیستم لغزش اولین شبکه بصورت $\{110\}\langle 111\rangle$ است

البته سطوح دیگری هم می‌توانند لغزش کنند اما مشروح‌ترین سطوح همین سیستم است

کوتاه‌ترین بردار برگرز در جهت فشرده $\frac{a}{2}[111]$ است.

شبکه BCC در لغزش فرق نیست یعنی مثل FCC، hcp نیست

یعنی لغزش بسادگی براحتی صورت نمی‌گیرد. مکانیزم در BCC در دمای

پایین می‌تواند فعال باشد تشکیل سطوح دوقلویی است. تشکیل سطوح دوقلویی

مکانیزمی است که به تغییرفرم کمک می‌کند اما از لحاظ انرژی در BCC از لغزش آسانتر

صورت می‌پذیرد. در شروع اول می‌بینیم تنش برشی برای شروع یک Process لغزش

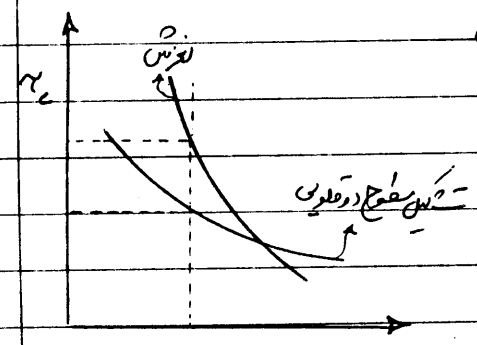
در دماهای مختلف برای B.C.C بیشتر از F.C.C است. یعنی همیشه لغزش

در F.C.C آسانتر است. اگر این منحنی‌ها برای BCC فقط رسم کنیم

یک منحنی تنش برشی لازم برای فعال کردن لغزش و دیگری تنش برشی لازم

برای شروع تشکیل سطوح دوقلویی را شروع مشاهده می‌کنیم که در دماهای پایین

تنش لازم برای تشکیل سطوح دوقلویی خیلی کمتر از تنش لازم برای لغزش است. تشکیل سطوح دوقلویی در BCC در دماهای پایین می‌تواند در جهت تغییرفرم بسیار کمک کند

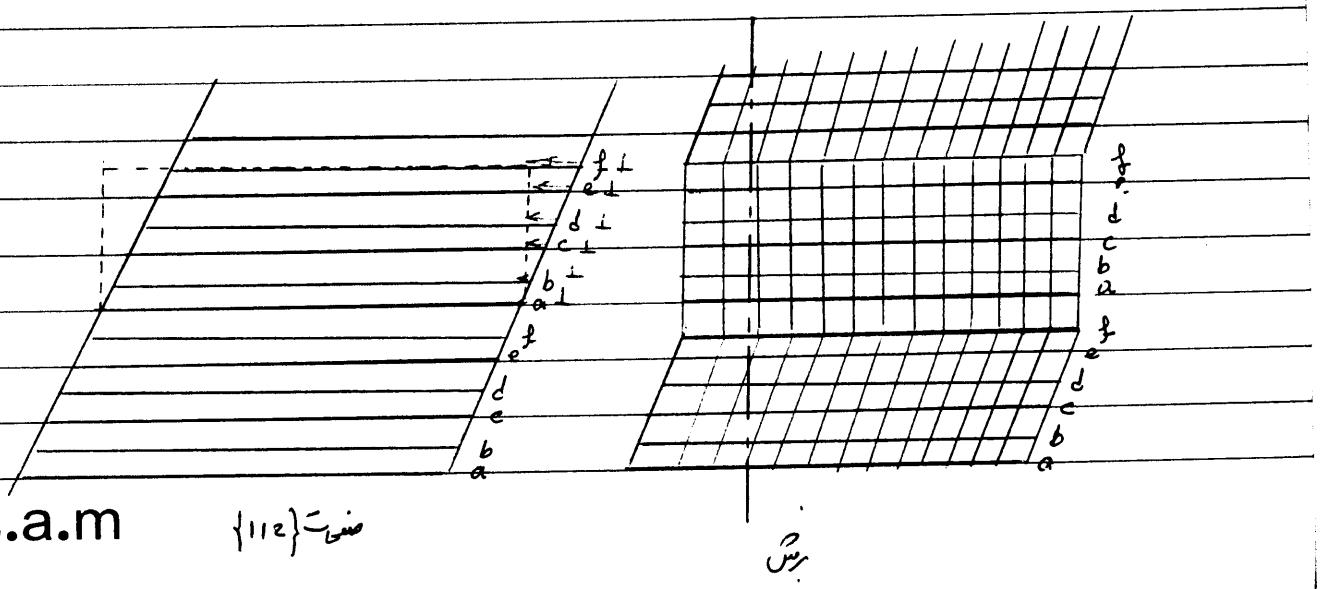


سیستم تشکیل سطوح دوقلویی در شبکه B.C.C $\{112\}\langle 111\rangle$ است

تشکیل سطوح دوقلویی بدلیل یک نوع لغزش روی صفحات $\{112\}$ است. اساس لغزش محدود به این صورت که ناجایی

$\frac{a}{2}[111]$ می‌تواند تجزیه شود به یک پله به ارتفاع $\frac{a}{6}[111]$ و این یک ناجایی است که روی سطح $\{112\}$ می‌تواند لغزد

در B.C.C تنها صفحات $\{112\}$ تا است بصورت a,b,c,d,e,f یعنی در یک Unit cell ما این صورت تنها دیده شده



s.a.m

www.ilam-tarvan.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اگر سطح {112} به صورت شکل صفحه قبل در نظر بگیریم و بررسی این سطح نابجایی هایی از نوع $\frac{a}{6}[111]$ قرار گیرند اگر این نابجایی ها نوشته نشده به صورت شکل روبرو خواهد بود. در حل هر سه سطح اشتراک وجود دارد. بعد از این نقره صفحه به صورت متقابل قرار می گیرند. یعنی در سطح بعدی که اتم های آن نسبت به اتم های این سطح قرینه اند، به این سطح سطح دوقلویی می گویند. فرق آن با نقوشی این است که نقوش ها برای کل بلور در نظر گرفته می شود اما اینجا نقوش محدود است. نکته مهم در سطح دوقلویی این است نقوش که در صفحه اصفیت تقریبی نیست.

شکل شکل صفحه قبل سطح a و b که نقوش کرده اند اتم هایشان در مقابل هم نیستند هر چند در ازنوع {112} هستند اگر سطح صفحه شده به بیرون دهیم و آن را etch کنیم، آن شش اتم ها در بین دو سطح دوقلویی با سایر جاهای شبکه تفاوت است پس اثر محلول etch روی دو سطح یکی نیست. بنابراین در زیر میکروسکوپ اثر شده می بینیم اگر روی یک صفحه focus کنیم صفحه دیگر تار خواهد دید.

اگر می توانیم تنش کرانی تشکیل سطح دوقلویی در B.C.C بیشتر تنش کرانی این نقوش است در داخل پایین، به این معنا است که در داخل این نقوش نداریم. نقوش هم داریم اما احتمال تشکیل سطح دوقلویی خیلی بیشتر از نقوش است. و معمولا در داخل با عدم به همین ترتیب احتمال نقوش بیشتر از سطح دوقلویی است. پس دو مورد برای هر دو داریم.

حالا بررسی می کنیم که نابجایی $\frac{a}{6}[111]$ از کجا پیدا می آید؟ می تواند از خرد نابجایی $\frac{a}{2}[111]$ به وجود آید:

یعنی نابجایی $\frac{a}{2}[111]$ تجزیه می شود:

$$\frac{a}{2}[111] \longrightarrow \frac{a}{3}[111] + \frac{a}{6}[111]$$

$$\frac{3a^2}{4} \qquad \frac{3a^2}{9} + \frac{3a^2}{36}$$

از لحاظ انرژی

خرد نابجایی $\frac{a}{3}[111]$ می تواند دو نابجایی $\frac{a}{6}[111]$ تجزیه شود که از لحاظ انرژی هم امکان پذیر است

$$\frac{a}{3}[111] \longrightarrow \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{6}[111]$$

$$\frac{a^2}{3} \qquad \frac{6a^2}{36}$$

حتی ممکن است یک نابجایی $\frac{a}{2}[111]$ به سه نابجایی از نوع $\frac{a}{6}[111]$ تجزیه شود

$$\frac{a}{2}[111] \longrightarrow \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{6}[111] + \frac{a}{6}[111]$$

$$\frac{3a^2}{4} \qquad \frac{9a^2}{36}$$

در مجموع می توان گفت در شبکه های F.C.C و H.C.P هم امکان تشکیل سطح دوقلویی وجود دارد اما سهم آن در مقابل نقوش بسیار کم است.

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

«برخورد نابجایی‌ها»

برخورد نابجایی‌ها با واکنش نابجایی‌ها متفاوت است.

در واکنش نابجایی‌ها، نابجایی‌ها معمولاً در یک خط به هم می‌رسند

در برخورد نابجایی‌ها، ممکن است در یک نقطه به هم برسند

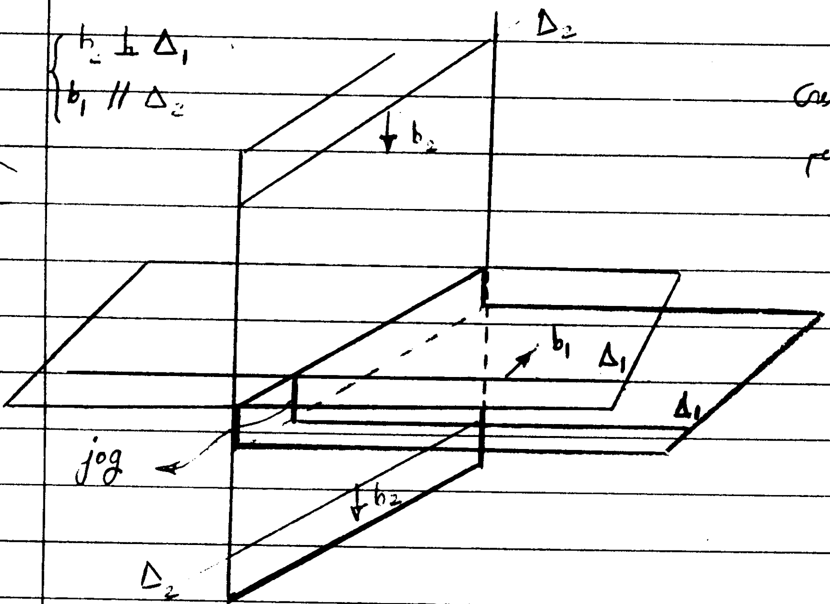
البته ممکن است در حین برخورد واکنش هم انجام شود اما فرق اصلی آن‌ها همان چیزی است که در بالا ذکر شد.

با تعریفی که از نابجایی کردیم می‌دانیم که به طور تعداد نابجایی‌ها بسیار بسیار زیاد است. وقتی که می‌گوییم دانسیته نابجایی‌ها حدود 10^6 خط بر cm^2 است می‌توانیم بگوییم اگر نابجایی در حرکت باشد و بخواهد از داخل شبکه حرکت کند حرکت آن از میان جنگل خواهد بود! یعنی اگر یک نابجایی بخواهد روی سطح لغزش خود حرکت کند، می‌دانیم سطوح لغزش با هم متفاوت و البته متقاطع هستند. روی صفحات لغزش هم نابجایی‌های بسیار زیادی هم هستند. پس حرکت نابجایی ناگزیر از برخورد با نابجایی‌های دیگر است.

این برخوردها را از دو دیدگاه می‌توانیم بررسی کنیم یکی از دید هندسی و دوم از دید حرکت یعنی این برخوردها چه تأثیری بر حرکت نابجایی خواهد داشت؟ آن چیزی که از حرکت برای ما مهم است تغییر شکل پلاستیک است. مثلاً اگر نابجایی قفل شود تغییر شکل پلاستیک مشکل‌تر می‌شود.

سطوح لغزش مختلف با زاویه‌های مختلف همدیگر را قطع می‌کنند. یعنی اگر دو سطح لغزش متفاوت را تصور کنیم می‌توانند هر حالت نامشخصی داشته باشند و اگر متقاطع باشند زاویه‌ای که با هم دارند می‌تواند هر زاویه‌ای باشد. ما نمی‌توانیم یک حالت نامشخص را حل کنیم. ما فرض می‌کنیم ساده‌ترین حالت وجود دارد یعنی دو سطح عمود بر هم داریم. سپس آن را به حالت‌های دیگر تعمیم می‌دهیم. با یک مثال شروع می‌کنیم

$$\begin{cases} b_2 \perp \Delta_1 \\ b_1 \parallel \Delta_2 \end{cases}$$



دو صفحه عمود بر هم داریم. یک نابجایی لبه‌ای Δ_1 و b_1 و یک نابجایی لبه‌ای دیگر Δ_2 و b_2 را در نظر می‌گیریم که روی این دو صفحه واقعند. موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر را هم روی شکل مشخص کرده‌ایم.

اگر این دو به هم نزدیک شوند و برخورد کنند:

نابجایی Δ_2 همانطور که هست حرکت می‌کند

اما Δ_1 شکسته می‌شود (عملاً صفحه شکسته می‌شود)

یک jog روی نابجایی اول ایجاد می‌شود و نابجایی دوم هیچ تغییری نمی‌کند.

علت را بررسی می‌کنیم:

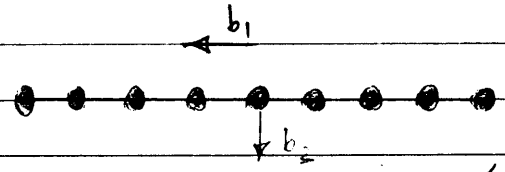
می‌دانیم که نابجایی یک ستون از اتم‌ها است

وقتی یک نابجایی حرکت می‌کند اتم‌ها در جهت بردار برگرز آن نابجایی حرکت می‌کنند

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

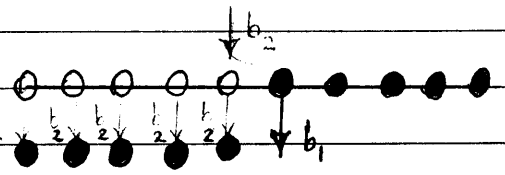


وقتی نابجایی Δ_1 حرکت می‌کند Δ_2 را قطع می‌کند

اتم‌های روی Δ_2 باید در جهت بردار برگرز b_1 جابجا شوند

اما در اینجا Δ_2 و b_1 موازی‌اند یعنی b_1 می‌خواهد اتم‌ها را در جهت خودش جابجا کند. بنابراین همه اتم‌ یک side جابجا می‌شوند اما در نهایت تأثیری روی خط نابجایی نخواهد داشت.

b_2 اثر می‌کند



اما وقتی نابجایی Δ_2 حرکت کند Δ_1 را قطع کند

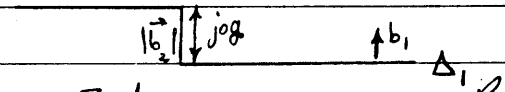
می‌خواهد اتم‌های روی Δ_1 در جهت بردار برگرز خودش یعنی b_2 جابجا کند و در اینجا b_2 عمود بر Δ_1 است. بنابراین در اینجا b_2، Δ_1 را قطع کند همه اتم‌های روی آن را به اندازه b_2 پایین می‌کشد

بنابراین در محل برخورد یک پله یا jog ایجاد می‌شود.

بنابراین هرگاه بردار برگرز یک نابجایی عمود بر خط نابجایی نباشد، با هر برخورد کند بر روی آن jog ایجاد می‌کند

- بر حسب موقعیت بردار برگرز نابجایی I یعنی b_1 با خط نابجایی II پله ایجاد خواهد شد یا نخواهد شد.

بردار برگرز: $\vec{b_1}$
jog طول: $|\vec{b_2}|$



حداقل بررسی خط نابجایی برای برخورد یک پله ایجاد شد.

این jog جزئی از نابجایی Δ_1 است. پس بردار برگرز این jog همان بردار برگرز نابجایی اصلی است، اما اصل آن برابر بردار برگرز نابجایی قطع کننده $\vec{b_2}$ است.

- بر حسب موقعیت بردار برگرز $\vec{b_1}$ با jog، jog می‌تواند پله‌ای یا پیچی باشد:

$\vec{b_1} \perp \vec{b_2}$: jog پله‌ای
$\vec{b_1} \parallel \vec{b_2}$: jog پیچی

- بر حسب موقعیت دو بردار برگرز، jog می‌تواند پله‌ای یا پیچی باشد.

- برخورد یک نابجایی پیچی و پله‌ای:

از همه نوشتن این رو نابجایی‌ها هم بیاریم با هم برخورد بدیم بلکه نتیجه‌اش را خواهیم داشت. چون برایشان برخورد حالت می‌کنیم دو نابجایی را قطع و عمود بر هم در نظر می‌گیریم:

رو نابجایی پیچی بردار برگرز موازی خط نابجایی است

رو نابجایی پله‌ای بردار برگرز عمود بر خط نابجایی است.

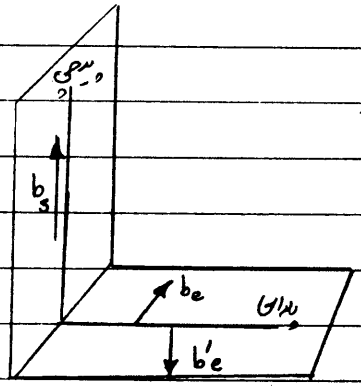
بنابراین چون رو نابجایی پیچی و پله‌ای برهم عمودند یکی از چون نابجایی پله‌ای عمود بر پیچی است و بردار برگرز نابجایی پیچی موازی خود نابجایی است، بنابراین نابجایی پله‌ای بر بردار برگرز پیچی عمود است. بنابراین روی

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

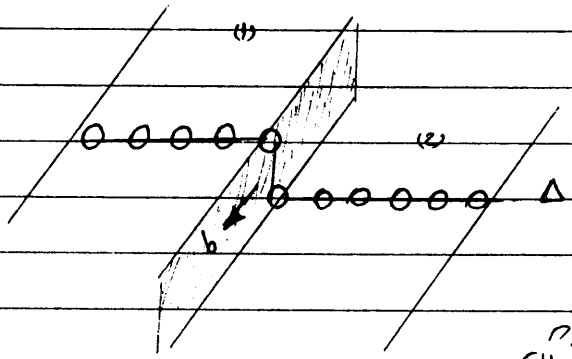
نابجایی پیچی jog ایجاد می‌شود.

اگر بردار نابجایی پیچی jog ایجاد شود صفحه پله‌ای است.
jog روی نابجایی پله‌ای می‌تواند پیچی باشد یا پله‌ای.

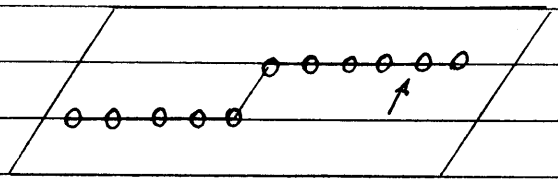


توضیح آنکه اگر دو صفحه لغزش هم‌صفحه باشند و نابجایی پیچی پله‌ای وجود نباشد b_s مولفه‌ی ضد نابجایی پیچی است اما بردار برگرس نابجایی پله‌ای می‌تواند b_e و یا b'_e باشد. اگر b'_e باشد بدون b'_e خط نابجایی پیچی موازی است اصلا نمی‌تواند روی آن jog ایجاد کند
بنابراین اگر بردار برگرس b_e باشد روی نابجایی پیچی jog ایجاد می‌شود
شرط این حالت jog پله‌ای است زیر $b_e \parallel b_s$
اما نابجایی پیچی هیچ مولفه‌ی پله‌ای در جهت b_s در خود خط نابجایی ندارد پس هیچ نابجایی پیچی روی پله‌ای jog ایجاد نمی‌کند. اما به شرط این jog می‌تواند پله‌ای (b_e) یا پیچی (b'_e) باشد.

نوع نابجایی حرکت نابجایی همراه با jog است می‌خواهیم ببینیم در راستا حرکت نابجایی پله‌ای همراه با jog چیونه است؟



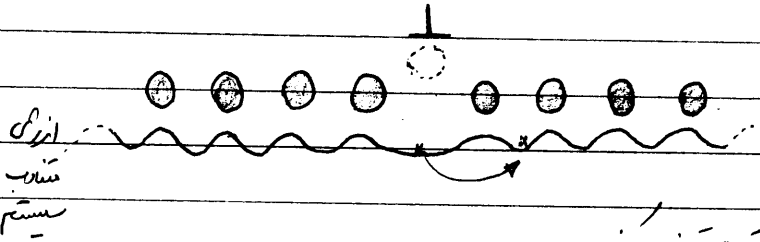
حرکت بردار برگرس این نابجایی پله‌ای همواره ثابت (صفر ماندنی) است
هر کدام از این دو قسمت یک سطح لغزش دارند
و گفتیم تنش بر روی هر سطح لغزش یکسان است بنابراین
حرکت ایجاد شده روی سطح لغزش ۱ دقیقا برابر است با حرکت ایجاد شده
اما ضد jog ها اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه تشکیل نمی‌شود
اما یک اتم روی لبه (۱) است و دیگری روی صفحه (۲)
سطح لغزش ضد jog سطح ۲ می‌شود و ضد jog است پس جای حرکت یک اتم آن
روی سطح لغزش ۲ دو اتم اول است و دیگری روی سطح لغزش ۱ دو اتم
اما نابجایی می‌تواند گفت که jog پله‌ای تاثیری روی حرکت اتم‌ها ندارد.



حرکت jog پیچی:
یک سطح لغزش با یک نابجایی پله‌ای مورد بحث قرار دادیم
وقتی jog و نابجایی روی یک صفحه باشند به آن kink می‌گویند
kink ها با jog پیچی تاثیری روی حرکت نابجایی پله‌ای ندارند
kink ها حرکت زیادی دارند حتی در دماهای پایین هم حرکت می‌کنند
در اثر حرکت kink ها نابجایی تغییر ایجاد می‌شود.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



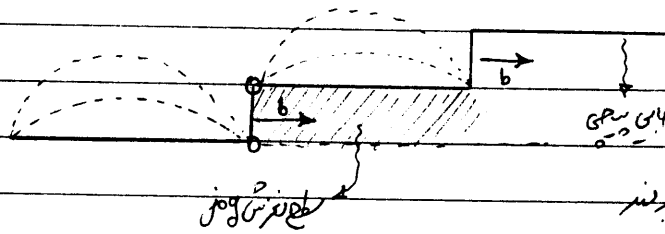
مطابق لغزش لایه‌ای از اتم‌هاست.
آزمایش مطابق لغزش‌ها به این صورت
بود که یک نابجایی پیچی تولید کردند
که اندازه بردار برگرز آن مهم نیست.
انرژی سیستم برحسب واحد طول نابجایی ثابت است $\alpha G b^2$
این انرژی یک انرژی تعادلی است. یعنی اگر انرژی برحسب واحد طول نابجایی ثابت باشد سیستم
انرژی نابجایی‌های تولید شده که انرژی سیستم E_{min} است. اگر نابجایی‌ها حرکت نکنند انرژی
غیر پیچی نیز یعنی انرژی E_{min} خواهد بود. برای استفاده نیاز نیست تا بدانیم از چه انرژی صفر گرفتیم

حرکت kink ها چیزی ساده است می‌برد. این حرکت‌ها حتی در دماهای نزدیک صفر مطلق وجود دارد
kink ها نیز هم حرکت نابجایی‌ها می‌شوند.

جلسه نهم ... از ۸ ر ۷۴

حرکت نابجایی‌ها در اثر jog

jog ایجاد شده روی نابجایی پیچی از نوع پله‌ای است.
jog پله‌ای یک سطح لغزش دارد. سطح jog
با بردار برگرز خودش می‌سازد.



نابجایی پله‌ای برای هر jog دو اتم وجود دارد
که هر کدام روی سطح لغزش خودش که هر دو سطح سطح فشرده بودند
حرکت می‌کرد. دو اتم هر دو روی یک سطح فشرده قرار دارند
سئوال فرق که وجود دارد این است که وقتی نابجایی پیچی حرکت می‌کند
سطح لغزش خود را عوض می‌کند. در این حالت jog پله‌ای نمی‌تواند سطح لغزش خودش را عوض کند و همراه نابجایی پیچی حرکت نکند
(چون پله‌ای است) پس این jog نمی‌تواند مانع حرکت نابجایی پیچی شود. در واقع یک jog پله‌ای به صورت مغناطیسی ایجاد می‌شود
دیدیم وقتی یک نابجایی طولش زیاد شود انرژی برواحد طول آن زیاد می‌شود و وقتی انرژی برواحد طول آن زیاد شد عکس العمل
آن یعنی کشش خطی زیاد می‌شود. بنابراین نیروی پیچی که به این قفل وارد می‌شود بیشتر می‌شود

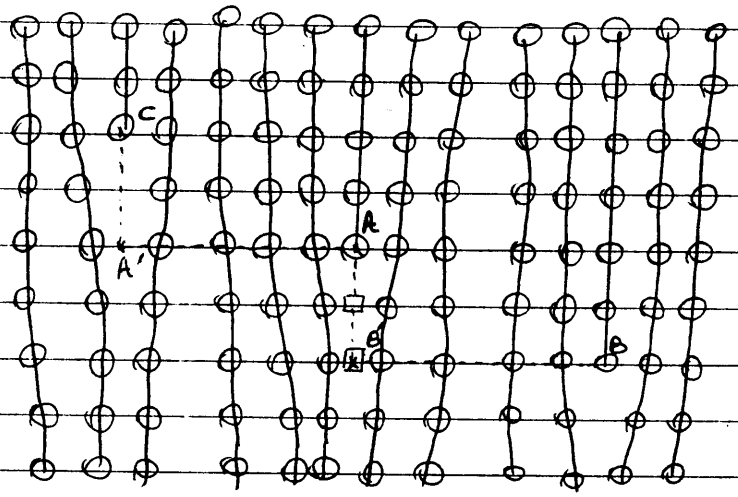
حالا بررسی می‌کنیم که با چه مکانیزم‌هایی این jog ها می‌توانند همراه نابجایی پیچی حرکت کنند

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

فرض کنیم این jog برای یک نابجایی پیچی است به صورت زیر:

طول آن به اندازهٔ یک پارامتر شبکه است



این jog در نقطهٔ A است. نابجایی پیچی حرکت می‌کند و فرض می‌کنیم این jog همراه نابجایی پیچی حرکت می‌کند.

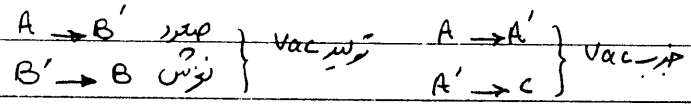
فرض می‌کنیم این jog در نقطهٔ A به نقطهٔ B بیاید یکی از مسیرهایی که وجود دارد این است که از A تا B' صعود کند و از B' به B نزول کند.

این تنها مسیر نیست، می‌توانست هر چقدر خواست صعود (یا نزول) کند و آن‌گاه از A تا B برسد.

صعود این jog همراه با تولید Vac است.

حال اگر فرض کنیم jog از B به A بیاید تا برای صعود C هم یکی از مسیرهای این است که از A تا A' نزول کند و از A' تا C صعود کند.

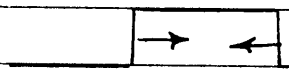
باز هم این تنها مسیر نیست. مسیر حرکت صعودی از A' تا C همراه با جذب Vacancy است.



← پس در حرکت یک jog برای همراه با نابجایی پیچی باید Vac تولید شود یا جذب شود.

اثبات این حرکت نیازمند تولید یا جذب Vac است یعنی نیازمند انرژی است زیرا انرژی لازم برای ایجاد یک تعادل است.

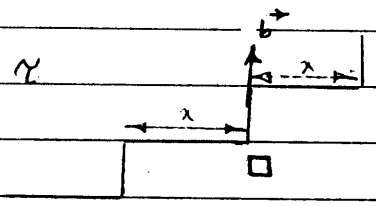
تنش حرکت نابجایی همراه با افزایش طول و در نتیجه افزایش انرژی کرنشی است. از طرفی اگر بین Vac ها تعادل باشد تولید یا جذب آن‌ها همراه با افزایش انرژی است. نابجایی وقتی حرکت می‌کند انرژی‌اش از دو طول تغییر می‌کند و آن انرژی تولید یک Vac بیشتر است. بنابراین به ازای افزایش طول، Vac تولید می‌شود یعنی نابجایی به اندازه یک بردار برگرز جابجا شده است. یعنی نابجایی وقتی شروع به حرکت می‌کند سنگین است.



(jog ها همانند حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند)

از همان ابتدا jog نمی‌تواند با آن حرکت کند اما بعد از مدتی با تولید Vac، jog هم می‌تواند همراه آن حرکت کند.

تشکیل jog ها وقتی روی یک نابجایی موجود می‌آید معمولاً یک حلقه، حول آن نابجایی تشکیل می‌شود و حلقه بسته می‌شود و نابجایی‌ها خنثی می‌کنند. این حلقه هم جابجا می‌شود حول حلقه‌های هم جهت را بزرگ‌تر می‌کند و حلقه‌های با جهت مخالف را کوچک‌تر می‌کند یعنی نابجایی منظم می‌شود.



وقتی تنش آن نابجایی وارد می‌شود، حرکت می‌کند و نابجایی حل می‌کند.

نیرو بر واحد طول $2\tau b$ است و نیروی وارد بر طول a برابر $2\tau ab$ می‌شود.

اگر یک Vac تولید شود، jog به اندازهٔ b حرکت کند (صعود کند)

چون فرض کردیم نوا حل jog ها مساوی است بنابراین به ازای هر طول a یک jog وجود دارد

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

پس وقتی jog به اندازه b حرکت کند کل طول x به اندازه b حرکت خواهد کرد و حرکت آن آزادتر می‌شود
پس اگر نابجایی به اندازه b حرکت کند، کار انجام شده توسط طول x حاصلضرب نیروی $2\tau bx$ در جابجایی b خواهد بود:

کار انجام شده توسط طول x در حرکت به اندازه b جهت تولید یک Vacancy: $W = (2\tau bx)b = 2\tau b^2 x$

انرژی یک Vacancy: $\alpha G b^3$

تقسیم انرژی بر واحد طول یک نابجایی $\alpha G b^2$ است
وقتی یک Vac جذب می‌شود یعنی یک jog تولید می‌شود
jog یک پله به طول b است. بنابراین انرژی یک jog = انرژی یک Vac $= \alpha G b^2 (b)$

بنابراین در ازای این کار برابر انرژی تولید یک Vac شود، Vac تولید می‌شود یعنی:

$$2\tau b^2 x = \alpha G b^3$$

$$x = \frac{\alpha G b}{2} \quad \text{یا} \quad \tau = \frac{\alpha G b}{x}$$

آ: تنشی که در آن تنش Vac می‌تواند تولید شود

وقتی دما بالاست چون انرژی حرارتی کم داریم، انرژی تولید می‌تواند کم باشد زیرا انرژی حرارتی هم به آن کمک می‌کند

تشابه و تفاوت نابجایی

جنبه‌هایی که در مورد عیوب نقطه‌ای گفتیم در مورد نابجایی به این شکل صادق نیست. در مورد عیوب نقطه‌ای گفتیم عیوب نقطه‌ای در حال تعادل ترمودینامیکی هستند. مثلاً در مورد Vac گفتیم در دمای یک تعداد Vac در حال تعادل هستند اما نابجایی چنین است. ما نابجایی را به وجود آوردیم و انرژی سیستم است و هیچ وقت هم در حال تعادل ترمودینامیکی نیست فرق دیگر عیوب نقطه‌ای با نابجایی‌ها این است که عیوب نقطه‌ای را هیچ وقت نمی‌توان دید یعنی هیچ میکروسکوپی نمی‌تواند آن‌ها را نشان دهد. در جایی که نابجایی‌ها را می‌توان دید. عیوب نقطه‌ای را نمی‌توان به تنهایی مشاهده کرد ولی می‌توان وجودشان را بررسی کرد جایی که نابجایی با میکروسکوپ الکترونی قابل دیدن است.

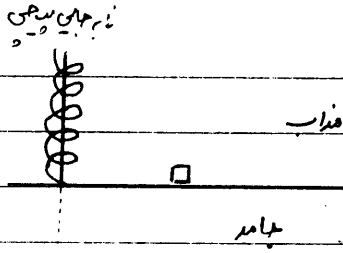
تقسیم نابجایی هیچ وقت در تعادل ترمودینامیکی نیست. پس چرا نابجایی‌ها در حال تعادل نیست باید بالاخره جایی از لحاظ انرژی قابل دفن باشد. بعضی جاها می‌توان گفت طی کسری از ثانیه نابجایی به وجود می‌آید و تمام می‌شود ولی گاهی می‌توانیم آن را ببینیم

(۱) به وجود آمدن نابجایی در حین انجماد:

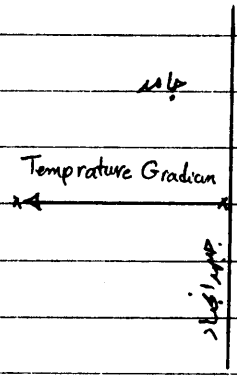
اصلی‌ترین منشأ نابجایی به وجود آمدن آن در حین انجماد است. در حین انجماد راه‌ها و مکانیزم‌های مختلفی وجود دارد که نابجایی به وجود آید. یکی از عمومی‌ترین این مکانیزم‌ها در به وجود آمدن نابجایی جهت رشد سریع انجماد است.

s.a.m

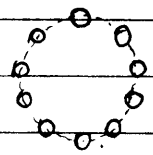
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



اگر یک سطح را در نظر بگیریم که این سطح شروع به رشد کند چون انجماد معمولاً بر روی سطح شروع به رشد می‌کند. این سطح سطحی است که در زیر آن فاز جامد است و در بالای آن اتم‌های مذاب. در روی این سطح تراز می‌گیرند و رشد جامد را ادامه می‌دهند. حالتی را فرض می‌کنیم که تنها یک اتم در روی این سطح تراز شده و این اتم ارتباطش با سطح خیلی محکم نیست زیرا مثل یک جزیره کوچک در وسط دریاست. بنابراین اتم‌های روی سطح نیز زیاد دوام نمی‌کنند چون انرژی را جذب می‌کنند. از طرفی در بالا تراکم بالاست و تمایل به بلعیده شدن آن هست و از طرف دیگر شبکه‌ای که تشکیل شده است سعی در تراز کردن دارد یعنی تمایل به بلعیده شدن آن هست. بنابراین حالت یک نابجایی پیچی روی این سطح بوجود می‌آید. نابجایی پیچی به صورتی است که اتم‌های اطراف آن به صورت مارپیچ قرار گرفته‌اند. اگر یک اتم روی این مارپیچ تراز شود در مکان خیلی مناسبی قرار گرفته است. بنابراین نابجایی پیچی روی سطح بوجود می‌آید و کمک می‌کند به اینکه رشد جامد با سرعت بیشتری ادامه پیدا کند. وقتی یک جا رشد ادامه پیدا کند دره‌های دیگر هم راحت‌تر رشد ادامه می‌یابد

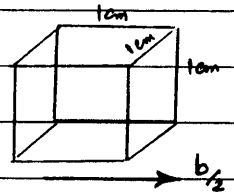


۲- افتراف وانسیته Vacancy : یکی دیگر از این مکانیزم‌ها این است:
در جایی جبهه انجماد دمای مذاب است اما وقتی از جبهه انجماد بخواهیم داخل جامد حرکت کنیم دما کاهش پیدا می‌کند و این کاهش دما به سمت پایین است (البته جنس عوض شد نگو دارد) یک Gradian دما داریم از جبهه انجماد تا سطح مقابل. وانسیته Vac ها را فرض کنیم چه دمائی کند. نزدیکی جبهه انجماد دما دمای بالا است پس وانسیته Vac بیشتر است. دما در دمای پایین‌تر در درون جامد وانسیته Vac کمتر است. این اختلاف Vac باعث می‌شود که نابجایی بوجود آید. یعنی یک حفره Vacancy بوجود آید تبدیل می‌شود به یک حفره نابجایی. یعنی Vac ها کنار هم جمع می‌شوند تبدیل به حفره نابجایی می‌شوند.



"تنش" هم می‌تواند عنصر طرحی کند. مثلاً وقتی یک نابجایی داریم دو اطراف آن می‌تواند یک نابجایی دیگر تنش‌هایی ایجاد بوجود آید بگونه‌ای که در مجموع آن تنش‌ها ضد همدیگر کار کنند. بنابراین نابجایی‌های اتمام بوجود می‌آید و بعداً با تغییر حرارت این نابجایی‌ها را از بین می‌برد یعنی می‌توانیم وانسیته آن‌ها را کم کنیم اما بطور کامل هیچ وقت نمی‌توان آن‌ها را از بین برد.

اگر نابجایی یک جسم آنیل شده و تمیز حال تعادل حدود 10^6 خط/cm^2 وجود دارد. فرض کنیم یک فلز یک جسم به حجم $1cm^3$ داریم می‌خواهیم آن را تغییر شکل دهیم.
در این جسم حدوداً 10^6 خط/cm^2 نابجایی داریم.
هر نابجایی که حرکت کند از روی یک سطح لغزش به انتهای سطح می‌رسد به اندازه $\frac{b}{2}$ جابجایی بوجود می‌آورد



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

برای اینکه انرژی حرکت نابجایی‌ها با یکدیگر در حد صفر تا ۵۰ درصد برخورد نابجایی‌ها، متوسط این زاویه ۹۵° خواهد شد که جابجایی آن معادل $\frac{b}{2}$ است. این یک مقدار میانگین است. ممکن است جابجایی‌هایی بیش از آن ۵۰ بیشتر و برخی کمتر از این مقدار باشد.

اگر ۵۰ درصد برابر 2×10^{-8} در نظر بگیریم:

$$\begin{cases} b \simeq 2\times10^{-8} \\ 10^{6}\times b/2 \end{cases} \longrightarrow 10^{6}\times\frac{1}{2}\times2\times10^{-8} = 10^{-2}$$

تعداد جابجایی برای انرژی‌سازی نابجایی

یعنی از هر صد نابجایی‌ها حرکت نکرده و صد در انتهای سطح مرجع به اندازه ۱٪ تغییر شکل داریم.

در حالی که در عمل با چنین مقدار این‌ها تغییر شکل داریم.

مثلاً اگر این بلور را با فشار ۱۰ MPa در حدود ۱۰٪ تغییر شکل داشتیم.

پس نابجایی‌های موجود برای تغییر شکل‌هایی که ما عملاً ایجاد می‌کنیم کافی نیستند. پس نابجایی باید به طریقی به وجود بیاید.

مثلاً همین عسلی که ۱۰^۶ خط نابجایی بر cm^2 داشت بعد از تغییر شکل حدود 10^{12} خط بر cm^2 نابجایی دارد. بنابراین نابجایی باید تولید شود. یعنی از یک نابجایی تعدادی آن افزایش یابد. دو حالت برای افزایش تعداد نابجایی وجود دارد:

(۱) چندلغزی نابجایی (تولید)

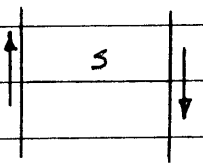
(۲) تکثیر نابجایی

تفاوت این دو در این است که در چندلغزی از جابجایی نابجایی‌های موجود نابجایی جدید ایجاد می‌شود اما در تکثیر یک نابجایی منبعی می‌شود برای بوجود آمدن نابجایی‌های دیگر. این دو مکانیزم می‌توانند با هم نوعی از این دو تا نابجایی‌ها باشند.

(۱) چندلغزی نابجایی:

- چندلغزی همورن
- چندلغزی هتورن

چندلغزی همورن نابجایی: به وجود آمدن نابجایی پریسک حلقوی می‌طلبد بلور. مثلاً برای غوطه نیم صفحه‌ای که هیچ عیبی وجود ندارد یک صفحه بلوری نصف شده و این دو نیم صفحه در هم دوباره می‌شوند تا یک نابجایی پیچی به وجود آید. جهت نابجایی پیچی برای بیشتر تولید



نابجایی پیچی به وجود آمده در صفحه نابجایی به وجود آمده عمود است. این اتفاق چه وجود دارد باید بینیم تنش لازم برای چندلغزی نابجایی‌ها چقدر است؟

برای اینکه روابط ساده‌تر باشد فرض می‌کنیم در یک صفحه نابجایی پیچی به وجود آمده که به فاصله S در بلور از هم دور شوند. می‌خواهیم بینیم تنش لازم برای چنین عملی چقدر است؟ اساساً تغییر انرژی‌ای در یک سیستم را حساب می‌کنیم وقتی صفحه‌ای از هم دور می‌شوند. نیروی جاذبه آن‌ها به هم کم می‌شود. نوعی نیم S جابجایی است که نیروی جاذبه آن‌ها به هم کم می‌شود

انرژی برهم‌کنش نابجایی پیچی:	$\frac{Gb^2}{4\pi}\ln\frac{R}{r_0}$	سیستم انرژی‌زدوده
اگر $R=S$ بگیریم: انرژی برهم‌کنش دو نابجایی	$\frac{Gb^2}{4\pi}\ln\frac{S}{r_0}$	

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

تنش وجود دارد با آن کاری نداریم. در اینجا کار لازم انجام شده، نیروی اصطکاک نابجایی را (τb) است

کار انجام شده برای حرکت نابجایی برابر است با: $\tau b s$

$$E_{tot} = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{s}{r_0} - \tau b s$$

این انرژی وقتی $s=0$ است که نابجایی هر طول داشته باشد و هیچ نابجایی این طول ندارد. وقتی حرکت نابجایی شروع می‌شود این انرژی از یک Max می‌افتد و بعد کاهش می‌یابد و ثابت می‌شود

$$\frac{dE_{tot}}{ds} = 0 \Rightarrow \frac{Gb^2}{4\pi} \frac{1}{s} - \tau b = 0 \Rightarrow \boxed{s^* = \frac{Gb}{4\pi\tau}}$$

فاصله نقطه Max انرژی:

$$E_{max} = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \left[\frac{Gb}{4\pi\tau r_0} \right] - \frac{\tau b (Gb)}{4\pi\tau}$$

$$E_{max} = \frac{Gb^2}{4\pi} \left[\ln \frac{Gb}{4\pi\tau r_0} - 1 \right]$$

$$E_{max} = \frac{Gb^2}{4\pi} \left[\ln \frac{G}{4\pi\tau} - 1 \right]$$

بصورت تقریبی $b = r_0$ فرض کنیم.

برای اینکه بصورت لحظه‌ای این اتفاق بیافتد باید تنش این انرژی Max را به یک سیستم منتقل کند. اگر این تنش را τ_N بنامیم، جایی است که E_{max} برابر صفر یا یک بعدی جایی انرژی Max است

$$\begin{cases} \tau = \tau_N \\ E_{max} \to 0 \end{cases} \quad \ln \frac{G}{4\pi\tau_N} - 1 = 0 \Rightarrow \ln \frac{G}{4\pi\tau_N} = \ln e \Rightarrow \frac{G}{4\pi\tau_N} = e$$

$$\boxed{\tau_N = \frac{G}{4\pi e}} \qquad \tau_N \simeq \frac{G}{30}$$

این تنش، تنش Max لازم برای جدا کردن نابجایی را تأمین می‌کند. بصورت تقریبی می‌توانیم بگوییم یک سوم مدول برشی است.

این تنش، تنش لازم برای این است که بگوییم جایی نابجایی وجود ندارد. صفت نابجایی وجود دارد. این تنش بسیار بزرگ است و معمولاً هیچ وقت به این تنش نمی‌رسیم. پس ارتعاش جدا کردن بصورت همدوس احتمال زیادی وجود ندارد.

بنابراین می‌توانیم بیایم تولید فشرده‌ترین نابجایی حساب کنیم. جدا کردن فشرده‌ترین نابجایی برای آن تنش صورت می‌پذیرد.

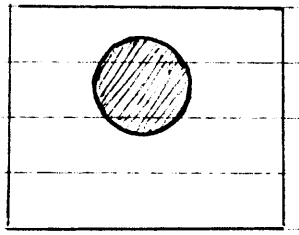
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۸۴/۸/۸ — « جلسه دهم »

« جوانه زنی هیدروژن به جای »

جوانه زنی هیدروژن در جاهایی که تراکم تنش وجود دارد مثل نابودی ذرات سخت و غیره می تواند بر جوانه زنی جسمی را تغییر شکل می دهیم و نیتیژ به جای به شدت افزایش می یابد. اما شاید وقتی که یک جسم خالص را دهم تغییر شکل می دهیم و نتیجه به جای افزایش زیادی پیدا می کند، هر چند ذرات نابودم نداریم پس افزایش به جای باید نشانه دیگری غیر از جوانه زنی هیدروژن و هیدروژن هم داشته باشد. در اینجا به مورد جوانه زنی هیدروژن صحبت می کنیم.



اگر یک جسم شکل پذیر همچون فلز بیرم که بتوانیم درون آن یک حفره بوجود بیاوریم بدون اینکه این جسم خراب شود. درون این حفره یک جسم دیگر به همین اندازه ایجاد کنیم و سعی کنیم این جسم را به جسم قبلی جوش دهیم بطوری که اتصال کاملا پیوسته باشد. اگر دمای این دو ماده یکسان باشد و اختلاف انبساط حرارتی جسم اول و دوم بین دو جسم یک تنش فشاری یا کششی بوجود می آید. اگر شعاع حفره ای که ایجاد کردیم r_0 باشد و ضریب انبساط حرارتی جسم اول α باشد:

$r = r_0 (1+\alpha \Delta T)$

α' : ضریب انبساط حرارتی جسم دوم

Δr : تغییر شعاع جسم دوم که درون حفره قرار می گیرد

$\Delta r = r - r_0 = r_0 \alpha \Delta T$

$\Delta r'$: تغییر شعاع حفره

$\Delta r' = r_0 \alpha' \Delta T$

بدیهی است که α و α' را برابر باشند یعنی اگر $\Delta r = \Delta r'$ در این صورت هیچ گونه تنشی بین دو جسم وجود ندارد.

اگر $\Delta r > \Delta r'$ در این صورت به علت وجود اتصال بین دو جسم تنش کششی خواهیم داشت

اگر $\Delta r < \Delta r'$ در این صورت جسم دوم بیشتر منبسط می شود و تنش فشاری خواهیم داشت

این میدان تنش ایجاد شده می تواند به حدی باشد که منجر به جوانه زنی ناهمگن شود که به صورت هیدروژن است.

پس وقتی در جسمی نابودم یا ذرات سخت داشته باشیم در اثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی میدان تنش خواهیم داشت که می تواند منجر به وجود آمدن ناهمگن شود. البته این مثال تا حدی فرضی و تخیلی بود.

یک مثال واقعی تر: فرض کنید جسمی داریم که اثر عملیات حرارتی بر آن رسوب بوجود آمده.

در اطراف این نابودم یا رسوب هم یک میدان کرنش ایجاد می شود

اگر این رسوب را به روی فرض کنیم و فرض کنیم

که این رسوب در خارج نوشته ای شود

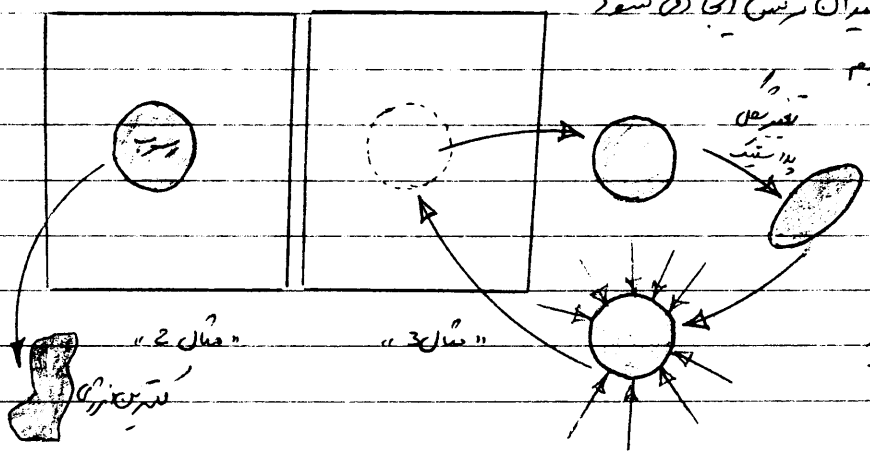
در این حالت این نابودم هیچ تنشی

در اطرافش وجود ندارد. یعنی از ذرات

که شکل پذیری بهتری دارند کمترین انرژی

را داشته باشد. اما در عمل این رسوب باید

درون همان حفره زمینه تشکیل می شد.



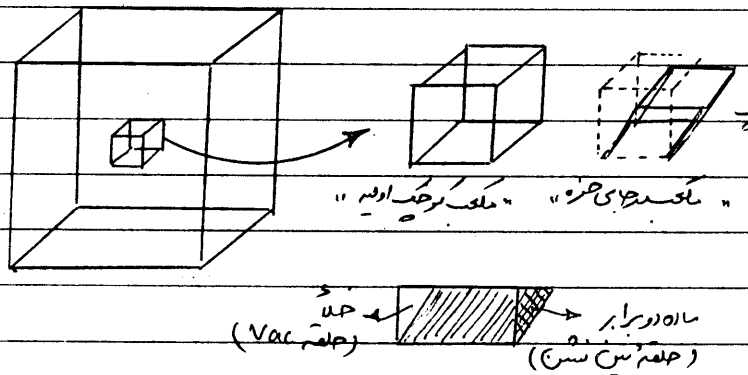
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

برای اینکه بخواهیم آن را در درون همان حفره قرار دهیم باید به آن نیرو وارد کنیم تا به شکل همان حفره درآید و سپس درون حفره قرار دهیم، یعنی در واقع مشابه نیرو باعث تنشی در جسم است پس یک جسم آزاد تنش می‌تواند آن تنش را کنش می‌شود.

مثال دیگری که در اینجا مطرح می‌کنیم باین صورت است که یک جسم با شرایطی که هم درون آن هیچ حفره‌ای وجود ندارد یک حفره کروی از درون آن خارج می‌کنیم و آن را تحت عمل یک نیرو به اندازه حجم و سپس آن را با انتقال نیرو به شکل اولیه برمی‌گردانیم. این جسم با شکل اولیه قرار نمی‌گیرد چون تغییر فرم یافته بنابراین دست‌کم باید یک نیرو وجود داشته باشد تا به همان شکل اولیه قرار گیرد. پس به همان صورت نیروهای است نیروهای وارد می‌کنیم باید آن را در درون حفره قرار دهیم. حالا اگر نیروها برداریم جسم می‌خواهد به همان حالتی که در تغییر شکل بود تبدیل شود اما حفره اجازه نمی‌دهد. پس یک کرنش در اطراف آن بوجود می‌آید یک مقدار حفره فشار وارد می‌کند یک مقدار جسم به دنبال یک حالت تعادلی با هم قرار می‌گیرند ولی در اطراف آن یک میدان تنش بوجود می‌آید که این میدان تنش می‌تواند منجر به جمله زنی نابجایی شود.

مثال عملی که می‌زنیم یک جسم بلوری است که در داخل آن یک ملکب ترکیب درآوردیم را آن را خارج کرده‌ایم



اگر جسم اصلی بخواهد تغییر شکل بدهد می‌دهیم حفره هم یک تغییر شکل برای کند. یعنی دیگر به شکل ملکبی نیست. اگر بخواهیم این ملکب ترکیب را به جای اول خود برگردانیم

یک کنش ماده و در اثر حالت اولیه می‌شود و یک کنش خنثا ایجاد می‌شود. این کنش ماده را از این ماده به جای دیگر پایت می‌شود و ماده تمایل پیوسته خود را حفظ کند.

در جهت خنثا، حلقه Vac ایجاد شود و در جهت دیگر بین شبکه‌ای بوجود آید تا انتقال صفحه شود این مثال در طبیعت می‌تواند این معنا باشد که درون یک ماده ملکبی یک ماده تردد سخت ملکبی دیگر وجود داشته باشد که شکل دیگر نیست. یعنی جسم بزرگ با تغییر شکل می‌دهیم و با جسم کوچک تغییر شکل بدهد این کند. پس برای اینکه انتقال برقرار نباشد باید اطراف ملکب کوچک نابجایی بوجود بیاید که در اثر تغییر صفحه‌ها بین شبکه‌ای حلقه‌های Vac باشد. حرف اگر تراکم شد جسم بزرگ تغییر شکل بدهد این جسم تردد تغییر شکل بدهد یا باید جسم تردد فشرده شود یعنی اتصال ایجاد شود یا اینکه انتقال با توجه به آمدن نابجایی برقرار باقی بماند.

در این مثال‌ها دیدیم که جمله زنی هنگام نابجایی در اثر اختلاف انبساط حرارتی یا اختلاف تغییر فرم پلاستیک در دمای خاص و جسم سخت صدمه می‌بیند تا انتقال به خوبی برقرار باشد.

بنابراین مشخص تراکم تنش یا به صدمه اختلاف انبساط یا به صدمه اختلاف تغییر فرم پلاستیک بوجود به علت اختلاف شکل به خوبی که خواص دوم دوی خواص زنی شکل می‌دهد می‌تواند باشد

s.a.m

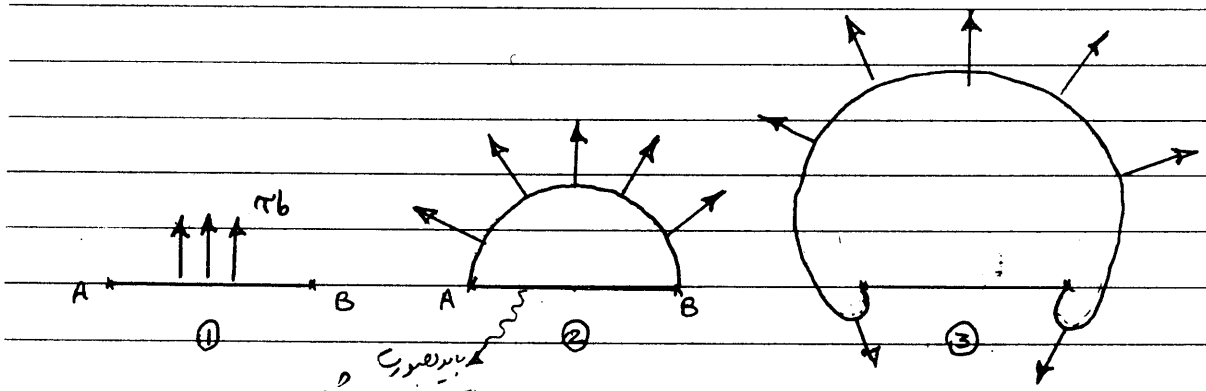
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

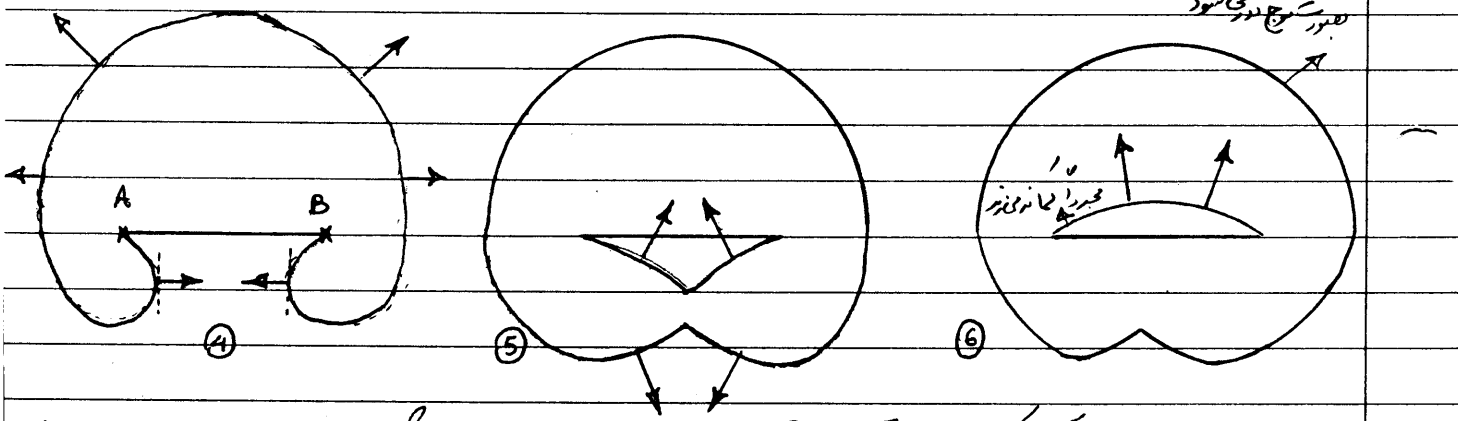
تکثیر نابجایی Multiplication of Dis.

دیدیم که حرکت نابجایی تحت تنش برشی بالایی نیاز دارد. در حالت نرمی فلزات نابجایی کم نیاز به نیروی کم یا حتی سختی درون ماده را ترک می‌کند. اما در اجسام خالص کم و اثر تقسیم فلز بسیار تمیز دارای تعداد نابجایی اندکی می‌باشد یعنی شاید در آن ۱۰ نابجایی وجود داشته باشد. در حالی که در جسم سختی شده دارای تعداد نابجایی افزایش می‌یابد بین ۱۰ به توان ۱۲ تا ۱۰ به توان ۱۶ نابجایی در هر متر مکعب. بنابراین به طریقی دیگری غیر از تولید نابجایی (حرکت نرمی) نابجایی (دانسیته نابجایی) افزایش می‌یابد.

Frank-Read Sources :

یکی از مکانیزم‌هایی که برای تکثیر نابجایی‌ها پیشنهاد شده توسط Frank و Read ارائه شد. این منابع توسط میکروسکوپ الکترونی دیده شده. می‌دانیم یک نابجایی که به انتهای بلور رسیده یا به سایر نابجایی‌ها متصل شده و دارای انرژی ثابت است. نیروی وارد بر واحد طول نابجایی τb است و حرکت آن عمود بر خط نابجایی است.



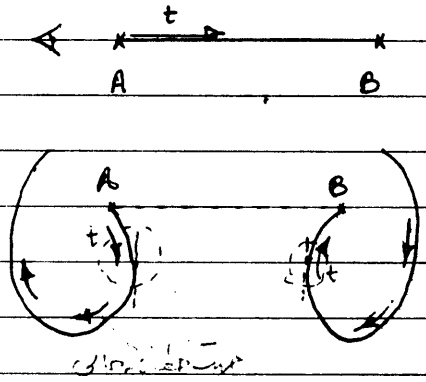


چون نابجایی نمی‌تواند حرکت کند پس حول آن انرژی می‌یابد پس اثر نیرو بصورت ساده‌ای است و نابجایی بصورت منحنی درمی‌آید. پس حرکت نیرو همیشه عمود بر خط نابجایی است و حرکت نابجایی بصورت انبساط است. همین ترتیب عمل نابجایی تغییر می‌کند. در شکل ④ بخش مشخص شده نابجایی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند اگر این نابجایی به دو سر بلور برخورد کند و نتواند حرکت کند در شکل ⑤ مشخص شده نابجایی به دو قسمت تقسیم می‌شود. چون نیرو همیشه عمود بر خط نابجایی است قسمت‌های نابجایی شروع به جمع شدن می‌کنند و در شکل ⑥ بصورت حلقه‌ای درمی‌آید و خط نابجایی دوباره شروع به منبسط شدن می‌کند و این عمل تکرار می‌شود. بخش منبسط شده هم بصورت منحنی درمی‌آید و دوباره شروع به منبسط شدن می‌کند و این عمل تکرار می‌شود.

s.a.m

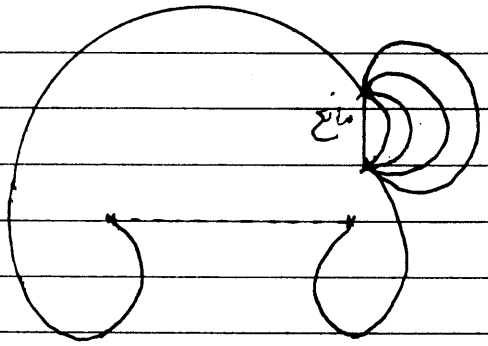
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

دوری شود. یعنی یک خط نابجایی تشکیل شد و منبعی برای تولید خطوط نابجایی بوجود آورد تا زمانی که تنش ادامه پیدا کند. این مکانیزم تکثیر نابجایی توسط منبع Frank-Read است. دو نکته در این جا شایان ذکر است: (1) می دانیم که حرکت بردار برگرز نابجایی ها باعث ایجاد برش شفق می شود.

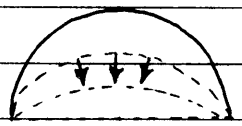


برای خود خط نابجایی یک حرکت برقرار می کنیم این حرکت ها باعث بردار روی خط نابجایی مشخص می کنیم بطوری که وضعیت پیچ یا مارپیچ مقابل باشد. بردار t برای ما بیانگر حرکت است. پس ما برحرکت نشست نابجایی نقاط می کنیم و یک مدار بزرگ برحرکت نقره های سمت راست رسم می کنیم. حرکت خط نابجایی هم برحرکت بردار برگرز اثر دارد. بنابراین وقتی نابجایی مشخص شده برروی آن حرکتی داشته باشد دیگر حرکت است. چون در خلاف جهت هم هستند همدیگر را خنثی می کنند و در یک دایره تقریبی همین صورت است.

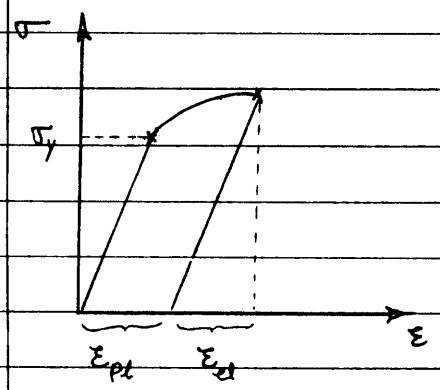
(2) این مکانیزم تنها زمانی اتفاق می افتد که روی سطح لغزش هیچ مانعی وجود نداشته باشد. اما سطح لغزش پر از مانع است حداقل نابجایی های دیگر به عنوان مانع عمل می کنند. اما اثر این نابجایی ها بر یک مانع برطرف نمی شود. خود این مانع می تواند به عنوان یک منبع Frank-Read عمل کند و مکانیزم نابجایی تکثیر است بنابراین نابجایی همیشه در حال تکثیر است.



اصولا منبع Frank Read پس از تنش تسلیم فعال می شوند بنابراین تکثیر نابجایی توسط منبع Frank-Read از تنش تسلیم به بعد آغاز می شود. به همین دلیل است که وقتی وارد ناحیه پلاستیک می شویم دانسیته نابجایی به شدت افزایش می یابد.



اصولا یک نابجایی نمی تواند بیشتر از حد معینی به انبار فرو برود. تا زمانی که تنش به اندازه نیم دایره نشده است برگشت پذیر است یعنی تا زمانی که نیم دایره تشکیل نشده است اگر تنش را حذف کنیم برگشت پذیر است آن ها به حالت اول برمی گردند. وقتی که از نیم دایره بیشتر داریم وارد محدوده پلاستیک می شویم.



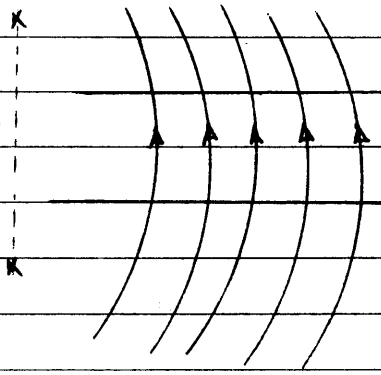
در منحنی تنش-کرنش وقتی تنش تسلیم را رد کنیم وارد ناحیه پلاستیک شویم و بین تنش ها برداریم یک حداقل برگشت الاستیک داریم ولی کرنش پلاستیک هم داریم که برگشت ناپذیر است.

وقتی تغییر شکل پلاستیک می دهیم چون استیشنر تغییری نمی کند زیرا دانسیته نابجایی ها تغییری نمی کند یعنی در اثر تغییر شکل پلاستیک

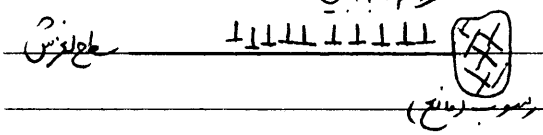
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

تنش برشی تا لیمیتی کند. هر نابجایی که حرکت لغزشی دارد می تواند منبع Frank Read باشد.



بنابراین هر نابجایی ها در حین تولید می شه به صورت
اسواج نابجایی دوری شوند که باعث ایجاد تنش داخلی
نابجایی می شود.
که همین تنش نابجایی در نقاط مرزدانه وجود دارد
می تواند سبب تراکم یا انباشتگی نابجایی شود
مثلاً اگر روی یک سطح لغزش به مانعی برسد
مطابق شکل یک سری نابجایی هم نام پشت هم
انباشته می شوند. چون نابجایی ها نمی توانند حرکت کنند
تراکم نابجایی یعنی تراکم تنش چون نابجایی ها هم نام دفع شدند
این تنش یک تنش پسماند است که در آزمایشگاه می تواند کار
انجام دهد.



منبسط شدن فوتون یعنی انتشار امواج صوت در بلور پستر تنش پیدا می کند. یعنی مثلاً مانند یک موج در بلور
پخش می شود و با انرژی کمتر بالا می رود

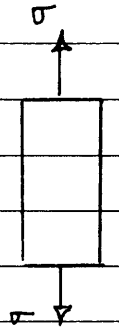
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

«جلسه یازدهم» ۸۴/۸/۱۰

توسیم تکمیلی تقدیم منابع Frank-Read این است که نابجایی ها
پشت موانع انباشته می شوند.
از این منابع می توان با شکل یک منبع Frank-Read
داشته باشیم که نابجایی تکثیر شده نابجایی های
کوتاه مرز دانه ی همسایه هستند یعنی
بردار برگرس آن ها در یک جهت است بنابراین
در پشت یک منبع تراکم تنش بوجود می آید
از فرض قبل که تعداد n نابجایی
وجود داشته باشد، تنشی که اولین نابجایی
به مرز دانه وارد می کند می توان نشان داد برابر $n\tau$
است. این تمرکز تنش می تواند سه حالت ایجاد کند:

(1) نابجایی صعود کند: از تعداد نابجایی های متراکم کم می شود و مقداری از تنش Relax می شود
(2) از ادغام چند نابجایی یک جوانه ترک ایجاد شود: براساس تئوری های مکانیزمی وجود دارد.
(3) نابجایی در دانه مجاور جوانه بزند: می دانیم مرز دانه منطقه ای است که جهات بلوری با هم یک زاویه می سازند
شدت تمرکز تنش در مرز دانه (111) باشد. در صفحه (111) از دو دانه مجاور با هم زاویه ای مثل θ می سازند.
اگر تنش حدی برای جوانه زنی نابجایی در دانه مجاور کافی باشد نابجایی در دانه مجاور جوانه می زند (در اینجا نابجایی
از مرز عبور کند) و این حالت از تعداد نابجایی های متراکم شده کاسته می شود. اما چون تراکم تنش این بخش هم
افزوده می شود.

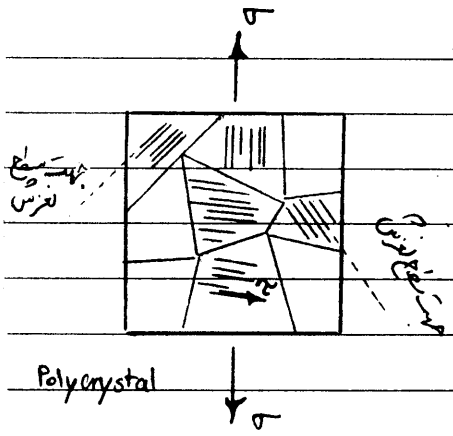


وقتی ماده تحت بار با یک Rate مشخص تغییر شکل هم با همین Rate انجام می شود
و تنش هم برای نگهداری این Rate تنظیم می شود. هر چه قدر تغییر شکل سخت تر شود
تنش با بالاتری برود تا این Rate حفظ شود. می دانیم فرآیند تغییر شکل های مختلف انجام
می شود. تا زمانی که فرآیندهایی که در سیستم های مختلف انجام می شود برای این ε کافی باشد
تراکم تنش در جایی می شروع به جوانه زنی آسیب و شکست می کند و جوانه زنی آسیب را جسم تسلیم است.
اما زمانی که فرآیند نابجایی ها تا قبل از این تغییر شکل نکند آن وقت تراکم تنش موجب ایجاد آسیب
و شکست جدی شروع می شود.

در حالت (3) هم همین صورت است یعنی وقتی در جایی شروع به فرآیند فرآیند تراکم می شود می تواند از افزایش تراکم تنش
در جای دیگر جلوگیری کند. بنابراین جوانه زنی نابجایی تراکم تنش می تواند در مرز دانه هم به این صورت اتفاق
بیافتد.
مرز دانه جایی است که دو طرف آن جهات بلوری فرق می کند یعنی با هم یک زاویه θ می سازند.
مسئله اندازه این زاویه θ مرز دانه می تواند مرز اصلی یا مرز فرعی باشد. مرز فرعی زمانی است که این زاویه

s.a.m

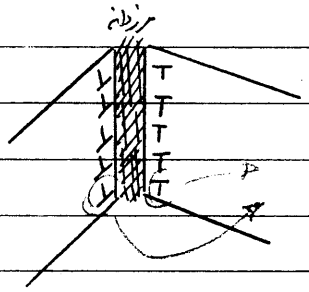
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



کوچک باشد یعنی از چند ده میکرون بیشتر نباشد. مرزدانه‌ای می‌تواند در اثر این ناجایی‌ها شکل بگیرد.
در مرز دانه‌ای زاویه θ نزدیک است (زاویه بین دو جهت خاص در دو دانه مجاور)

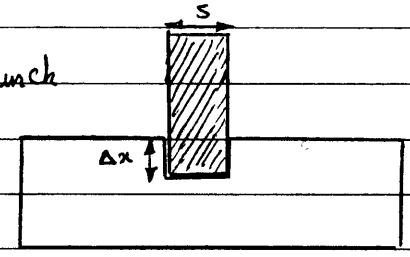
تغییر شکل پلاستیک در مرز دانه:

می‌خواهیم ببینیم در اثر تغییر شکل پلاستیک برای مرزدانه چه اتفاقی رخ می‌دهد.
اگر یک جسم پلی‌کریستالی را در نظر بگیریم که از دانه‌های مختلف تشکیل شده که در هر دانه جهت یابی سیستم لغزش با دانه‌های مجاور فرق دارد. پس از دانه‌ای به دانه دیگر صفحات لغزش فرق می‌کند. در این حالت وقتی تنش σ اعمال کنیم این تنش در هر دانه به صورت τ روی صفحه لغزش عمل می‌کند و سپس به زاویه‌ای که صفحه لغزش آن دانه با جهت اعمال σ دارد می‌سازد، دارد. بنابراین تنش موثر در دانه‌های مختلف با هم متفاوت خواهد بود به صورت یک کریستال دیدیم میزان تنش موثر برابر $\frac{\sigma}{2}$ و $\frac{\sigma}{\sqrt{2}}$ و σ بود. یعنی تا چند برابر تنش بیرونی در دانه‌های مختلف تفاوت دیده بنابراین در اثر تغییر شکل پلاستیک در دانه‌های مختلف فرق می‌کند. چون در تغییر شکل پلاستیک زمانی اتفاق می‌افتد که از یک تنش برشی بحرانی بگذریم و تنش برشی در دانه‌های مختلف در زمان‌های مختلف اتفاق می‌افتد. هر چند برای حالت تک بلورها این را در نظر گرفتیم اما میزان تنش در دانه‌های مختلف با هم یکسان نیست.



Geometrically Necessary Dislocations

حال اگر دو دانه مجاور در دو طرف یک مرز دانه را در نظر بگیریم که تغییر شکل بیشتری دارد و یکی تغییر شکل کمتری داشته و وقتی این اتفاق بیافتد برای حفظ جسم مرز دانه باید جابجا شود چون نمی‌تواند ثابت باقی بماند. از طرفی حرکت هم نمی‌تواند بکند چون در این صورت شکست اتفاق می‌افتد. پس مرز دانه حرکت نمی‌کند. جدا اتفاق می‌افتد. وقتی اختلاف تغییر شکل پلاستیک دو طرف مرز وجود دارد این اختلاف با بوجود آمدن یک سری نابجایی در دو طرف مرز دانه جبران می‌شود. یعنی یک سری نابجایی در اطراف مرز دانه بوجود می‌آید تا این عدم انطباق تغییر شکل پلاستیک را جبران کند. درست مانند کرنشی که در جسم بدون تغییر فرم پلاستیک حاصل شد. به این نابجایی‌ها "نابجایی‌های لازم از نظر هندسی" می‌گویند:
این نابجایی‌ها را Geometrically Necessary Dislocations یعنی نابجایی‌هایی که بوجود می‌آیند تا هندسه جسم تغییر نکند. این نابجایی‌ها را هم می‌توان دانسیته آن‌ها را خیلی دقیق حساب کرد. چون از حجم داده جابجا شده کاملاً دقیق می‌توان این دانسیته‌ها را حساب کرد. به این شکل:



سطح یک فلز را با یک سنبه Punch می‌کنیم
این فلز ایده‌آل کار می‌کند و دو اثر این ماده تبدیل به حلقه‌های سن ونت نابجایی می‌شود
و این مقدار دو جبران می‌کند یعنی به صورت یک عیب شبکه نیم صفحه سن ونت ظاهر می‌شود.

$V = s\Delta x$

$V_{\text{یک حلقه}} = s.b$

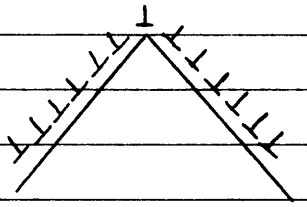
$nsb = s\Delta x$

$\Delta x = nb$

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

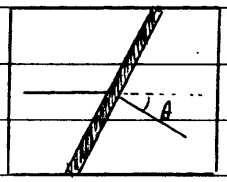
اگر سطح Punch به اندازه ΔS بالا برود، سطح نمونه به اندازه Δx بالا می‌رود.
حجم یک حلقه نابجایی $\pi b S$ است چون سطح آن برابر با πb می‌باشد. اگر n حلقه نابجایی خواهد این نمونه را ترک کند حجم آن‌ها $n \pi b S$ خواهد بود. سپس می‌توان حساب کرد که هر حلقه نابجایی چه مسیری طی می‌کند تا از نمونه خارج شود. سپس نابجایی‌ها لازم از نظر هندسی طی می‌توان برآیند تنش‌های وارد شده بر آن‌ها را حساب کرد. بنابراین این نابجایی‌ها به وجود می‌آیند تا در تنش‌های مختلف تغییر شکل یا تنش جدید ایجاد کنند. این تنش‌ها می‌توانند مربوط به نابجایی‌ها یا اثر اصطکاک سطح نمونه باشد.



statistically stored Dislocations

نابجایی‌های ذخیره شده تصادفی "statistically stored Dis."
فرض کنید یک لوپ lamer cottrell به وجود آید. این لوپ به صورت تصادفی در داخل بلور به وجود می‌آید. اگر این لوپ به صورت نابجایی‌های اطراف آن ضربه می‌شوند یعنی محدوده‌ای می‌شود که آن را ذخیره نابجایی ضعیف نامیده می‌شود. این نابجایی‌ها نابجایی‌های ذخیره شده تصادفی هستند یعنی تمام نابجایی‌ها ذخیره تصادفی است.
وارد شده این نابجایی‌ها را نمی‌توان حساب کرد. این افزایش‌ها از روی خاصیت بلور متوجه می‌شویم. مثلاً سختی بالا می‌رود می‌فهمیم وارد شده نابجایی افزایش یافته. یا مثلاً استحکام بالای مواد می‌فهمیم وارد شده نابجایی‌ها بالا رفته است. یا مقاومت سختی زیاد می‌شود.

"مواد اصلی" "توانایی مواد در روی استحکام"
یکی از پارامترهای که استحکام را بالا می‌برد عوامل مواد است. استحکام با تنش هم متناسب است. آزمایشی برای دیدن تأثیر مواد روی استحکام انجام می‌دهیم به این صورت است که:
یک جسم دو بلوره را در نظر می‌گیریم که تنش مواد دارد.
اگر اختلاف جهت بلوری دو طرف مرز به صورت مشخص نشان باشد، استحکام این جسم دو بلوره با هر جسم θ اندازه‌گیری کرده‌اند مشاهده شده هر چه θ بزرگتر باشد استحکام ماده بیشتر است و هر چه θ به سمت صفر نزدیک‌تر شود یا استحکام ماده به تک بلور نزدیک‌تر می‌شود. هر چه این جسم در کریستال استحکام بیشتری نسبت کریستال دارد. پس وجود مرز دانه در تنش تسلیم هم تأثیر دارد چون وقتی استحکام ماده بالا برود تنش تسلیم هم بیشتر شده است.



جسم دو بلوره

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

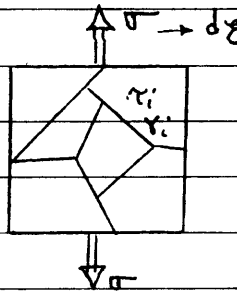
$$\tau_{RS} = \frac{1}{2}\sigma \sin 2\theta \cos\lambda$$

در مورد تک بلور Single crystal:
یعنی تنش برشی بحرانی جهت لغزش
و جهت متراکم آن صفحه لغزش دارد

$$\tau = \frac{\sigma}{M} \qquad \text{(Single crystal)}$$

λ: زاویه بین تنش و جهت متراکم

اگر تمام این فاکتورهای جهت یا $\frac{1}{M}$ نباشد را بنویسیم می‌توانیم چون نقطه جهات بلوری نسبت به جهت اعمال تنش ثابت دارد. حالا ما خواهیم ببینیم برای یک Poly crystal آیا می‌توانیم یک عددی را همانی بنویسیم یا خیر.



در Poly-crystal وقتی تنش برشی برای هر دانه متفاوت است.
اگر تنش σ به Polycrystal وارد کنیم و نتیجه آن کرنش مانند $d\varepsilon$ داشته باشیم. اگر فرض کنیم در هر دانه یک تنش برشی τ_i و یک کرنش برشی γ_i داریم و فرض کنیم تمام انرژی صرف تغییر شکل پلاستیک شده و هیچ اتلاف انرژی نداشته باشیم می‌توانیم بنویسیم:

یعنی انرژی که صرف شده برابر است با مجموع انرژی در دانه‌های مختلف

$$\sigma . d\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} \tau_i . d\gamma_i$$

اگر فرض کنیم در هر دانه تنش برابر (تنش به آن دانه جایی ها شروع به حرکت می‌کنند) یکی است می‌توانیم بنویسیم:

$$\sigma . d\varepsilon = \tau \sum_{i=1}^{n} d\gamma_i$$

$$\boxed{\frac{\sigma}{\tau} = \frac{\sum d\gamma_i}{d\varepsilon} = \bar{M}}$$

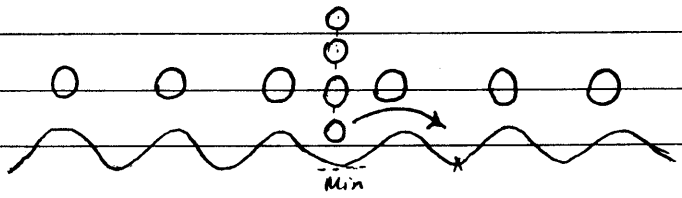
$\bar{M}$: فاکتور جهت متوسط برای پلی کریستال

تنش تسلیم طبق رابطه Hall-Petch با قطر دانه رابطه دارد:

$$\boxed{\sigma_0 = \sigma_i + kD^{-1/2}}$$

D: قطر دانه
(Locking parameter) k ①
σ_0: تنش تسلیم
σ_i: تنش اصطکاکی شبکه

می‌بینیم که برای دانه‌های ریزتر تنش تسلیم بالاتر است. البته این رابطه تا حد خوبی توان پیش‌بینی دارد.
انتشار انرژی به اضطراب بستگی به جهت دارد ($\propto Gb^2$) است. روی صفحه لغزش انرژی Periodic است، یعنی به موقعیت دارد. یعنی روی صفحه لغزش:



اگر به موقعیت اتم‌ها به صورت شکل بالا باشد تغییرات انرژی به صورت sin است و ما فرض صفحه اضافی در دره انرژی بین دو اتم قرار می‌گیرد که انرژی Min دارد. وقتی که خواهد حرکت کند باید یک تپه Min به تپه میانی برود حرکت کند این به دو تنش نیاز دارد که بتواند از آن تپه عبور کند همان اصطکاک شبکه است.

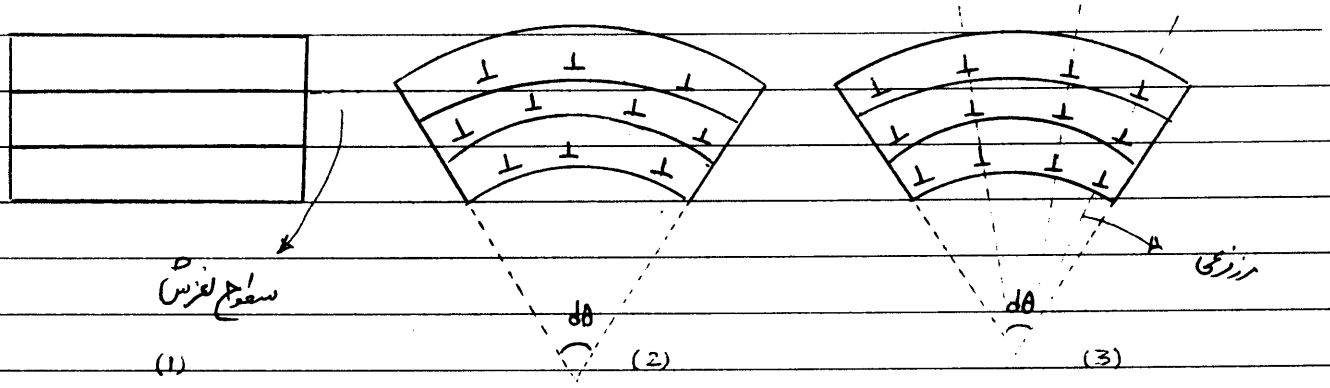
① k: measures the relative contribution of the grain boundaries hardening

s.a.m

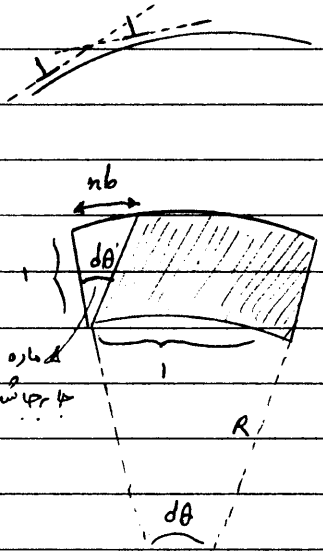
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

تنشی که لازم است تا بتواند جابجایی از این سد انرژی حرکت را فراهم کند تنش اصطکاکی نامیده است (τ_f)
همان تنش برشی است که بر واحد طول نابجایی به موقعیت آن تنش دارد. وقتی که دو نوع kink ها هم جهت می رویم
نیز تشکیل می دهیم، حرکت kink نابجایی به موقعیت Min انرژی یک موقعیت Min انرژی
دیگر تشکیل می کند. یک مقدار ثابت است.
تغییر دانسیته نابجایی ها می توان اندازه تنش را تغییر کرد.

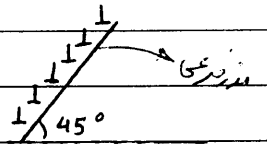
مرزهای زاویه ای:
از کنار هم قرار گرفتن نابجایی ها بوجود می آید.
اگر یک کریستال را به صورت لغزش شکل زیر در نظر بگیریم در آن نابجایی وجود نخواهد داشت
ولی اگر تعدادی نابجایی روی سطح لغزش ایجاد می شود



این نابجایی ها همان نابجایی هایی لازم از نظر فیزیکی هستند و دانسیته آن ها قابل محاسبه است.
حالا اگر یک جریان مشترک انرژی به جسم دهیم این نابجایی ها که آرایش خاصی به خود می گیرند
آرایش آن ها به این صورت است که روی هم قرار می گیرند چون در این حالت نیروی آن ها صفر است
و واقع یک حالت تعادل قرار می گیرند.
یک اختلاف جهت کوچک هم بین نابجایی ها بوجود می آید
که محور آن اختلاف جهت ها را همان dθ خواهد بود
مرز زاویه ای در واقع همین نابجایی هاست که داخل جسم برای
رسیدن به تعادل نهایی بین خودشان تا هم نیرو وارد نکنند.



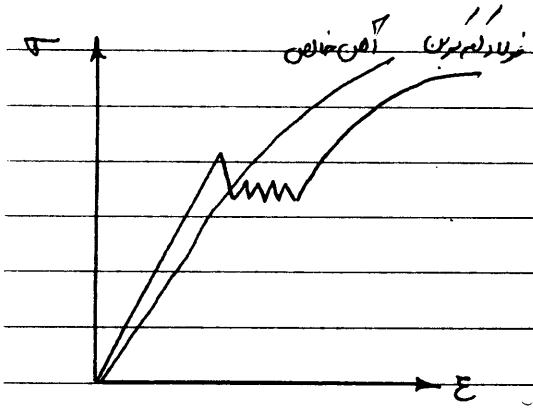
بنابراین در جایی نابجایی ها روی صفحه 45° قرار می گیرند تا نیروی آن ها
صفر شود. ایجاد یک مرز زاویه ای خواهد کرد



s.a.m

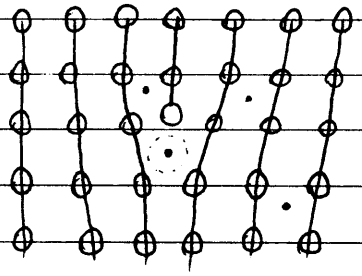
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

پدیده تقصیر



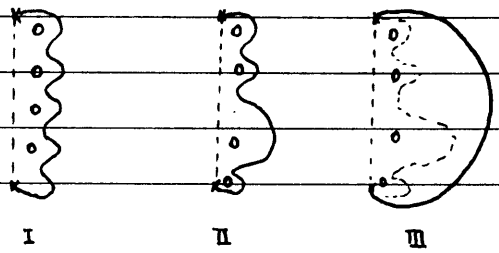
مشهورترین جایی که این پدیده مشاهده می‌شود در فولاد کم کربن است وقتی منحنی تنش کرنش این فولاد کم کربن را رسم کنیم در یک نقطه یک افت تنش شدید داریم و بعد در منطقه‌ای تنش تقریباً ثابت می‌ماند و بعد دوباره منطقه پلاستیک شروع می‌شود. یعنی یک نقطه تسلیم خیلی خیلی مشخص دارد وقتی کربن و نیتروژن را با طریق حذف کنیم و آهن خالص داشته باشیم این پدیده برطرف می‌شود یعنی آهن خالص مثل الغلب فلزات که نقطه تسلیم نامشخص پیدا می‌کنند همینطوری رفتار می‌کند. اما وقتی چند PPm کربن و نیتروژن دارد آهن خالص کنیم این پدیده برقرار می‌شود یعنی پدیده حساس است به اتم‌های C و N.

اتم‌های C و N هر دو اتم‌های بین نشین هستند و شعاع اتمی کمتر از 1Å دارند و در آهن هر دو بین نشین می‌شوند اگر یک خط نابجایی را در نظر بگیریم:



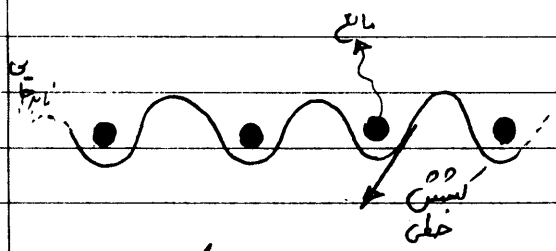
اتم بین نشین یک عیب نقطه‌ای است و در اطراف خودش یک برش الاستیک بوجود می‌آورد و یک تنش موضعی ایجاد می‌شود. می‌دانیم در دست زیر خط نابجایی یک منطقه انبساط وجود دارد یعنی فاصله اتم‌ها کمی بیشتر از فاصله عادی اتم‌ها است. پس اگر اتم کربن یا N در قسمت زیر خط نابجایی قرار گیرد انرژی تعادل نسبی برخوردار خواهد بود چون تنش زیادی ایجاد خواهد کرد. بنابراین وقتی اتم‌های C یا N به این محل یک حدت کاهش انرژی و کم شدن تنش داخلی دارد پس اتم‌های C و N یک نیروی جاذبه قوی با این منطقه از نابجایی خود دارد. اتم‌های C و N تحرک زیادی دارند چون کوچک هستند پس بالنسبت زمان همه اتم‌های N و C می‌روند زیر خط نابجایی قرار می‌گیرند و بهترین حالت‌ها را اشغال می‌کنند و دیگر فضای برای نابجایی برای حرکت نابجایی‌ها نمی‌ماند حرکت نابجایی‌ها با خیل می‌شود. زیرا اتم‌های بین نشین با نابجایی‌ها دیگر تعادل نسبی و انرژی پایین‌تری می‌گیرند. اگر بخواهیم نابجایی‌ها حرکت دهیم باید انرژی زیادی صرف کنیم. زیرا اتم‌ها از حالت تعادل خارج می‌کنیم. پس نابجایی نیروی بیشتری از حالت عادی خود لازم دارد تا بتواند حرکت کند. پس تنش تسلیم بالا می‌رود چون نابجایی‌ها دیگر نمی‌توانند حرکت کنند تسلیم شروع می‌شود. اما از طرفی این قفل‌ها، قفل‌های سختی نیستند یعنی نابجایی می‌تواند آن‌ها را کنده شود. قفل سخت قفلی است که نابجایی نمی‌تواند آن‌ها را کنده شود مثل اتم‌های نابجایی، اما این قفل‌های نرم هستند یعنی نابجایی می‌تواند با صرف تنش بیشتر از آن‌ها کنده شود.

اگر نابجایی بتواند از بین عیب‌ها کنده شود. دوباره خط از همه عیب‌ها کنده می‌شود (قفل III).

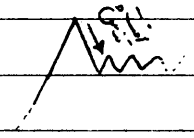


s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



نابجایی وقتی سد راه مانع قرار گیرد طول آن زیاد می‌شود
وقتی طول نابجایی زیاد شد تنشی عمل از اثر طول
یعنی کشش خلی زیاد می‌شود مقدار کشش خلی تنش
طول نابجایی دارد هرچقدر طول نابجایی بیشتر شود
چون انرژی بیشتری می‌شود کشش خلی هم بیشتر می‌شود
این نیرو در جهت تنش می‌شود نابجایی را جلو می‌برد. اگر تصادفاً هیچ‌کدام از نابجایی‌ها از این عیب‌ها گیر نکرده باشد. طول
آن به طور ناگهانی خیلی زیاد می‌شود وقتی طول زیاد شود انرژی آن افزایش می‌یابد بنابراین باید انرژی بالا تا صدها اتم‌های
دیگر را هم کنده می‌شود چون نیروی خیلی زیادی داد نتیجه این امر افت تنش است.

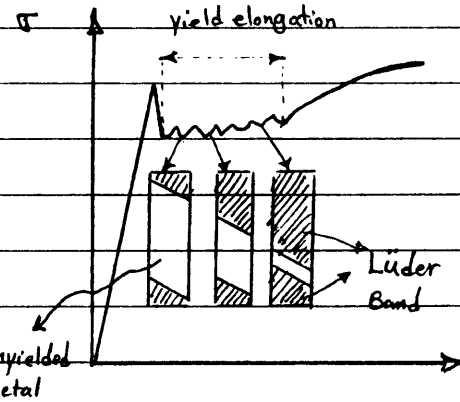


چون نابجایی شروع به حرکت می‌کند و نیروی لازم برای حرکت آن ناگهان کم می‌شود چون
زنجیر پاره شده. به این پدیده بهمن "Avalanche" می‌گویند یعنی وقتی شروع شد
به طور ناگهان می‌آید.

سد نابجایی‌ها با تراکم زیاد تنش را تا تعداد اتم‌های N_c تحمل می‌شوند برای حرکت نابجایی نیاز به تنش بیشتری هستیم
و افزایش تنش در دیاگرام $\sigma - \varepsilon$ به علت وجود اتم‌های N_c است. وقتی اعمال تنش بیشتر نابجایی از این
اتمسفرها شروع به حرکت می‌کند چون حرکت آن نیاز به نیروی کمتری است.

۸۴/۸/۱۵ «جلسه دوازدهم»

فرض پدیده تنش تسلیم در فولادهای کم کربن به علت وجود اتم‌های بین نشین C و N است.
در منطقه‌ای غیر همگون یعنی کشش در نواحی دارای تنش مرکزی، تنش تقریباً نزدیک
می‌شود این منطقه برخلاف از حالت الاستیک بیلاستیک است. در این منطقه
برخی از دسته‌ها تغییر شکل پلاستیکی را می‌شنوند و برخی هستند ها هنوز
تغییر شکل نیافته‌اند. ناحیه‌های تغییر شکل یافته را ناحیه‌های لودر می‌نامند
نمونه‌ها تا ناحیه‌های مورد نظر تغییر شکل همگون است. در این
حالت تمام نمونه تسلیم شده و تغییر شکل یافته یعنی این نابجایی‌ها در سراسر نمونه
توزیع شده و جای‌های تغییر شکل نیافته در منطقه همگون تغییر
شکل برخی بود یعنی کشش در قسمت‌های نمونه تسلیم نشده
و تغییر شکل نیافته بود. این نابجایی‌ها را "Lüder" می‌نامند. این نابجایی‌ها معمولاً زاویه $45°$ می‌سازند چون در $45°$ تنش MAX است

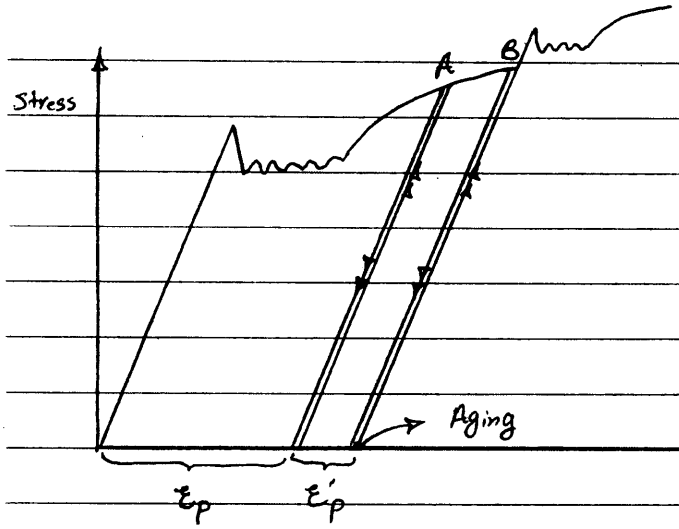


یعنی در واقع نابجایی‌ها جاهایی هستند که نابجایی‌ها از اتمسفرهای C و N رها شده‌اند و تغییر شکل یافته‌اند. یعنی وقتی
منطقه همگون می‌رسیم تمام نابجایی‌ها تغییر شکل اولیه را انجام داده‌اند و از اتمسفرهای N و C رها شده‌اند.
پس برای برخی از آلیاژهای فولاد کم کربن این پدیده اتفاق می‌افتد. اثر تسلیم این پدیده در سرد کردن است.

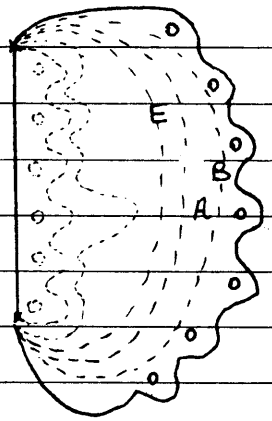
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

: Strain Aging



در نمونه فولادی کم کربن روی تست کشش تراز هیم
تا تغییر شکل ایجاد شود.
اگر در نقطه A تنش را حذف کنیم یک برگشت
الاستیک داریم و نقطه‌ای در تراز تغییر فرم پلاستیک
داریم یعنی کرنش الاستیکی که در A وجود داشت حذف
می‌شود. اگر مجدداً بدون هیچ گونه عملیات حرارتی
و بدون گذشت زمان، بارگذاری را شروع کنیم
همان نقطه تسلیم مشاهده می‌شود یعنی
وقتی به نقطه A رسیدیم ادامه همان منحنی تنش و کرنش تغییر نکرده و تنش تسلیم هم همان قبلی است. چون تغییر شکل الاستیک
بوده است. بنابراین یک منحنی عادی داریم. حالا اگر تنش را تا نقطه B پیش ببریم (مراحل مرحله قبلی) و سپس تنش را
حذف کنیم باز یک برگشت الاستیک داریم و یک تغییر شکل پلاستیک ε'_p هم تغییر فرم پلاستیک قبلی اضافه شده. یعنی کل تغییر
شکل پلاستیک برابر $\varepsilon_p + \varepsilon'_p$ خواهد بود. حالا که به تنش صفر رسیده‌ایم. نمونه را پس می‌گیریم، (Aging انجام می‌دهیم)
Aging می‌تواند طبیعی یا مصنوعی باشد. یعنی مثلاً می‌توانیم نمونه را یک هفته نگه داریم در انبار یا نمونه را با روش‌های متداول
مثلاً نمونه را در کوره با دمای 200° تا 500° نگه داری کنیم تا پیر شود.
حالا اگر دوباره بارگذاری کنیم این پدیده مجدداً تکرار می‌شود. یعنی مجدداً نقطه تسلیم ظهور خواهیم داشت
برای توجیه این مکانیزم، نابجایی‌ها را که در اثر تغییر فرم‌های حل نشده ترک داده بودند را نظر می‌گیریم
نقشه نابجایی‌ها را در اثر اتم‌های حل شونده قفل نرم می‌شود. وقتی یک مقدار تنش
برای جدا شدن یک کنش نابجایی از یک اتم حل شونده بریم، Avalanche
اتفاق می‌افتد و آن نابجایی از قید قیدها آزاد می‌شود و نابجایی شروع به
حرکت می‌کند. یعنی در نقطه تسلیم نابجایی‌های شود وی توانند حرکت عادی
خود را ادامه دهند. در نقطه A همه نابجایی‌ها آزاد شده‌اند و تغییر شکل ظهور
می‌شود. یعنی در همه قسمت‌های نمونه نابجایی‌ها همین اندازه حرکت کرده‌اند
(البته در اینجا نقطه یک نابجایی را بررسی می‌کنیم و سپس تعمیم می‌دهیم)



حالا در نقطه A اگر تنش را حذف کنیم نابجایی‌ها یک برگشت الاستیک دارند
و یک مقدار تغییر شکل پلاستیک هم داریم. حول نابجایی در حالت طبیعی چرخش ضد ساعتی
شده. حالا اگر بارگذاری کنیم از نقطه نابجایی‌ها براحتی حرکت الاستیک
و نقطه E (سرعت است) حالا همان چرخش در سر نابجایی حول دارد (چون بالا بارگذاری کردیم)
حرکت نابجایی از A تا E الاستیک است و سپس از نقطه A تا B الاستیک پلاستیک می‌رود (منبع 'Fromk-Read'
فعال شدن طول نابجایی و دانسیته نابجایی‌ها افزایش می‌یابد). حالا در نقطه B اگر تنش را حذف کنیم، مجدداً
یک برگشت الاستیک خواهیم داشت. حالا اگر نمونه را پس کنیم اتم‌های حل شده فرصت نفوذ به این نابجایی

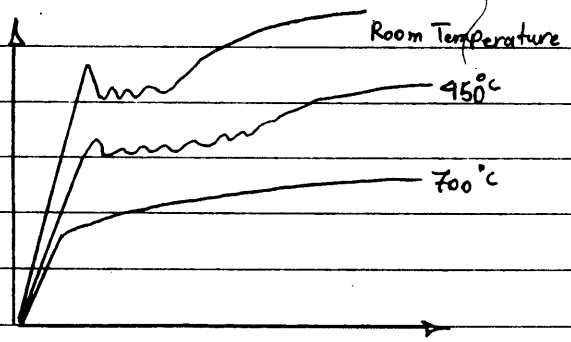
s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

یعنی در داخل نمونه حرکت می‌کنند و دوباره در خلأ نابجایی‌ها می‌توانند بیایند یعنی جای خالی که اتم‌ها می‌گذارند.
بنابراین پدیده Aging ضعیف‌تر می‌شود یعنی اتم‌های C و N می‌روند. حالا اگر شروع به بارگذاری کنیم همان پدیده تئوری می‌شود. یعنی دیگر طول نابجایی‌ها زیاد نمی‌شود و دانسیته آن‌ها افزایش نیافته اما باز هم نابجایی قفل شده. پس مجدداً تغییر شکل غیر صورتی داشته می‌کنیم.

پس وقتی که با تغییر شکل پلاستیک کار می‌دهیم و نمونه نرمیت می‌دهیم این پدیده‌ها حذف می‌کنیم، این پدیده قاطعی می‌تواند مزاحم باشد. مثلاً اگر بخواهیم بررسی آلیاژی کشش سرد انجام دهیم، اگر یک نقطه تغییر شکل زیاد داشته باشد می‌تواند خطرناک باشد چون ممکن است ترک بطور ناگهانی ایجاد شود. یعنی در طول کشش با Rate ثابت ممکن است ترک موضعی بوجود آید. برای اینکه این اتفاق نیافتد، کار می‌کنیم این است که استراتژ تغییر شکل پلاستیک می‌دهیم مثلاً نورد می‌کنیم که این پدیده‌ها از بین بروند تا عملیات کشش را انجام دهند. و این جهت نیز در تغییر شکل صورتی برای تمام جسم عمل می‌کند. پس با یک تغییر شکل اولیه می‌توانیم این پدیده‌ها حذف کنیم و کشش عمیق بدون خطر انجام شود.

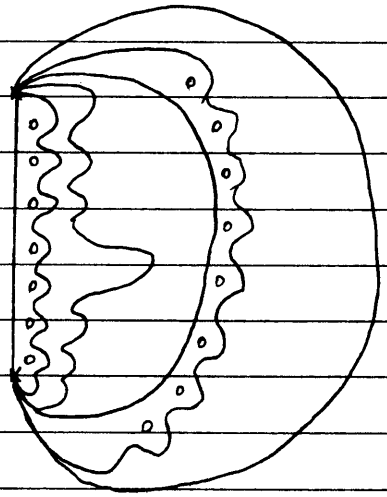
اگر آزمایش کشش را در دماهای مختلف انجام دهیم نمودارهای مختلفی خواهیم داشت



دماهای 950° این پدیده (منطقه تسلیم غیر صورتی) بیشتر نمایان می‌شود. اما دماهای بالاتر مثلاً 700° دیگر این پدیده نمایان نمی‌شود.

با دیسلوکیشن‌های نزدیک حرکت نابجایی که منجر به پدیده نقطه تسلیم می‌شود برخورد می‌کنیم.

در تغییر شکل‌های عادی سرعت حرکت نابجایی حدوداً نزدیک به سرعت صوت است. دماهای محیط حدوداً همین‌طور است اتم‌های C و N انرژی و قدرت کافی برای نفوذ در شبکه را ندارند یعنی وقتی نابجایی کنده شد این اتم‌ها آنجا هستند و جای خالی که اتم‌ها گذاشتند را پر می‌کنند. وقتی دما بالاتر می‌رود سرعت نفوذ اتم‌های C و N با سرعت حرکت نابجایی قابل مقایسه می‌شود بنابراین وقتی نابجایی حرکت می‌کند این اتم‌ها نزدیک آن قرار می‌گیرند و دوباره وقتی نابجایی حرکت کرد همین حرکت این اتم‌ها هم حرکت می‌کنند و در خلأ نابجایی قرار می‌گیرند.



در واقع سیل تحرک در این پدیده دخالت می‌کند پس این پدیده طولانی‌تر می‌شود. ضمناً چون دما بالاتر است قفل نابجایی کم می‌شود حالت قبل ستحکم‌تر است و راحت‌تر نابجایی‌ها حرکت می‌کنند. در حالت سوم وقتی دما خیلی بالا می‌رود انرژی حرارتی بیشتر می‌شود و نابجایی‌ها می‌توانند به راحتی از موانع عبور کنند. در واقع انرژی حرارتی باعث شده که انرژی تنش نیز کم شود.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

از فعل می شود. این حرکت نابجایی ها باعث حرکت بیشتر و بیشتر این نابجایی ها شده و تغییر شکل پلاستیک ایجاد می شود. یعنی انرژی تغییر شکل هست که نابجایی ها می توانند با خود اتم ها حرکت کنند

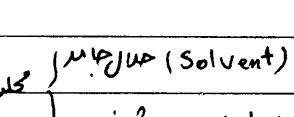
سخت شدن در اثر محلول جامد:

"Solid solution strengthening"

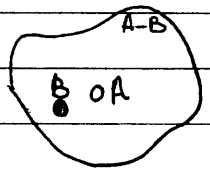
محلول جامد از یک حلال و یک حل شونده تشکیل شده. در محلول جامد هم حلال، هم حل شونده هر دو جامد هستند. محلول جامد از جابجایی اتم های حل شونده در شبکه اتم های حلال می توانند بوجود آید (جابجایی) و یا اتم های حل شونده در شبکه حلال بین شبکه ای شوند (بین نشینی).

محلول جامد { حلال جامد (Solvent) / حل شونده جامد (Solute) }

مثلا اتم های مس می توانند در Al جانشین شوند و محلول جامد جابجایی بوجود آورد. محلول جامد هم داریم که بصورت بین نشینی و جانشینی. می دانیم هر دو عنصر یک شعاع اتمی خاص دارند که هم حل می شوند یعنی هیچ وقت یکی از عناصر بطور کامل در هم حل نیستند.



در شکل محلول جامد بصورت هم دارد. مثلا Al-Cu می توانیم بگوییم Solid solution (Al-Cu) می توانیم بگوییم یا بصورت Al_2Cu داشته باشیم. یعنی اتم های Cu شما هم جمع می شوند و بصورت مس بوجود می آورند. حالا می خواهیم بررسی کنیم چه زمان محلول جامد تشکیل می شود و چه زمان نمی شود؟ تمام اتم ها تمایل به انرژی دارند. فرض کنید ما Al-Cu داریم بحالت مذاب این دو را هم محلول می خواهیم این مذاب را منجمد کنیم. فرض کنیم اولین اتمی که نشست مثلا اتم A باشد. اتم دومی که می خواهد بنشیند آن را دارد که ممکن است A باشد یا B باشد کدام ترجیح می دهد. بستگی به ترکیب مذاب دارد یعنی چند درصد A و چند درصد B داریم. مثلا اگر ترکیب ما Cu-%10 و Al-%90 باشد احتمال اتم Al شدن از کل ترکیب 90% احتمال اتم Cu شدن 10% است



← اگر احتمال نشستن اتم B کنار اتم A بیشتر از احتمال ترکیب آن باشد، محلول جامد تشکیل می شود

← اگر احتمال نشستن اتم B کنار اتم A کمتر از احتمال ترکیب آن باشد، رسوب تشکیل می شود

مثلا اگر احتمال نشستن اتم Cu کنار اتم Al خیلی بیشتر از 10% باشد محلول جامد بوجود می آید. در این شبکه اتم Cu ممکن است با یک اتم Cu دیگر بپیوندد یا با یک اتم Al، اتم های Al هم می توانند با Cu یا با خود Al پیوند دهند اگر پیوند A-A یا B-B (پیوندهای همجنس) قوی تر از A-B باشد، رسوب تشکیل می شود. چون پیوندهای A-A و B-B انرژی پایین تری دارند تا A-B.

اگر پیوند A-B قوی تر از A-A و B-B باشد، محلول جامد تشکیل می دهد چون در این حالت انرژی کمتر داریم. یعنی عمده احتمال ترکیب، انرژی پیوند هم یک فاکتور خیلی مهم در احتمال کل است.

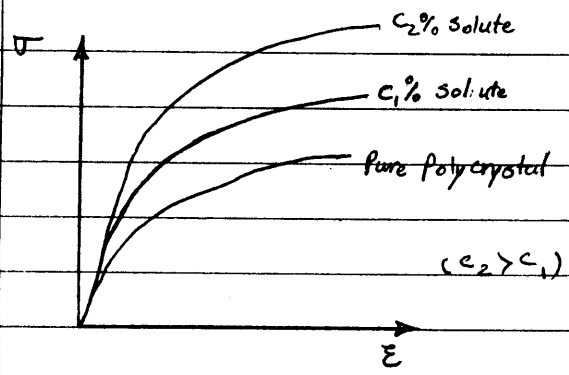
می خواهیم اثر محلول جامد در افزایش خواص مکانیکی را بررسی کنیم.

با اتم های بزرگ که در محلول جامد اثر دارد: یکسان بودن نوع شبکه، حلالیت کم شان - نزدیک بودن سایز اتم های اتمی خواص مشابهی

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

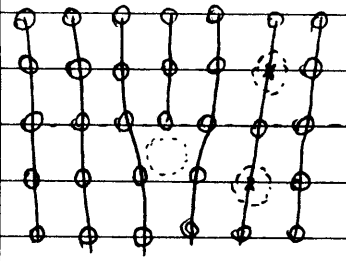


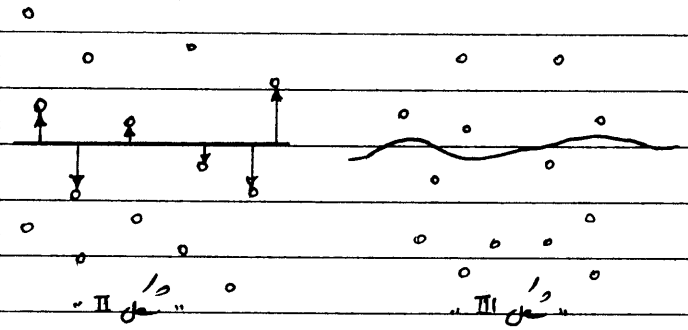
برای بررسی اثر محلول جانشینی بر روی استحکام به منحنی تنش-کرنش نگاه می‌کنیم. کلیات نیز خواص را از نظری بررسیم و محلول‌های جانشینی با درصد ترکیبی متفاوت را هم بررسی می‌کنیم

C_1 و C_2 درصد اتم‌های حل شده در Poly-crystal هستند و $C_2 > C_1$. یعنی وقتی درصد اتم‌های حل شونده بیشتر می‌شود، معمولاً منحنی تنش کرنش بالاتر می‌رود یعنی استحکام بیشتری می‌شود. مثلاً Al-Cu استحکام بیشتری نسبت به Al دارد. فرض می‌کنیم خط‌نابجایی نقطه‌ای در اتمسفر اتم‌های حل شونده قرار گرفته. اتم‌های حل شده نوع حرکت نابجایی هستند چون در اطراف خود میدان کرنش دارند.

اگر خط‌نابجایی را استاتیکی در نظر بگیریم (شکل II) برای بررسی هم کنش اتم با شکل (I) نگاه می‌کنیم. در اتم ناخالصی در شبکه با نابجایی یک واکنش دارد که این واکنش یا جاذبه است یا دافعه. این جاذبه یا دافعه بستگی به اندازه اتم ناخالصی و مکانی یا موقعیتی که خط‌نابجایی نزدیک می‌شود. مثلاً اگر اتم Mg را در نظر بگیریم چون شعاع اتمی Mg کوچکتر از Al است پس در اطراف اتم Mg یک منطقه انبساط وجود دارد. در زیر خط‌نابجایی هم یک منطقه انبساط وجود دارد چون فاصله‌ها بیشتر از حالت عادی است پس میدان الاستیک اتم Mg و خط‌نابجایی جهت (انبساط) هستند پس می‌توانند هم دیگر را جذب کنند یعنی دافعه دارند (برای اتم‌هایی که از بالای سطح لغزش نابجایی نزدیک می‌شوند). اما اتمی که از پایین سطح لغزش نزدیک می‌شود چون در بالای خط‌نابجایی یک منطقه انقباض وجود دارد (یعنی فضای اضافی تر آزاد تر است) لذا این اتمی که میدان الاستیک انبساطی دارد از پایین نزدیک شدن به منطقه انقباض را دوست دارد. پس جهت گشتاور نیروی است. بنابراین یک نیروی برایند جاذبه خواهد داشت. وقتی می‌گوییم اتم Mg با شعاع کوچکتر از شعاع Al اطراف خود میدان انبساطی دارد علت این است که اتم‌های اطراف همیشه سعی می‌کنند در محدوده اطراف جای اتم‌ها باز شود. اگر اتمی شعاع اتمی بزرگتر از شعاع اتم‌های زمینه را داشت آن‌ها هم فشرده می‌کنند بنابراین میدان اطراف آن اتم‌های زمینه هم نزدیکتر از حالت عادی هستند و می‌گوییم اتم حل شونده میدان انبساطی دارد.

پس اتم‌های حل شونده با نابجایی دافعه یا جاذبه دارند. در شکل II خط‌نابجایی لبه‌ای است. اتم‌های حل شونده که آن نیرو وارد می‌کنند و چون توزیع این اتم‌ها تصادفی است، احتمال اینکه اتم بالای خط‌نابجایی باشد با احتمال اینکه پایین آن باشد برابر است. بنابراین در این استوانه هیچ نیروی خالصی به نابجایی وارد نمی‌شود چون برآیند نیروها صفر است. پس بایستی است حرکت نابجایی را تا چه حد تر تصحیح کنیم. یعنی نابجایی بایستی است





s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

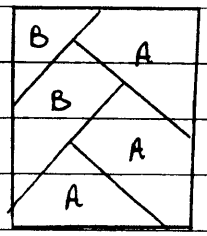
کند. روشهایی که واقعیت تری است. برای توجیه این مطلب می گوییم:
نابجایی ها تنش های حل نشونده در صورتی که خط شخصی نیست بلکه به صورت یک خط شخصی درمی آید (شکل III)
به صورتی که هر دو تنش بین نابجایی و اتم های ناخالصی Max شود. یعنی نابجایی طوری خم می شود که در Min انرژی
با اتم های حل شونده برخورد کند. بین یک تعادل نسبی بین نابجایی و اتم های حل شونده وجود دارد. حالا اگر نابجایی
حرکت کند از تعادل نسبی خارج می شود. پس انرژی بالاتری نیاز دارد یعنی تنش بیشتری نیاز داریم. در واقع محلول جامد
استحکام بیشتری از حالت خالص نیز دارد.

« جلسه سیزدهم » ۸۴ ، ۸ ، ۱۷

« تغییر شکل پلاستیک در جسم دوفازه »

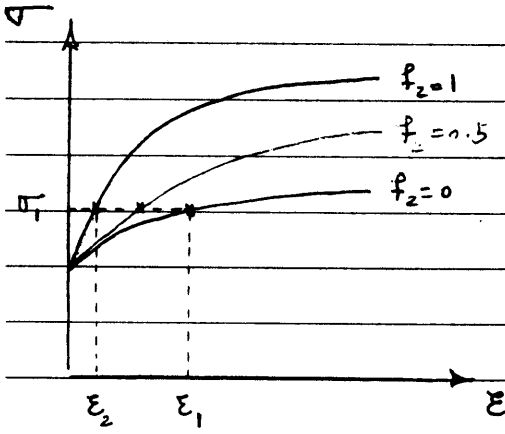
در مورد جسم دوفازه دو حالت را می توانیم در نظر بگیریم:
(۱) فاز دوم به صورت ذرات ریز در فاز اول تنش شده باشد (در سطح یا در سطح)
(۲) اندازه دانه های دو فاز با هم قابل مقایسه باشد (یعنی هر فازی برای خودش دانه بندی جدا داشته باشد)

ابتدا حالت (۲) را بحث می کنیم. فرض می کنیم جسم دوفازه داریم با فازهای A و B. می خواهیم ببینیم از جسم تک
تنش و تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته و آیا می توانیم روابطی برای منحنی تنش و کرنش بدست آوریم یا خیر
وقتی جنس جسمی تحت تنش σ قرار می دهیم و تغییر شکل ε داده می بینیم، میزان
تغییر شکل دو فاز با میزان شرکت دو فاز در تغییر شکل متفاوت با یکدیگر متفاوت دارد
مثل استحکام فازهای مختلف و توزیع فازهای مختلف، فصل مشترک فازهای مختلف
و اغلب اوقات از این پارامترها صرف نظر می کنند و فقط درصد حجمی فازهای موجود در نظر
می گیرند. یعنی تغییر شکل یک جسم دوفازه متأثر از درصد حجمی فازهای مختلف دارد. یعنی
وقتی تنش اعمال می کنیم، کرنش با نسبت درصد حجمی فازهای مختلف توزیع می شود.
با این تقریب می توانیم منحنی تنش کرنش یک جسم دوفازه را رسم کنیم.



ε و σ

حالت اول: توزیع تنش در هر دو فاز یکنواخت باشد:

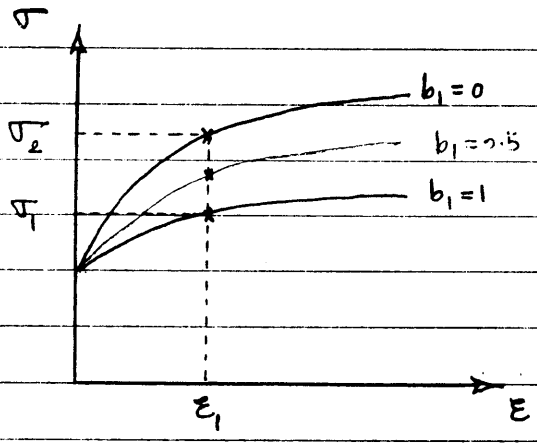


از جسم مانند دو فاز ۱ و ۲ تشکیل شده، منحنی تنش و کرنش را
برای دو حالت رسم می کنیم که یکی فقط فاز ۱ و دیگری فقط فاز ۲ را
شامل می شود. یعنی اگر درصد فاز ۱ را f_1 و درصد فاز دوم را f_2
بنامیم، دو منحنی $f_2=0$ و $f_2=1$ را رسم می کنیم. حالا اگر بخواهیم
از دو فاز به صورت مخلوط داشته باشیم، منحنی تنش کرنش آن نمی تواند
خیلی از فاز ضعیف و قوی تر از فاز قوی تر باشد. یعنی همیشه

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

یک منحنی بین این دو منحنی خواهد بود. در اینجا فرض کردیم توزیع تنش یکنواخت است. یعنی از تعداد تنش σ_1 داریم نظر نظر هم، دو منحنی فازهای ε_1 و ε_2 و دو فاز ۱ کرنش ε_1 را خواهیم داشت. حال اگر یک ترکیب با درصد حجمی 50% فاز ۱ و 50% فاز ۲ داشته باشیم، یک آن بین ε_1 و ε_2 و در واقع در وسط آن‌ها خواهد بود (برای همان تنش ثابت σ_1) بنابراین کرنش برحسب درصد فازهای موجود توزیع می‌شود. چون تنش را یکنواخت در نظر گرفتیم.



حالت دوم: توزیع کرنش در هر دو فاز یکنواخت باشد:

در این صورت تنش بر حسب درصد حجمی فازها در هر دو توزیع خواهد شد. اگر منحنی تنش کرنش اشتراک دو منحنی برای تک فازهای ۱ و ۲ رسم کنیم. در یک کرنش ε_1، برای هر فاز اجتماع ۲ تنش‌های متفاوت σ_1 و σ_2 خواهیم داشت. اگر ترکیبی با درصد حجمی 50% - 50% اشغال کنیم برای همان تغییر شکل ε_1 تنش معادل میانگین σ_1 و σ_2 خواهد بود. یعنی می‌توانیم برای ترکیبات مختلف منحنی تنش کرنش را بر حسب درصد حجمی فازها رسم کنیم.

در حالت اول فرض کردیم توزیع تنش یکنواخت باشد این است که در تنش یک فاز اول اعمال می‌شود، همان تنش هم به فاز دوم اعمال می‌شود. یعنی میزان تنش در هر دو فاز یکسان است. در حالت دوم زمانی که میزان کرنش دو فاز یکسان باشد. یعنی وقتی به اندازه ε_1 تغییر شکل داده‌ایم، تنش فاز اول σ_1 و تنش فاز دوم σ_2 می‌شود. یعنی تنش‌هایی که اعمال کردیم، در فاز اول به صورت تنش مربوط σ_1 و در فاز دوم به صورت تنش مربوط σ_2 عمل می‌کند. مثلاً در این حالت می‌دانیم تنش‌هایی که اعمال کردیم حداقل به اندازه σ_2 بوده.

در واقع این دو حالت را هم جزء فرض‌هایی رسم کردیم، در عمل باید ببینیم کدام حالت حاکم است تا خواهد. البته توزیع تنش یکنواخت به واقعیت نزدیک‌تر می‌تواند باشد.

حالتی که فاز دوم به صورت ذرات ریز در فاز اول پخش شده:

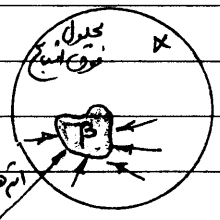
در اینجا شیب رسم سخت است. یعنی از ابتدا کار سخت‌تر اعمال می‌شود. باید بدانیم سرعت هم زمانی تأثیر می‌شود و اندازه‌گیری هم به چه صورت‌هایی است. چندین نکته خلاصه این است:

تأثیر سرعت در حالت تأثیر کاهش حالت داریم است. یعنی اول معرفی حالت تأثیر می‌شود. یعنی اگر یک جسم دوفازه را در نظر بگیریم اولین چیزی که تأثیر محلول جامد است سرعت وقتی تأثیر می‌شود که محلول جامد حالت اشباع خود شده باشد. مثلاً اگر آلیاژ Al و Cu را در نظر بگیریم. درصدهای مختلف Cu در Al حدود 2% محلول است. حالا اگر میزان Cu بیشتر از 2% باشد. علاوه بر محلول جامد، ذرات‌هایی Cu با یک نیاز دوفازی به صورت درصدهای بالاتر هم بودیم، نیازهای حضور محلول جامد می‌زاید در آن دما محلول جامد تأثیر می‌شود. اما وقتی از آن عبور کنیم سرعت تأثیر می‌شود. یعنی سرعت حالت دوم است ولی محلول جامد اشباع بالاتر از اشباع

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

بوجود می‌آید. فوق اشباع یعنی آن است که تعداد اتم‌های حل شده بیشتر از حد مجاز آن در دما باشد. پس اتم‌های اضافی حل شده باید به صورت رسوب جدا شوند. بنابراین در داخل فاز α رسوب β تشکیل می‌شود. این مسئله از لحاظ انرژی قابل توجیه است. یعنی وقتی از حد مجاز حلالیت بلورهم انرژی افزایش می‌یابد تشکیل رسوب موجب کاهش انرژی است. حالا می‌خواهیم ببینیم با تشکیل رسوب چه اتفاقی می‌افتد.



تشکیل رسوب
- کاهش انرژی متناسب با حجم رسوب
- افزایش انرژی متناسب با سطح خارجی رسوب (سطح بین فاز اصلی و رسوب)

وقتی اتم‌ها تجمع می‌کنند و رسوب درشت می‌شود، حجم محلول در حالت فوق اشباع خارج می‌شود پس یک کاهش انرژی داریم. این کاهش انرژی برای این است اتم‌های مازاد در حد حلالیت جدا می‌شوند. حتی با این کاهش انرژی متناسب با تعداد اتم‌های جدا شده خواهد بود. هر چه اتم‌های اشباع بیشتری جدا شوند انرژی بیشتر کاهش می‌یابد. حجم تعادل مزدیک‌تر می‌شویم. تعداد اتم‌ها را می‌توان با فاکتور حجم رسوب بیان کرد. پس این کاهش انرژی متناسب با حجم رسوب خواهد شد. وقتی به بررسی حد مجاز حلالیت در دمای T_1 می‌پردازیم یعنی Min انرژی و حداکثر تعادل در این حالت است.

حالا که رسوب β در داخل فاز α تشکیل شد. اتفاق دیگری که می‌افتد این است یک قسمت مشترک بین دو فاز α و β از بین می‌رود. این قسمت مشترک حجم جدا شده بین دو فاز است و این انرژی به سیستم اضافه می‌شود. این انرژی یک انرژی سطحی است. پس یک افزایش انرژی متناسب با سطح خارجی رسوب است، یعنی سطحی از رسوب که در داخل فاز زمینه قرار می‌گیرد. شعاع رسوب کروی با این سطح $4\pi r^2$ خواهد بود. از طرفی کاهش انرژی متناسب با r^3 خواهد بود. یعنی همین موضوع که هر اتم شعاع داشتم یعنی وقتی یک جدا شدن اتم‌ها تشکیل آن یک کاهش انرژی متناسب حجم جدا شده (r^3) به وجود می‌آید. مشاهده می‌شود حجم جدا شده سریعتر از سطح جدا شده بود. پس یک افزایش انرژی متناسب سطح قسمت جدا شده نیز بوجود می‌آید. این انرژی دو یک جایی با تعادل می‌رسیم که شعاع بحرانی جدا شدن را بدست می‌آوریم.

در اینجا هم یک کاهش انرژی متناسب با r^3 و افزایش انرژی متناسب با r^2 داریم (انرژی رسوب، انرژی یک شعاع R_c این انرژی optimum می‌شود. یعنی اندازه رسوب در حالت تعادل نمی‌خواهد بود این R_c شعاع بحرانی نام دارد. و هر دمایی R_c مقاومت خواهد بود. یعنی شعاع رسوب تشکیل شده از R_c خواهد کرد. بنابراین در یک محلول جامد اشباع، شعاع بحرانی (در دمای) رسوب با اندازه‌های مختلف بوجود خواهد آمد. در هر دمایی ممکن است رسوب‌هایی بزرگتر یا کوچکتر از اندازه تعادلی وجود داشته باشند اما رسوب‌هایی که اندازه آن‌ها تعادل یا اندازه‌ای است که از بوجود آوردن انرژی سطح optimum کند.

شکل رسوب تشکیل شده در قسمت‌های مختلف دارد. بهترین آن فاز رسوب است یعنی در هر فازی رسوب شکل خاصی دارد مثلاً یک فاز در یک صفحه crystalog بشکل مکعب و فاز دیگری در صفحات دیگر بشکل دیگر است.

مثالی که در اینجا در نظر گرفتیم مثال آلیاژ Al است. هر چند حالت‌های مختلفی از تشکیل رسوب در دماهای مختلف بررسی می‌کنیم.

s.a.m

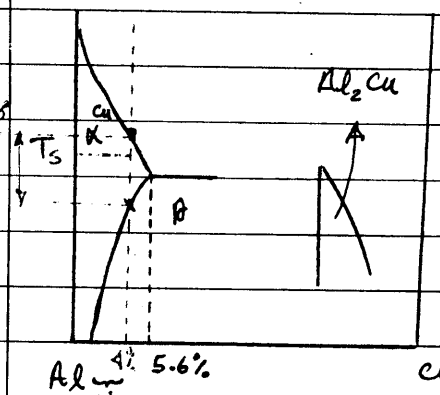
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

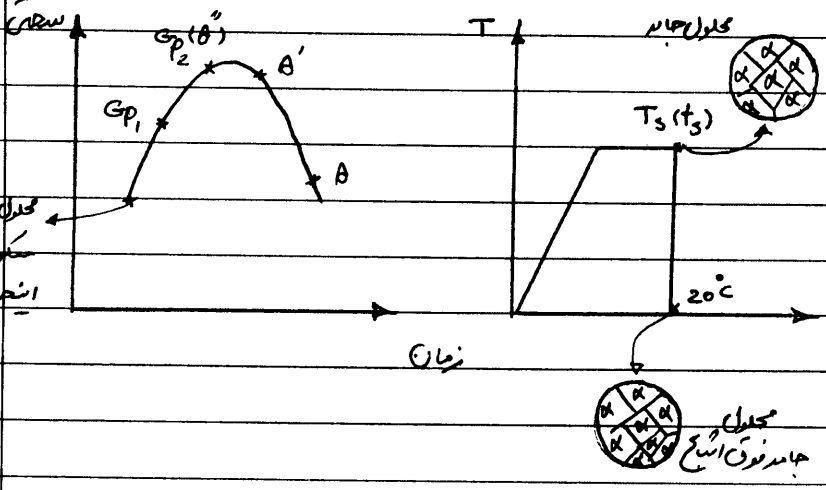
آلیاژ Al-Cu

منحنی تعادلی این آلیاژ در بعضی از قسمت ها به این صورت است:

فاز α^{Cu} فاز محلول جامد مس در Al است. در قسمت دیگری هم یک فاز مس مزدوج Al_2Cu.

در قسمتی که فاز α داریم اگر آن را هر سوی این صورت تعادلی تشکیل شود این روند باید Al_2Cu تشکیل شود در قسمت دیگری از نمودار بین فازی Al_2Cu داریم. اما در دماهای مختلف Al_2Cu تشکیل نمی شود، ممکن است در بعضی دماها تشکیل شود. یعنی اگر بخواهی سطحی برحسب زمان سرد شدن را رسم کنیم فازهای θ، θ'، θ'' (G_{P_2}، G_{P_1}) تشکیل می شوند یعنی برحسب زمان سرد شدن فازهای مختلف بوجود می آید پس چون نمودار برحسب زمان سرد شدن رسم شده و ما می توانیم ثابت باشد. یعنی دماها ثابت نگه داریم و انرژی یا آنتروپی را برحسب زمان بدهیم تا نمودارهای دماهای مختلف جسم مشتق شود.





یعنی در دماهای T_1، T_2، T_3، T_4 این فازها بوجود می آید.

یعنی انرژی یا آنتروپی تغییرات دما مشتق گیریم یعنی در دمای T_1 یا T_2 و... نرخ سرد شدن یا انرژی یا آنتروپی را بازمان مشتق گیریم. مثلاً در دمای 20 درجه در دمای T_3 یا یک دمای دیگر دماهای T_4 و... این گونه این است که برخی از دماها به تعادل نمی رسیم یعنی فازهای تعادلی بوجود نمی آید. یعنی شاید دماهایی وجود دارند که در آن دماها فازهای θ' و θ'' تشکیل نمی شوند یعنی زمان کم است می شود. پس باید دمایی را برای استقال انرژی انتخاب کنیم طوری باشد فازهای θ' و θ'' تشکیل نشوند. بنابراین بهتر آن است که برای استقال انرژی، دماهای مختلف انتخاب کنیم مثلاً برای G_{P_1} یک دما برای G_{P_2} یک دما برای θ یک دما و برای θ' هم یک دما. چون اگر زمان کافی را در نظر اعمال کنیم، اگر دمایی را انتخاب کنیم خیلی بالا باشد فازهای مثل G_{P_1} خیلی سریع تشکیل می شوند که شاید برای ما قابل رویت نباشد اگر دما خیلی پایین باشد هم ممکن است فاز تعادلی نیست. به هر صورت روند کلی تغییرات انرژی به این صورت است که G_{P_1} است چون محلول جامد دارد، G_{P_2} سطح بالاتر از G_{P_1} دارد و از θ' شروع به کاهش می کند یعنی θ است چون بیشتر پایدار دارد. من آمده ام در نظر گرفتم تا شاید زمان کافی در نظر گرفتیم. برای اینکه چنین آزمایشی در نظر بگیریم. آلیاژی Al با یک درصد Cu در نظر گرفتیم. این آلیاژ را در دماهای T_S

s.a.m

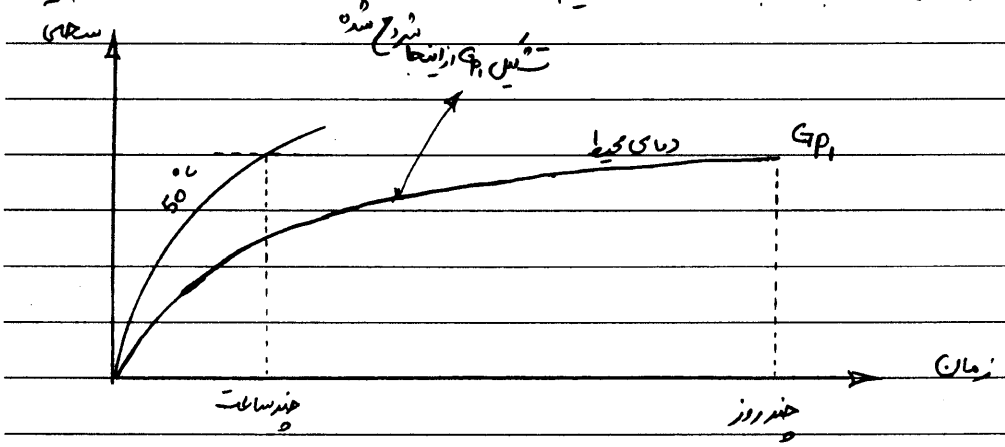
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

$T_{solution}$ برسیم. دمای محلول جامد تبدیل می‌شود. حال وارد محدوده α شده‌ایم. این فرایند تا زمانی ادامه خواهد یافت که محلول جامد به ۹۹٪ برسد. دمای T_S خواهیم داشت. اما باید دقت کرد که محدوده دمایی که آلیاژ ۹۹٪ آن محلول جامد است خیلی محدود است. و هر چه سرعت سرد کردن بالا برود این محدوده کمتر از نقطه پایین‌تر شده و ما عملاً حاصل نمی‌شود و جامد شکل می‌گیرد. بنابراین حداکثر باید خیلی دقیق باشد (دمایی که انتخاب می‌کنیم) حداکثر زمانی که باید نمونه در آن دما نگه داشته شود تا عملیات حل‌سازی بطور کامل انجام شود (همه قسمت‌های نمونه آن دما برسند)

وقتی نمونه را وارد کوره می‌کنیم زمان t_0 و دمای T_S شروع عملیات حل‌سازی بطور کامل انجام شد مطابق دیاگرام T_S نمونه را Quench می‌کنیم تا دمای محیط $20^\circ C$ برسد. قبل از Quench کردن نمونه از محلول جامد نگه‌داشت داریم که زمان هیچ رسوبی وجود ندارد. وقتی Quench می‌کنیم ساختار همان ترکیب را داریم یعنی محلول جامد فوق اشباع که هنوز فرصت رسوب نکرده تفاوت فوق این است که قبل Quench حالت اشباع نداریم اما بعد Quench به اینجا می‌رسیم یا حالت تعادل شخص شده ولی فوق اشباع داریم که اضافی است. شکل زیر محل قرارگیری خط دیاگرام با حدود فوق ۲٪ به شکل $4-2=2\%$ اضافی داریم.

محلول اضافی فوق اشباع باید رسوب کند. در محلول‌های پایه وقتی از رسوب صحبت می‌کنیم منظور تشکیل فاز است یعنی اتم‌های اضافی تشکیل می‌شوند به صورتی که در نهایی محلول جامد داریم را اصلاً نمی‌خواهیم تشکیل شود کلمه رسوب محلول جامد جدا شدن فاز دوم از فاز اول را رسوب می‌نامیم.

حال اگر این نمونه Quench شده را در دمای محیط نگه داریم تمرینات خواص G_{P_1} می‌رسیم و بعد از آن به سختی بیشتری دست خواهیم یافت. یعنی اگر سختی را بر حسب زمان رسم کنیم:



در دمای محیط پس از گذشت چند روز به خواص G_{P_1} خواهیم رسید و بعد از آن هر چقدر زمان بگذرد به فازهای دیگری نمی‌رسیم چون انرژی به حد کافی وجود ندارد. پس از گذشت چند روز سختی به MAX مقدار خودش می‌رسد. البته تشکیل فاز G_{P_1} زودتر شروع شده اما بعد از چند روز به MAX می‌رسد.

اما اگر نمونه Quench شده را در دمای بالاتری نگهداری کنیم، در زمان زودتری به سختی G_{P_1} می‌رسیم. مثلاً اگر در دمای $50^\circ C$ نگهداری کنیم در زمان چند ساعت به MAX سختی G_{P_1} می‌رسیم یعنی هر چه دما زیاد شود زمان رسیدن به فازهای مختلف کمتر خواهد بود.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در آلیاژ Al-Cu : محلول جامد فوق اشباع $\rightarrow \theta_1 \rightarrow \theta_2 (\theta'') \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$

برای این کار می‌توانیم

از محلول جامد فوق اشباع این فازها را به دست آوریم با پیرسازی مقدار فازها را تغییر دهیم. یعنی به محدوده دمایی استحاله نسبی فازها بتوانیم آن را رصد و با تغییر زمان پیرسازی، قدرت زیان فازهای مختلف را به دست آوریم.

برای انجام این ترتیب عمل می‌کنیم:

5 نمونه آلومینیوم با 4% مس تهیه می‌کنیم

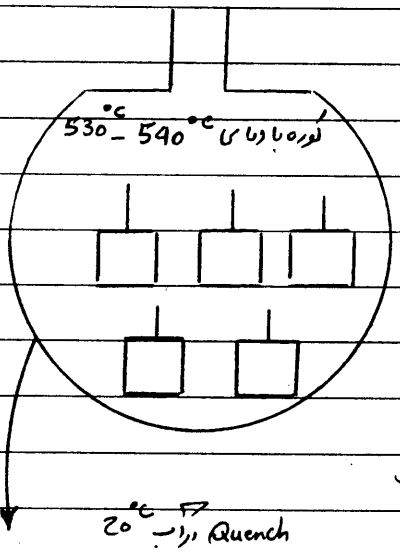
این 5 نمونه را درون کوره با دمای 530°C الی 540°C قرار می‌دهیم

که البته این دما بستگی به ابعاد نمونه‌ها دارد و هر چه نمونه ضخیم‌تر باشد مدت زمان بیشتری تحت اثر قرار گیرد در این دما باقی خواهد ماند.

در این صورت تمام نمونه‌ها تبدیل به محلول جامد فوق اشباع می‌شوند

حال تمام این نمونه‌ها را Quench می‌کنیم و به دمای 20°C می‌رسانیم

هر 5 نمونه تبدیل به محلول جامد فوق اشباع می‌شوند



- نمونه اول را بلافاصله تحت آزمایش سختی قرار می‌دهیم این آزمایش می‌تواند آزمایش کشش باشد که سختی مربوط به محلول جامد فوق اشباع را خواهد داد.

- نمونه دوم را به دمای 50°C می‌بریم و مدت 20 تا 30 دقیقه نگه می‌داریم سپس مجدداً Quench می‌کنیم و سختی آن را اندازه می‌گیریم.

- نمونه سوم را به دمای 100°C تا 200°C می‌بریم و مدتی نگهداری می‌کنیم سپس مجدداً Quench می‌کنیم و تست کشش قرار می‌دهیم

- نمونه چهارم را بین 200°C تا 300°C حرارت می‌دهیم، Quench کرده و تست کشش قرار می‌دهیم

- نمونه پنجم را بین 400°C تا 450°C حرارت می‌دهیم، Quench می‌کنیم و سختی آن را می‌سنجیم

نتایج این آزمایش‌ها را در جدول زیر می‌بینیم:

نمونه	①	②	③	④	⑤
دما	بلافاصله (20°C)	50°C	100 - 200	200 - 300	400 - 500°C
ساختار	محلول جامد فوق اشباع	θ_1	θ_2	θ'	θ

چون زمان در این آزمایش اهمیت دارد

وقتی نمونه‌ها را به دمای مورد نظر می‌بریم Quench می‌کنیم و بلافاصله تست آزمایش سختی قرار می‌دهیم تا سریع سرد شود.

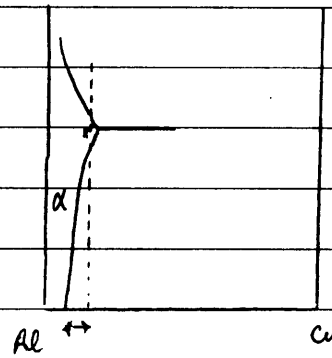
در اینجا Quench کردن تأثیری بر روی ساختار ندارد چون نمونه شمش فولادی است که آهسته سرد می‌شود. البته شمش بزرگ هم وجود دارد که آهسته سرد می‌شود. البته شمش Al را هم در حین ریخته‌گری Quench می‌کنیم ولی آن تنش کم می‌شود و در اینجا ساختارها تغییر نمی‌کند

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

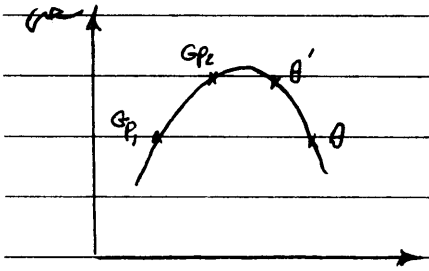
۸۴/۸/۲۲ «جلسه چهاردهم»

«رسوب سختی آلیاژ Al-Cu»



نسبت Al-Cu در منطقه α محدوده‌ای مشخص را Quench کنیم تا دمای محیط یک محلول جامد فوق اشباع خواهیم داشت. یعنی به شدت اتم‌ها مشخص شده به دومین دیاگرام رسوب خواهیم داشت. محلول جامد فوق اشباع برای رسیدن به فاز تعادلی θ از مراحل زیر عبور می‌کند:

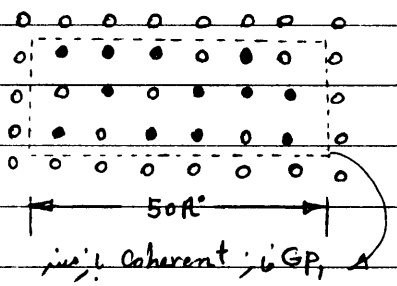
محلول جامد فوق اشباع ← GP_1 ← GP_2 (θ'') ← θ' ← θ



پس اثر این فازها را روی سختی بررسی خواهیم کرد.

برای اینکه این فازها را ببینیم 5 نمونه تهیه کردیم و نمونه‌ها را دمای 530°C حرارت دادیم پس Quench کردیم تا دمای محیط (20°C) و بعد از Quench برای سرعت رشد فازهای مختلف عملیات بازپخت انجام می‌دهیم و محدوده فازهای به دست می‌آوریم و سختی θ اندازه‌گیری می‌کنیم.

«فاز GP_1»



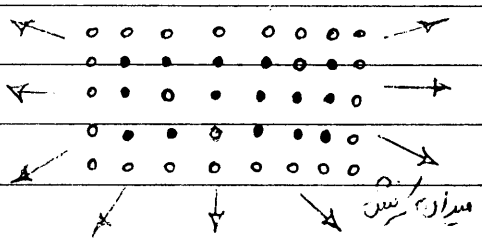
اولین فازی که از محلول جامد فوق اشباع به دست می‌آید GP است.

به این ترتیب که محلول جامد فوق اشباع را که در دمای محیط Quench کردیم حدود 50°C تا 100°C حرارت می‌دهیم و برای چند دقیقه این فاز به دست می‌آید.

فاز GP_1 فازی است که غنی از مس است.

ابعاد آن حدود 50Å است یعنی با میکروسکوب نوری قابل دیدن نیست.

این فاز بازپخت نمونه (Coherent) است. روی سطوح (100) بازپخت منسجم است. و فاز بازپخت نمونه است یک میدان کرنش اطراف فاز بوجود می‌آید. چون اتم‌های مس کمتر هم جا می‌شوند و کوچکتر از اتم‌های Al هستند می‌دانیم اتم‌های Cu و Al هم اندازه نیستند و در این حال سطوح بلوری با یکدیگر ارتباط خاصی پیدا می‌کنند و یک میدان کرنش در اطراف اتم‌ها فاز بوجود می‌آید که باعث تنش می‌شود.



رسوب‌ها موانع سختی برای حرکت نابجایی هستند تا یک حد نقطه‌ای. در محلول جامد فوق اشباع موانع حرکت نابجایی کمتر نقطه‌ای بودند اما دقت رسوب‌های با ابعاد حدود 50Å تا

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

می شوند یعنی دو صد صفحه اتم، این یک مانع سختی است در برابر حرکت نابجایی. پس به دو علت افزایش سختی داریم:

افزایش سختی ← پیوسته بودن با زمینه
← بر جود آمدن رسوب ها

پس دو منبع سختی برحسب زمان در دما ثابت محلول جامد فوق اشباع تا GP_1 افزایش سختی خواهیم داشت.

« فاز GP_2 »

نمونه ای که تهیه کرده ایم پس از Quench کردن بین 100°C تا 200°C عملیات پیر سختی را دهیم در این حالت فاز GP_2 تشکیل می گردد. البته زمان نگهداری در این دما بستگی به ابعاد نمونه دارد.

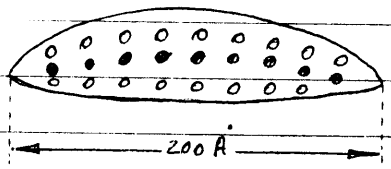
فاز GP_2 به شکل عدسی است و اتم های Al و Cu بصورت متناوب روی هم قرار گرفته اند.

ابعاد این فاز عرضاً 200Å است.

یعنی 4 برابر بزرگتر از رسوب GP_1 است.

این رسوب هم غنی از Cu است (نسبت به Cu wt%) البته بصورت لایه ای از Cu و Al است.

فاز GP_2 نسبت به GP_1 سختی بیشتری دارد. این رسوب هم پیوستگی ضدیت با زمینه حفظ می کند.



فاز GP_2 بصورت عدسی شکل

افزایش سختی ← پیوستگی رسوب با زمینه
← افزایش اندازه رسوب ها

یعنی با افزایش اندازه رسوب، سختی افزایش پیدا می کند چون حرکت نابجایی مشکل تر می شود. پس دیدیم دما بالا تر بردیم، سختی افزایش پیدا کرد

« فاز θ' »

نمونه سوم را دمای بالاتری بردیم. یعنی بازپشت با بین 200°C تا 300°C است. در این حالت فاز θ' بوجود می آید

- ابعاد فاز θ' خیلی بزرگ است. حدود 1000Å

- رسوب انسجام خود را با زمینه دارد. یعنی شبکه رسوب شروع به از دست دادن انسجام خود با زمینه می کند. در اینجا برخورد نابجایی با رسوب ها، سختی فاز θ' نسبت به فاز قبلی یعنی θ'' کاهش می یابد.

نتیجه می گیریم با بزرگ شدن رسوب ها، سختی افزایش پیدا کرد اما در اینجا با افزایش بیشتر اندازه رسوب ها سختی کاهش یافت. عملیات را بررسی می کنیم. آلیاژی که ما بررسی می کنیم حدود 4 تا 5% مس دارد

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

کاهش سختی
- فرورفتن رسوب‌ها
- افتادن فاصله بین رسوب‌ها (شروع از دست دادن انسجام)

در این حالت تعداد ذرات رسوب که رسوب می‌کند محدود است. مثلاً حجمی حدود 2 تا 3% آن، با توجه به نفوذ در با بزرگ شدن رسوب‌ها بزرگ شده و دیگر تعداد رسوب‌ها زیاد نیست.

چون تعداد اتم‌های Cu که با رسوب کنند محدود است،

اندازه رسوب ↓ تعداد رسوب ↑

پس هر چقدر اندازه رسوب بزرگتر شود، تعداد رسوب‌ها کمتر می‌شود. وقتی اندازه رسوب 50Å است تعداد رسوب‌ها خیلی بیشتر از حالتی است که اندازه رسوب‌ها 1000Å است. چون مقدار Cu رسوب کننده محدود است. بنابراین وقتی اندازه رسوب بزرگ‌تر می‌شود سختی آن رسوب بیشتر می‌شود، یعنی نابجایی‌ها مانع قوی‌تری در مقابل خود دارد اما تعداد رسوب‌ها هم در این سختی کل آلیاژ مهم است. اگر تعداد رسوبات زیاد باشد یعنی رسوب‌های ریز با تعداد زیاد و تقریباً فاصله‌های شبکه‌ای منظم کنند به طور کلی خواهد بود و راه حرکت نابجایی‌ها مانع ایجاد می‌کند یعنی تمام سطوح لغزش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، اما وقتی اندازه رسوب بزرگ شده باشد، تعداد رسوبات کم است بنابراین نابجایی‌ها می‌توانند بدون برخورد با رسوب‌ها از بین فاصله‌ها عبور کنند. پس درست است که هر رسوب به تنهایی یک مانع قوی است اما بعد جاهایی که بین رسوب‌ها وجود دارد.

فراموش نکنیم وقتی رسوب‌های درشت در شبکه موجود باشد سختی نسبت به حالتی که محلول جامد داریم قطعاً بیشتر است. وقتی می‌گوییم کاهش سختی در θ داریم منظورمان نسبت به فاز قبلی یعنی GP_2 است.

چون اندازه رسوب تا یک دوره‌ای رو به سختی دارد، پس یک نمودار سختی یک نقطه optimum می‌دهد (Max) و پس از آن سختی رو به کاهش می‌گذارد.

فازهای θ' و θ'' در دو طرف این Max قرار دارند. اگر عملیات حرارتی طوری باشد که استوایی θ'' شکل بگیرد یعنی فاز θ درشت سختی θ' کمتر از θ'' می‌شود.

«فاز θ»

اگر نمونه‌ها را در دمای 400°C تا 450°C پیر کنیم فاز θ شکل می‌گیرد. فاز θ یک فاز غیر پیوسته با زمینه است. ابعاد آن هم از فازهای قبلی بزرگتر است. حتی با میکروسکوپ نوری هم قابل رویت است. این فاز Al_2Cu است. معمولاً بدن مکان تعادل فاز θ در مرز دانه‌ها بیشتر تشکیل می‌شود. و سختی آن نسبت به فاز θ'' کم است. شبکه Al_2Cu با شبکه Al و Cu متفاوت است. ابعاد این فاز بزرگتر است و هیچ لزومی ندارد با زمینه هم‌راستا باشد. چون اندازه رسوب‌ها بزرگتر می‌شود تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد.

پس بررسی کردیم که در دماهای مختلف چه فازهایی شکل می‌گیرند از نظر تعادل ترمودینامیکی در دماهای هم فازی وجود دارد

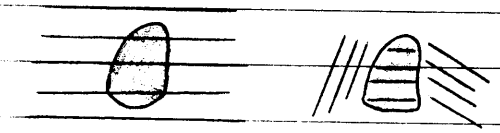
S.d.m
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اندازه برد ما را وقتی در نظر می‌گیریم و تأثیرات مادی سختی را هم بررسی می‌کنیم که بتواند، تعداد و اتصال بازتابنده تأثیرات مختلفی روی سختی آشکارگر داشته باشند.

بطور کلی هر پرتو که تابش می‌شود، سختی از آن کم می‌شود، سختی از دست رفته برابر است با سختی که نسبت به محلول جاذب (بدون پرتو) می‌رسیم یعنی محلول جاذب سختی اش از همه این فازها بیشتر است. وقتی پرتو تابش می‌شود فاز بازتابنده ما محلول جاذب است. پس سختی پرتو، سختی محلول جاذب را نشان می‌دهد.

سختی ایجاد شده توسط پرتو دست نخورده، سختی محلول جاذب است.

"واکنش ناجایی با پرتوهای مختلف"

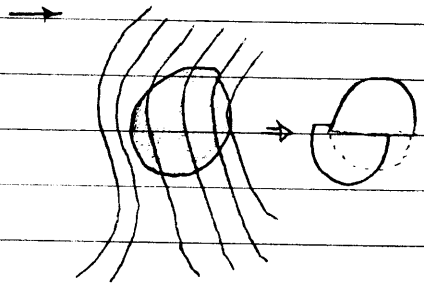


(1) پرتو پیوسته بازتابنده

(2) پرتو ناپیوسته بازتابنده

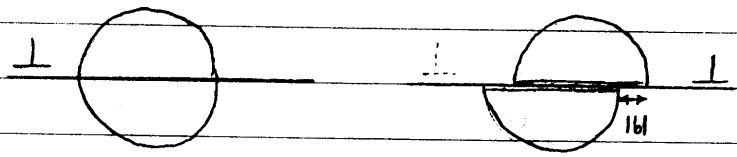
منظور از پرتو پیوسته این است که انرژی تمام موج‌های تابشی پرتو وجود دارد.
پرتو ناپیوسته بازتابنده هیچ انرژی من جنس تابشی نمی‌فرستد و پرتو وجود ندارد یعنی مثل یک مرز دانه عمل می‌کند. این حالت پیوسته سطوح و جهات بلوری شبکه را مشخص می‌کند.

(1) پرتو پیوسته بازتابنده:



وقتی پرتو پیوسته بازتابنده ناجایی می‌تواند از درون پرتو عبور کند چون سطح بلوری بازتابنده نیست این است. یعنی با تابش پرتو یک باریکه است و در اطراف آن میدان کرنش وجود دارد و ناجایی‌ها می‌توانند از درون آن عبور کنند. بنابراین ناجایی با یک زاویه‌ای از پرتو عبور می‌کند که این عبور می‌تواند سبب ناجایی پرتو شود (Cutting) یعنی کرنش ناجایی از درون پرتو در واقع برش پرتو است.

وقتی ناجایی حرکت می‌کند در واقع اتم‌ها جابجا می‌شوند حرکت ناجایی یعنی جابجایی اتم‌ها. پس وقتی ناجایی از درون پرتو عبور می‌کند اتم‌ها جابجا می‌شوند بنابراین



یک برش در پرتو بوجود می‌آید که این برش با اندازه بردار برگرز ناجایی است. این برش باعث پله روی سطح لغزش ایجاد می‌شود. حرکت ناجایی از داخل پرتو باعث تنش بیشتر می‌شود چون اولاً در اطراف پرتو یک میدان کرنش داریم یعنی حرکت در داخل پرتو را ناجایی مشکل‌تر از حرکت روی سطح لغزش در حالت عادی است پس از اشعه ناجایی عبور کرد، پرتو طوری پله ایجاد می‌شود که این یعنی از این سطح تنش پرتو بازتابنده (فصل مشترک) در واقع interface از بین می‌رود. فصل مشترک داخلی

s.a.m

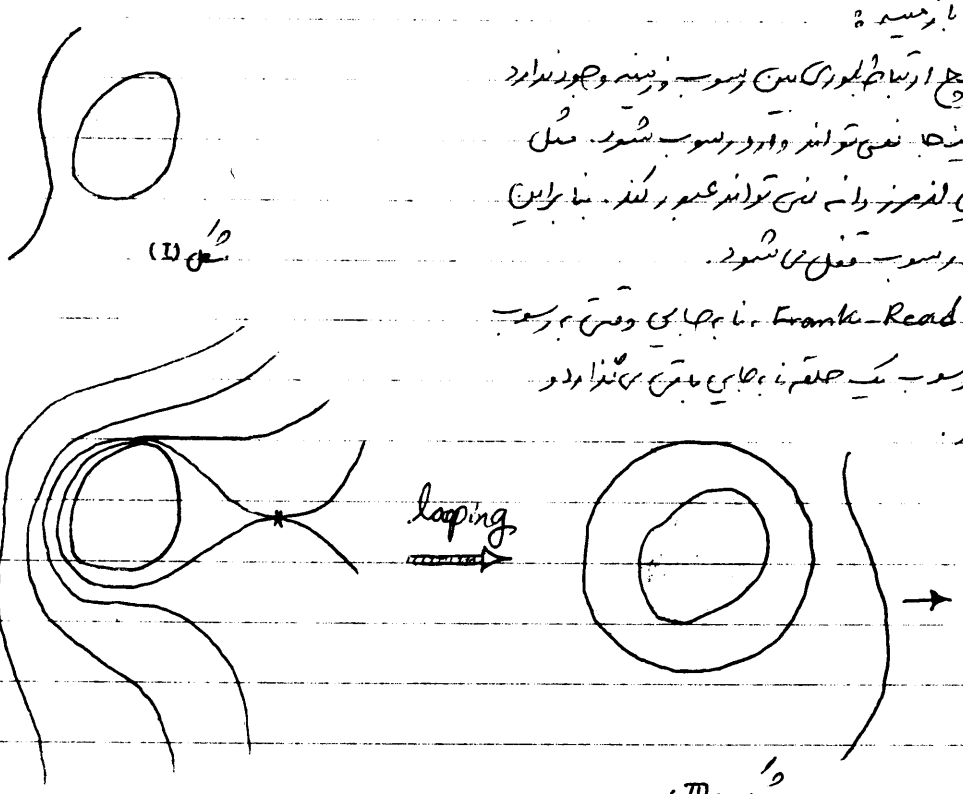
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

یک انرژی سطحی است. بنابراین برای رسوب یعنی افزایش سطح نقص شبکه و نهایتاً یعنی افزایش انرژی.
این افزایش انرژی یعنی رسوب به‌عنوان یک مانع عمل می‌کند چون عبور نابجایی از آن نیازمند تنش (انرژی) بیشتری است. پس سختی بالا می‌رود. پس واکنش رسوب با نابجایی باعث افزایش سختی می‌شود

(2) رسوب نابیوسیته بازنشونده:

در این صورت هیچ ارتباطی بین رسوب و زمینه وجود ندارد
پس نابجایی‌ها نمی‌توانند وارد رسوب شوند. مثل
مرز دانه: نابجایی‌ها نمی‌توانند عبور کنند. بنابراین
نابجایی‌ها اطراف رسوب قفل می‌شوند.

در اینجا مثل منابع Frank-Read نابجایی وقتی به رسوب
می‌رسد دو اطراف رسوب یک حلقه نابجایی بزرگ می‌گذارد و
خودش حرکت می‌کند:



شکل (I)

شکل (II)

شکل (III)

داخل

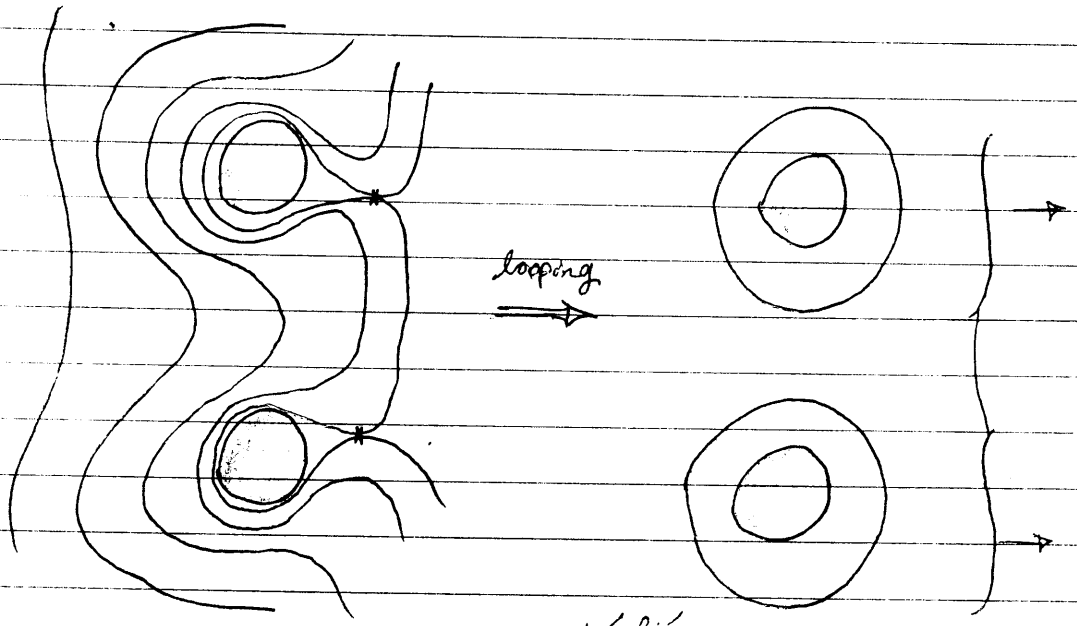
یعنی وقتی نابجایی به رسوب می‌رسد نمی‌تواند از آن عبور کند. بصورتی که در شکل مشخص شده نابجایی بصورت خواهیده
می‌شود. منتها همان نیروهایی که در منابع Frank-Read باعث حرکت آنها می‌شود که در نهایت نابجایی‌ها
هم بسته و در نقطه مشخص شده با هم ترکیب شوند و مجدداً رسوب باز شود، یک حلقه دور رسوب و یک نابجایی
که می‌تواند به حرکت خود ادامه دهد. یعنی نابجایی با جا گذاشتن یک حلقه نابجایی دور رسوب، از رسوب عبور می‌کند
یعنی نابجایی رسوب را دور می‌زند (looping). این نتیجه واکنش یک رسوب غیر برشته با زمینه و نابجایی، جا ماندن
یک حلقه نابجایی دور رسوب است. وجود یک حلقه نابجایی یعنی افزایش انرژی. در واقع آنها را از رسوب زدوده شده
چون نابجایی بیشتری که می‌رسد رسوب را نمی‌بیند بلکه حلقه نابجایی حول آن را می‌بیند نابجایی بیشتری برای
نمی‌تواند نیرو اعمال حلقه عبور کند چون با حلقه هم علامت است (منابع Frank Read شبیه سر آن وجود دارد)
پس تمام نابجایی‌هایی که بعدی می‌رسند آن هم علامتند پس یک دافعه وجود دارد. نتیجتاً نابجایی‌ها هم رسوب را
بزرگتر می‌بینند. پس باز زودتر فرار نابجایی، رسوب از فواصل بیشتری نابجایی بعدی را می‌بیند. یعنی شکل
عبور می‌کند. بنابراین افزایش سختی را اینها هم علت است.

زاویه گذشتن یک نابجایی از یک رسوب سختی رسوب را مشخص می‌کند.

S.J.M

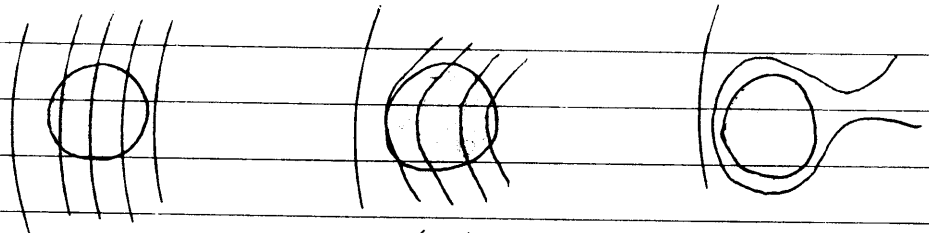
www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



(واکنش یک ناوچه‌ای با بورست)

اگر تقویت رسوب کم باشد ناوچه‌ای با جهان زاویه بزرگ‌تر از آن عبور می‌کند. اگر تقویت رسوب بیشتر باشد ناوچه‌ای با زاویه کوچک‌تر عبور می‌کند. یعنی زاویه عبور ناوچه‌ای از رسوب‌ها سخت رسوب با تقویت رسوب می‌توانند با این ترتیب مرا رسوب نپوسته یا زیست زاویه عبور ناوچه‌ای صفر است. اگر رسوب خوب انعطاف نرم باشد (رسوب پیوسته می‌توانند نرم باشد) در این صورت ناوچه‌ای با جهان زاویه ۱۸۰° از آن عبور می‌کند. اگر رسوب نپوسته کمی سخت باشد ناوچه‌ای با زاویه کمتر از ۱۸۰° عبور می‌کند. پس زاویه عبور ناوچه‌ای از رسوب بین صفر تا ۱۸۰° است برحسب تقویت رسوب. با این ترتیب رسوب‌های نپوسته سواحل موثرتری هستند تا رسوب‌های پیوسته. البته رسوب‌های پیوسته قدیم تقویت دارند. چون در حال رسوبی که درون محلول جامد شکل گرفته باعث افزایش انرژی است.



(زاویه بزرگ) (زاویه کوچک) (زاویه صفر (رسوب نپوسته))

نکته: افزایش تعداد رسوب‌های پیوسته باعث افزایش سختی نیست. بلکه دلیل افزایش سختی زیاد بودن تعداد رسوب‌های بزرگ بودن آن‌هاست.

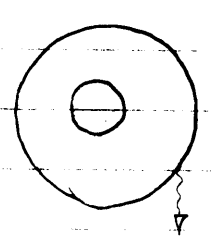
Orowan حلقه‌هایی که در اثر لغزش ناوچه‌ای حول یک رسوب ایجاد می‌شوند، «حلقه‌های لغزشی» یا «حلقه‌های» می‌شوند. این حلقه‌های لغزشی ناپایدارند و در اثر افزایش رسوب چندی دوام نمی‌آورند. ممکن است حلقه دیگری هم دور حلقه اول شکل بگیرد و یا ممکن است حلقه اول طی یک حرکتی از اطراف

s.a.m

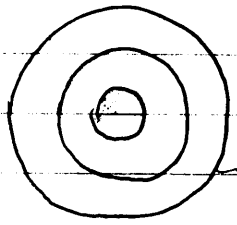
www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

رسوب دور شود.



حلقه Orowan



(ممکن است حلقه نابجایی دیگری هم دور آن شکل بگیرد)

اندازه رسوب

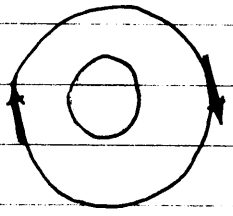
رسوب برشی: اگر پیوسته باشد انرژی کمتری دارد

رسوب دررفت: اگر ناپیوسته باشد انرژی کمتری دارد

رسوب یا پیوسته است یا ناپیوسته است. اگر غیرپیوسته باشد با پیشه یک فصل مشترک دارد و این فصل مشترک دو واقع یک انرژی سطحی دارد. مثلا رسوب پیوسته یک میدان کرنش دارد هم با این میدان کرنش با بوجود آمدن نابجایی برداشته می‌شود و فصل مشترکی وجود ندارد. بنابراین با پیدایی ذرات رسوبی پیوسته یا شفاف یا شفاف یک انرژی ایجاد رسوب دارد. با پیدایی رسوب‌های بی‌نظم این است که پیوسته باشد و با پیدایی رسوب‌های دررفت در این است که ناپیوسته باشد. بنابراین هرچه انرژی رسوب دررفت‌تری شود، تمایل پیدایی کند که پیوستگی خودش را با زمینه از دست بدهد و یک حالت meta stable بوجود بیاورد. یعنی رسوب با پیوستگی جزئی است هم تا با پایداری نسبی برسد. این شکل فقط با انرژی بوجود می‌آید. یعنی هرچه که رسوب دررفت‌تر است انرژی لازم برای بوجود آمدن فصل مشترک کمتر لذا انرژی لازم برای بوجود آمدن نابجایی‌هایی است که کرنش را خنثی می‌کنند.

دور شدن این حلقه‌های نابجایی از اطراف رسوب، رسوب کمک می‌کند پیوستگی خودش را از دست بدهد.

پس این درست است که بگوییم رسوب ناپیوسته نقش سختی‌ای برای عبور نابجایی است. ولی وقتی ناپیوسته است رسوب دررفتی است بنابراین تعداد این نوع رسوبات کمتری می‌شود. پس موانع نابجایی‌های کمتری در مقابل حرکت نابجایی قرار می‌دهند (نسبت به رسوب‌های پیوسته). پس اگر دو حالت گفتیم که دررفت شدن رسوب سختی را کاهش داد. این سختی به‌صورت اعداد و تعداد است نه از لحاظ دانش پیوستگی. یعنی رسوب دررفت به‌تنهایی سخت‌کننده رسوب نیز است اما از طرفی دررفت شدن رسوب‌ها مترادف با از دست دادن پیوستگی و کاهش تعداد است.



در مورد حلقه‌های Orowan می‌توانیم بگوییم:

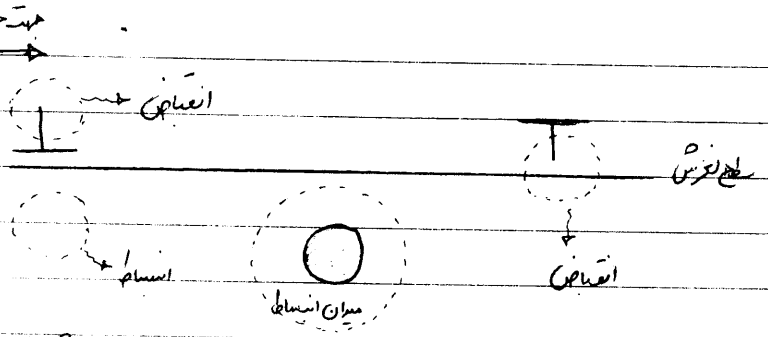
در دو طرف رسوب نابجایی‌ها علامت‌های مختلف دارند. پس اثر متقابل آن‌ها با رسوب و کنش جاذبه داشته باشند و تمایل دارد این جاذبه را خنثی کند. یعنی دررفت یا نشدن کنش عیب نقطه‌ای است. یعنی وقتی دررفته است نابجایی نمی‌تواند رسوب را ببرد یک می‌شود و وقتی جاذبه است نابجایی می‌تواند رسوب را دور بشود.

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

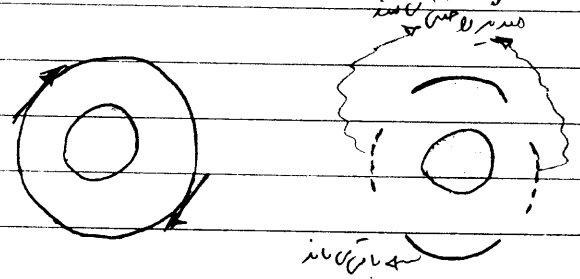
یک مثال می زنیم:

یک تنه جایی روی سطح لغزش در نظر می گیریم که می خواهد روی این سطح حرکت کند و یک برآیند نیروی اصطکاک وجود دارد.



واکنش تنه جایی با رسوب، واکنش میدان گرانش رسوب با تنه جایی الاستیک. اگر رسوب براثر خواص یک میدان انبساط (تنش کشش) بوجود آورد. دراین صورت روی یک بخش تنه جایی یک میدان انبساط وجود دارد و بخش دیگر یک میدان انقباض. وقتی میدان انبساط تنه جایی و میدان انبساط رسوب برهم جاذبه بوجود می آیند. پس اگر تنه جایی بخواهد روی جهت حرکت رسوب آن را دفع خواهد کرد پس می تواند رسوب را تنگ شود. اما اگر تنه جایی برجهت عکس حرکت کند. دراین صورت سطح انقباض تنه جایی در مقابل سطح انبساط رسوب قرار می گیرد و این جاذبه خواهد داشت. پس نیروی بین رسوب و تنه جایی می تواند جاذبه باشد یا دافعه.

حالت جاذبه تنه جایی براطراف رسوب قرار می گیرد، این حالت حالت تعادل تنه جایی است. (دلیلی ندارد سطح لغزش رسوب را قطع کند) و نمی تواند از آن فاصله بگیرد. در حالت دافعه وقتی تنه جایی از رسوب دور می شود نیروی جاذبه بیشتر می شود و دیگر نمی تواند جلوتر برود. یعنی باید تنش وارد کنیم تا جلوتر برود. در حالت جاذبه هم باید تنش بیشتری اعمال کنیم تا تنه جایی حرکت کند چون رسوب وارد آن را جذب می کند. پس در هر دو حالت یک قفل شدن تنه جایی است.



در مورد حلقه هم اتفاق به همین صورت است:

نیروی جاذبه بین خواهد رسوب نزدیک شود و نیروی دافعه بین خواهد رسوب دور شود. این نیروها باعث می شوند که این حلقه نیز حرکتی نسبت به سطح رسوب نداشته باشد.

دوقسمت مشخص شده از بالا به هم می رسند و همدیگر را قطع می کنند و یک حلقه لغزش را به وجود می آورند و این حلقه ها از اطراف تنه جایی دور می شوند. یعنی اگر هم رسوب ها در نظر گرفته شوند یک لغزش روی سطح خارجی آن انجام می شود. دوقسمت مشخص شده همدیگر را قطع می کنند و دوقسمت بالا و پایین باقی می مانند.

در مورد بیشتر این رسوب ها که در دهم باید بنویسیم: علت بوجود آمدن رسوب نزدیک به انرژی است یکی از عوامل این انرژی، کاهش انتقال رسوب است (اینکه تنه جایی سد شود یا نشود مشترک) اینکه رسوبات در یک بازه زمانی چقدر یک سد optimum است یعنی انرژی لازم برای عبور انتقال تنه جایی در این رسوبات کمترین انرژی لازم برای بوجود آمدن فصل مشترک است و در مورد دره ها درست برعکس.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۸۴/۸/۲۴ — جلسه پانزدهم

کامپوزیت ها Composites

به کامپوزیت ها با استفاده از ذرات با استحکام بالا و سختی بالا برمی‌گردیم. کامپوزیت‌ها به این دلیل بوجود آمدند که برخی از مواد که داریم استحکام خیلی بالا دارند ولی معایبی دارند مثل ترد می‌شوند - حساس به خراش‌ها که عیب سطحی دارند. مثل SiC و انواع سرامیک‌ها مثل Al_2O_3 با وجود استحکام بالا کاربرد آن‌ها به دلیل ترد بودن است چون ترد می‌شوند و حساس به خراش‌های کوچک سطحی که ایجاد می‌کنند و امکان انتقال ندارند یعنی نمی‌شود آن‌ها را عبور داد یا انتشار پیدا کرد و مهره کرد. پس یک سری محدودیت کاربردی دارند به این دلیل استحکام خیلی بالایی دارند.

این اجسام با استحکام بالا را به درون یک زمینه نرم قرار می‌دهند به صورتی که یک اتصال بین زمینه نرم و این اجسام با استحکام بالا بوجود بیاید.

زمینه نرم + {الیاف / ذرات سخت} ⟹ Composite

به این جسم دو فازه کامپوزیت می‌گوییم یعنی جسمی که از اتصال ذرات یا الیاف سخت به یک زمینه نرم بوجود آید.

اگر این زمینه نرم فلزی باشد به آن کامپوزیت های زمینه فلزی می‌گویند. اگر غیرفلزی، مثلاً سرامیکی باشد به آن کامپوزیت زمینه سرامیکی می‌گویند. اگر زمینه پلیمر باشد کامپوزیت زمینه پلیمر است. پس کامپوزیت یک جسم دو فازه است که بصورت مصنوعی ساخته می‌شود. پس جسمی که فاز نرم یا فاز سخت اتصال داشته باشد، نقش فاز نرم، اتصال دهندگی است و نقش فاز سخت، تحمل تنش است. پس هر وقت اتصال دهم وجود دارد جسمی بوجود می‌آید که هم استحکام خوبی دارد و هم می‌تواند کاربرد بسیار وسیعتری داشته باشد و شکل اتصال فاز پیوستگی با زمینه) هم دارد مثلاً می‌توانیم الیاف SiC در درون Al قرار دهیم. یا الیاف Al_2O_3 در Al.

به فاز سخت، فاز تقویت کننده می‌گویند.

کامپوزیت ها می‌توانند انواع مختلفی داشته باشند. کامپوزیت های زمینه فلزی بر حسب نوع تقویت کننده دو دسته می‌شوند

۱- کامپوزیت زمینه فلزی با تقویت کننده ذرات ۲- کامپوزیت زمینه فلزی با تقویت کننده الیاف

روش های ساخت کامپوزیت:

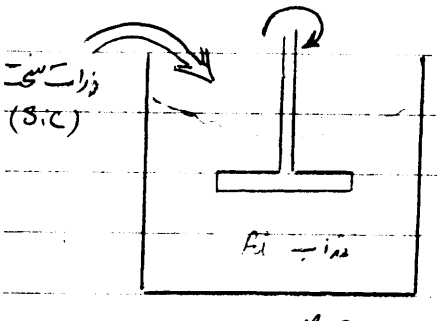
روش ساخت کامپوزیت بر حسب مواردی می‌تواند ساخت کامپوزیت از جامد یا مذاب یا ساخت کامپوزیت از مذاب باشد.

- روش ساخت کامپوزیت با برخورد با مذاب:

● روش ترکیبی: این روش مختص تقویت کننده ذرات است.

در این روش مثلاً مذاب Al تهیه می‌کنیم.

و ذرات سخت مثلاً SiC به تدریج درون مذاب Al می‌ریزیم. مشکلی که همیشه وجود دارد: اختلاف وزن مخصوص ذرات با مذاب است.



(روش ترکیبی)

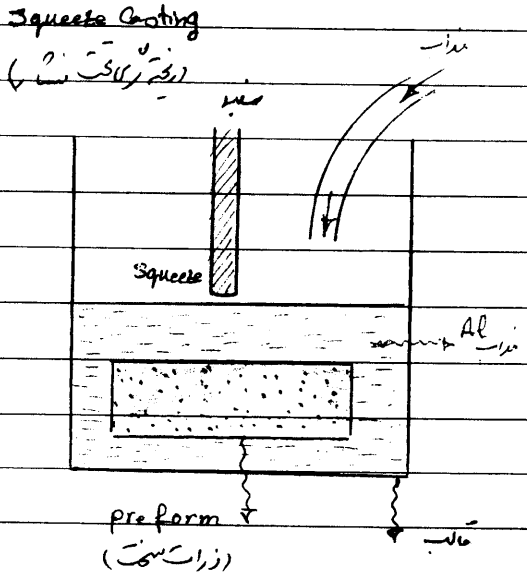
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

زمینه‌ی کامپوزیت زرات سخت باشد روی مذاب بصورت سرباره تولیدی میرود و از روی کامپوزیت آن گرفته شده و تمیز می‌شود. برای برطرف کردن آن معمولاً از روش گردابی با یک همزن استفاده می‌کنند که دو واقع یک گرداب مذاب بوجود می‌آید که این زرات را در داخل مذاب بصورت یکنواخت توزیع کند. در Al وقتی که ریخته گری می‌شود معمولاً شرایط زیادی عیب بوجود می‌آید. که آن وقت شرایط خاص ریخته گری آن عالی optimum گفته می‌شود وقتی میدانیم کامپوزیت composite شکل گرفته است که این زرات درون مذاب توزیع شده باشند. مخلوط حاصل را درون قالب می‌ریزند و بدین ترتیب در این حالت توزیع زرات SiC چندان مناسب نیست اما در اکثر حالات برای توزیع آن مشکل داریم چون همدیگر را زیاد دوست داریم یعنی وقتی همزن را در مذاب قرار می‌دهیم با زمان است توزیع زرات سخت بهم میخورد. یا اینکه زرات کنار هم جمع میشوند و یک توده‌ای از زرات درون زمینه تشکیل میشوند. از طرفی خیلی سخت است زرات را داریم یعنی شاید اصلاً چنین چیزی کار کنیم شاید بتوانیم حدود ۱۰٪ زرات را حل کنیم. و یا اینکه برای آنکه بتوانیم زرات را درون Al حل کنیم باید زرات را خیلی گرم کنیم و وقتی همزن را در Al با درجه حرارت حدود 700°C خودش را اکثراً قرار می‌کند. به هر صورت با وجود تمام این محدودیت‌ها که وجود دارند روشی که فعلی این است که Al مذاب تهیه کنیم، زرات SiC را پیش گرم کنیم و به ترتیب به مذاب اضافه کنیم و هم بزنیم و بعد درون قالب بریزیم و نهایتاً کامپوزیت داریم. نحوه اتصال هم بستگی دارد که بهتر کشندگی مذاب چقدر باشد و اینکه ترشوندگی زرات سخت داخل مذاب چگونه باشد. اتصال Al با Si خیلی بهتر است یک فصل مشترک بین Al و SiC بوجود می‌آید. در Al خالص بوجود آوردن اتصال کمی مشکل است. بهترین راه برای این کار روش‌هایی هستند که زرات سخت بتوانند درون Al حل شوند و اینجا این فصل مشترک بهتر پیدا می‌شود و باید به عین آن همانطور نظر گرفت.

از طرفی Al اکسید می‌شود و اگر زمان طولانی شود Al_2O_3 هم وارد کامپوزیت می‌شود و مقدار سختی به مقداری که پیش بینی کرده‌ایم ممکن است تفاوت داشته باشد.

● روش Squeeze casting :

یکی از بهترین روش‌های ساخت کامپوزیت از طریق مذاب است. در این روش هم ابتدا زرات را به شکل پیش فرم (Preform) در می‌آورند. در مورد الیاف ساده است اگر الیاف را هم فشرده کنیم Preform بوجود می‌آید اما در مورد زرات مشکل است و روش‌های خاصی دارد مثلاً برای زرات SiC یا Al_2O_3 این زرات را با یک نیروی خاص مخلوط می‌کنند و وقتی مخلوط شد یک قالب خاص میگذارند و آن را فشرده می‌کنند. عمل کردن با این صورت است که وقتی عمل پرس را شروع می‌کنند حجم آن زیاد شده



(۱) منظور از حل کردن، پخش کردن زرات است.

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

توده‌ای بوجود می‌آید که این چسب با ذرات با قطر آن را ساخته‌اند وقتی دما از یک حدی بالاتر رفت[1]، این چسب پلیمری تخریب می‌شود و لذا توده خارج می‌شود و گرنه با قی می‌ماند این ذرات تقریباً اسفنجی هستند. یعنی لابلای آن‌ها تو خالی است، البته طوری که انقباض باید وجود داشته باشد یعنی ترجیحاً Rigid باشد. یعنی وقتی مذاب داخل آن می‌ریزیم نشکند. در اینجا محدودیت ما به آن دیگری است. یعنی با ذرات کم نمی‌توانیم static preform درست کنیم، در صورتی که برای الیاف محدودیت نداریم. پس نهایتاً یک Preform داریم که حدود 20% تا 40% آن ذرات سخت هستند و بقیه آن خلل و فرج است (یا حفره است). این preform را بدون یک قالب قرار می‌دهند. قالب باید طوری باشد که خروج هوا از درون آن پیش‌بینی شده باشد. وقتی مذاب را بدون قالب روی Preform ریختند، با یک سنبه آن را فشار می‌دهند. در اثر فشار سنبه، مذاب داخل این ذرات اسفنجی را پر می‌کند. یعنی مذاب Squeeze می‌شود روی توده اسفنجی ذرات و سریع هم منجمد می‌شود. وقتی منجمد شد composite با 20% تا 40% ذرات با الیاف داریم که زمینه آن Al است. این روش هم برای ذرات مناسب است هم برای الیاف. این روش از لحاظ توزیع ذرات و یکنواختی ذرات خیلی خوب است. چون در Preform توزیع ذرات تقریباً یکنواخت است. یعنی نسبت به روش بریدن خیلی یکنواخت‌تر است.

⊛ استفاده از روش متالورژی پودر:

در این روش تقریباً پودر Al را به عنوان زمینه داریم و پودر Si_3C را به عنوان تقویت کننده، به صورتی که خواهیم این پودرها را مخلوط می‌کنیم و سپس در یک آسیاب کاملاً مخلوط می‌کنیم. سپس Press می‌کنیم بعد زینتر[2] می‌کنیم و یک Block به دست می‌آوریم که تقریباً Al 70% داریم و 30% ذرات Si_3C یا Al_2O_3 داریم.

در اینجا هم باز هم زینتر باید انقباض وجود داشته باشد. انقباض می‌تواند شیمیایی باشد. البته اگر ذرات خیلی ریز باشند انقباض مکانیکی هم می‌تواند باشد. من داشتم در متالورژی پودر می‌گفتم داشته و انتقی نیز داشتیم یعنی از داشته و انتقی معمولاً استفاده داریم. مزیت متالورژی پودر در این است که محدودیت در حد نداریم.

روش دیگر این است که به جای اینکه پودر را زینتر کنند در داخل قالبی قرار می‌دهند و بعد Extrusion را انجام می‌دهند و این دو هم متصل می‌شوند و composite با درصد ذرات مشخص بوجود می‌آید.

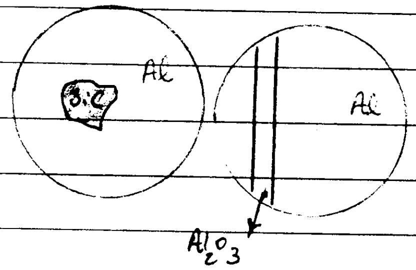
برخی از آلیاژها بطور طبیعی composite هستند. یعنی یک جسم دو فازه که فاز سخت نرم و نرم یکنواخت توزیع شده باشد composite درست شده ذرات Cementite داخل زمینه ferrite را composite به صورت مصنوعی می‌سازیم با اهداف خاص. composite با الیاف در جهات مختلف خواص مکانیکی متفاوت دارد شده است. استحکام کششی آن متفاوت است اما composite با ذرات به صورتی نیست حالت ایزوتروپ دارد. البته در الیاف هم ممکن است تولید کنیم آن‌ها به صورتی باشد خاصیت ایزوتروپی داشته باشد که بسته به شرایط دارد.

به هر ترتیب وقتی کامپوزیت تولید شد استحکام بالا دارد. علت اصلی استحکام کامپوزیت:

وقتی ما یک جسم دو فازه داشته باشیم که یکی سخت و نرم باشد و منحنی تنش کرنش را رسم کنیم، استحکام تسلیم جسم دو فازه بین استحکام تسلیم فاز نرم و فاز سخت قرار گرفته یعنی خارج آن نمی‌تواند باشد.

(1) حدود 800° تا 1000° (2) زینتر کردن به معنای پاک کردن دمای بوجود آمدن یک دمای کمتر از نقطه ذوب است

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

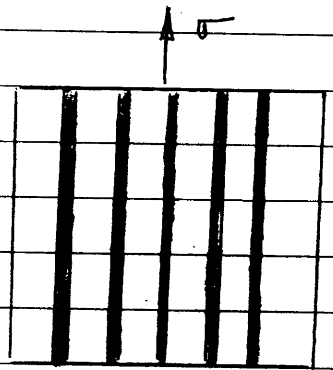


وقتی یک ذره SiC را درون زمینه Al (یا آلیاژ Al) قرار دهیم ،
مسئله ای که وجود دارد این است که یک اختلاف ضریب انبساط حرارتی
بین این دو وجود دارد. البته در مورد الیاف هم همین ترتیب است.
این اختلاف انبساط حرارتی بین زمینه و تقویت کننده باعث ایجاد
یک میدان کرنش در اطراف تقویت کننده می شود.

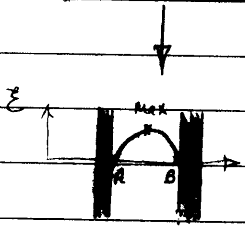
می دانیم که این کامپوزیت در دمای بالا شکل می گیرد و وقتی به دمای محیط می رسیم اختلافی که در اثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی این دو بوجود می آید باعث ایجاد یک انبساط یا انقباض در تقویت کننده می شود. بنابراین باید یک میدان تنش در اطراف تقویت کننده و بین زمینه و تقویت کننده بوجود بیاید تا این اتصال حفظ شود. اگر اتصال برقرار نباشد یک سری حفره درون ماده بوجود می آید. اما می دانیم اتصال وجود دارد پس یک میدان تنش و کرنش وجود دارد. بنابراین در اثر وجود اختلاف انبساط حرارتی ، متعاقباً تغییر در میدان کرنش بوجود می آید و این منجر می شود به یک افزایش در نابجایی ها در اطراف تقویت کننده. همین افزایش دانسیته نابجایی ها است که استحکام را بالا می برد. یعنی علاوه بر وجود ذرات خود این افزایش دانسیته نابجایی ترمی را هم افزایش می دهد. پس کمیتی که ما برایش جا داریم این است که خود میدان کرنش ذرات با هم تلاقی نداشته باشند. اگر تلاقی داشته باشند ترمی به همین نسبت بالا می رود. وقتی دانسیته بالا است ذرات نزدیک به هم هستند و میدان کرنش آن ها با هم تلاقی می کند. در این حالت جایی برای تغییر شکل پلاستیک وجود ندارد. اما وقتی دانسیته ذرات کم است یک مقدار جا برای تغییر شکل پلاستیک وجود دارد.

بنابراین علت اصلی استحکام کامپوزیت ، وجود عدم انطباق بین ذره و زمینه در اثر تغییر دما است. به عبارتی اختلاف انبساط حرارتی ، و چون اختلاف انبساط حرارتی باعث بوجود آمدن یک mis match می شود. یعنی این عدم انطباق باعث بوجود آمدن یک میدان کرنش در اطراف ذرات می شود ، این میدان کرنش هم باعث بوجود آمدن نابجایی می شود (این نابجایی ها همان نابجایی های لازم از نظر هندسی هستند) پس استحکام بالا می رود.

بررسی منحنی تنش کرنش یک کامپوزیت با الیاف :

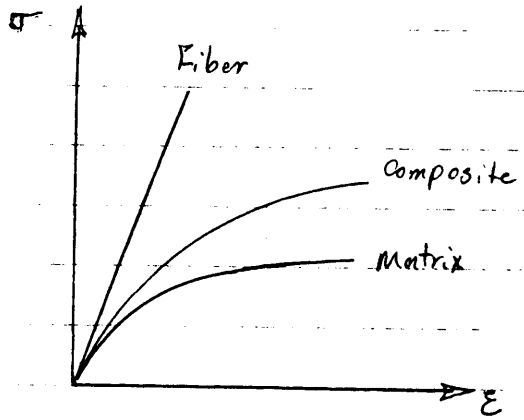


یک کامپوزیت با الیاف هم جهت در نظر می گیریم :
درون یک زمینه نرم . تنشی که اعمال می کنیم در جهت طول الیاف است.
گفتیم نقش الیاف تحمل تنش است و نقش زمینه انتقال تنش است
وقتی یک تنش اعمال می کنیم در داخل زمینه یک تغییر فرم ایجاد می شود
در حالی که الیاف تغییر شکل نمی دهند. بنابراین وقتی اتصال بین
الیاف و زمینه وجود دارد ، قسمت هایی از زمینه که متصل به الیاف اند
تغییر شکل نمی دهند. و قسمت های میانی زمینه تغییر شکل می دهند
در واقع بین هر کدام از زمینه که بین دو Fiber قرار دارد یک گرادیان
تغییر شکل بوجود می آید. تغییر شکل در نقاط B, A صفر است و در وسط آن ها



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



Max است . همین مراد این نکته مهم پلاستیک
ی تولید شخره شکست شود . چون تنش
را الیاف تحمل ی کنند شکنا اگر زمینه Al باشد ،
Al فقط تنش را انتقال می دهد . می دانیم اگر
ابتدا نقطه و حداکثر منحنی تنش کرنش خود الیاف
و زمینه را رسم کنیم ، منحنی تنش کرنش کامپوزیت
بین این دو خواهد بود . در این منحنی تنش کرنش
ی توانیم مناطق مختلف را در نظر بگیریم :

منطقه (I) : الیاف و زمینه در محدوده الاستیک هستند . در این منطقه ، جدایش بین زمینه است چون بین لایه
زمینه وارد منطقه پلاستیک می شود . بنابراین تا وقتی زمینه تسلیم نشده در این منطقه قرار داریم . در این منطقه
طبق قانون مخلوط ها ، مدول الاستیک کامپوزیت :

$$E_c = E_F V_F + (1-V_F) E_M$$

V_F : درصد حجمی الیاف

V_M

یعنی مدول الاستیک برحسب درصد حجمی الیاف و زمینه تعیین می شود .

منطقه (II) : الیاف در محدوده الاستیک هستند ولی زمینه وارد محدوده پلاستیک شده . در این منطقه مدول الاستیک کامپوزیت
در اینجا چون زمینه وارد منطقه پلاستیک شده
مدول الاستیک برای آن مفهوم ندارد
به جای آن شیب منحنی σ و ε را در نظر می گیریم
چون شیب $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)$ برای زمینه در منطقه پلاستیک

$$E_c = E_F V_F + (1-V_F)\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)_M$$

خیلی کمتر از شیب E_F است ، می توانیم از آن صرف نظر کنیم :

$$E_c \simeq E_F V_F$$

منطقه (III) : الیاف و زمینه وارد منطقه پلاستیک شده اند . در این منطقه در واقع اگر الیاف کامل تر دارا شده خواهد شکست
چون دیگر برای جسم کامل تر منطقه پلاستیک مفهومی ندارد . پس اگر الیاف کامل تر دارا نشد کامپوزیت
خواهد شکست ، چون دیگر الیاف شکننده کامپوزیت دیگر دوام نخواهد آورد .

منطقه (IV) اگر الیاف به صورت کامل تر دارا نباشد منطقه چهارمی وجود دارد . در این صورت هم کامپوزیت خواهد شکست

کاربرد کامپوزیت در منطقه II است . یعنی این منطقه برای ما اهمیت دارد و در مورد آن بیشتر بحث می کنیم . در منطقه II
طبق قانون مخلوط ها ، استحکام کشش کامپوزیت :

$$\sigma_c = \sigma_F V_F + \sigma_M' (1-V_F)$$

σ_c : استحکام کامپوزیت

σ_F : استحکام الیاف

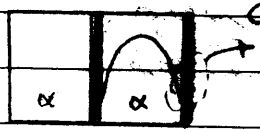
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

σ'_M : استحکام زمینه نیست تنشی است که زمینه توان تحمل می‌کند. توجه داریم که σ_{UTS} زمینه نیست.
در این نقطه ماکزیمم یا تقریباً لایه‌ای است (ماکزیمم نیست)
وقتی تنش اعمال می‌کنیم، زمینه تغییر شکل می‌دهد که این تغییر شکل الیاف لایه‌ای است (تغییر شکل الیاف لایه‌ای است، هر ضلعی). وقتی تنش را حذف می‌کنیم الیاف، دوباره به حالت اولیه خود برمی‌گردند. چون بین الیاف و زمینه اتصال وجود دارد، الیاف زمینه را هم به حالت اولیه برمی‌گرداند یعنی برگشت زمینه تغییر شکل پیدا کرده است. وقتی تنش را حذف می‌کنیم، چون تنش تغییر شکل پیدا کرده است برمی‌گردد اما الیاف کمی فاصله دارند. الیاف زمینه را هم به حالت اولیه برمی‌گرداند. یعنی برگشت زمینه تغییر شکل پیدا کرده است. حالا دوباره V_F ثابت می‌کنیم و مرحله بعد تقویت کننده حقیر باید باشد؟
وقتی σ_c ماکزیمم می‌کنیم، الیاف شکسته می‌شوند و زمینه بار را تحمل می‌کند. چون $\sigma_c > \sigma_u$ زمینه بار را تحمل می‌کند ($\sigma_c > \sigma_u$) یعنی الیاف به‌طور واقعی تقویت کننده هستند. منظور از σ_u، σ_{UTS} زمینه است.
برعکس این حالت که ماکزیمم نباشد، حالتی که داریم این است که $\sigma_c > \sigma_u$ یعنی ماکزیمم وقتی است.
مرحله بعدی که ترانسیم یک حجم بیشتر تعریف کنیم، یعنی حداقل حجمی از الیاف که ماکزیمم باشد تا این خاصیت را داشته باشد. یعنی اگر به حالت قبلی $\sigma_c = \sigma_u$ بدهیم حداقل $V_F = V_{Min}$.
یعنی برای اینکه $\sigma_c > \sigma_u$ شود باید $V_F > V_{Min}$ شود. این حجم حداقلی است که می‌توانیم بدست آوریم.

پس باید حجم الیاف بیشتر از این مقدار باشد.	$V_{Min} = \frac{\sigma_u - \sigma'_M}{\sigma_F - \sigma'_M}$

$\sigma_u = \sigma_F V_{Min} + \sigma'_M + \sigma'_M V_{Min} \Rightarrow$

با الیاف هر چنان تقویت کننده برنامه‌ریزی می‌کنیم استحکام بالایی پیدا می‌کند. مرحله‌ی از الیاف می‌توانند مرحله‌ی باشد که این حالت الیاف نتوانند استحکام بالایی پیدا کنند حتی بافت خاصی استحکام شوند. مثلاً اگر بخواهیم حجم الیاف خیلی کم باشد، برای این حجم بحرانی زمینه این که باید تغییر شکل زیاد خیلی زیاد باشد. همانطور که تغییر شکل می‌دهیم زمینه بیشتر تغییر شکل می‌دهد چون از الیاف تغییر شکل بیشتر می‌شود این مرز الیاف تغییر شکل بیشتر می‌دهد که می‌شود به منطقه‌ی شش شده تمرکز تنش که وجود دارد. برای اتصال الیاف تغییر شکل بیشتر می‌دهد که اتصال زمینه الیاف با زمینه سبب تراکم تنش می‌شود.



تراکم تنش

در نتیجه اتصال شکسته شده و وقتی اتصال این دو قسمت الیاف شکسته می‌شود. بنابراین برای حجم الیاف خیلی بالا حالت تقویت نمی‌شود بلکه به حالت تضعیف هم می‌شود یعنی برای اثر اضافه تغییر شکل بیشتر الیاف سریعتر از فلز می‌شکند. و ماکزیمم تنش شود. بنابراین یک حجم بحرانی باید تعریف کنیم که بالای الیاف با تنش تقویت کننده و پایین‌تر تضعیف کننده.
حالت کرانه‌ای را هم می‌توانیم بگیریم که الیاف شکسته شده و فقط الیاف بتوانند بار را تحمل کنند یعنی $\sigma_F = 0$ (حجم بحرانی) یعنی نتیجه اگر حجم الیاف از یک حجمی کمتر باشد، الیاف نه تنها کمک

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

شکست کامپوزیت زمانی است که $\sigma_F = 0 \Rightarrow \sigma_c = \sigma_u(1-V_F)$

در اینجا چون الیاف دنیل‌وار هستند

σ'_M هم نمی‌تواند مفهوم داشته باشد یعنی به جای آن همان استحکام تسلیم زمینه را قرار می‌دهیم و رابطه تقریباً بدین صورت می‌شود

پس σ_c از σ_u هم کمتر می‌شود این زمانی است که درصد الیاف خیلی کم است و می‌شکنند. σ'_M هم زمانی بود که الیاف کمک می‌کردند به زمینه تا بتواند تنش‌ها را تحمل کند.

بنابراین ما دو رابطه داریم، رابطه اول زمانی است که الیاف داریم

$$\sigma_c = \sigma_F V_F + \sigma'_M (1-V_F)$$

و این الیاف استحکام‌های بالایی دارند.

رابطه دوم هم زمانی است که الیاف به‌حدی کم هستند که سریع می‌شکنند

$$\sigma_c = \sigma_u (1-V_F)$$

و هیچ تقویت‌کنندگی هم ندارند.

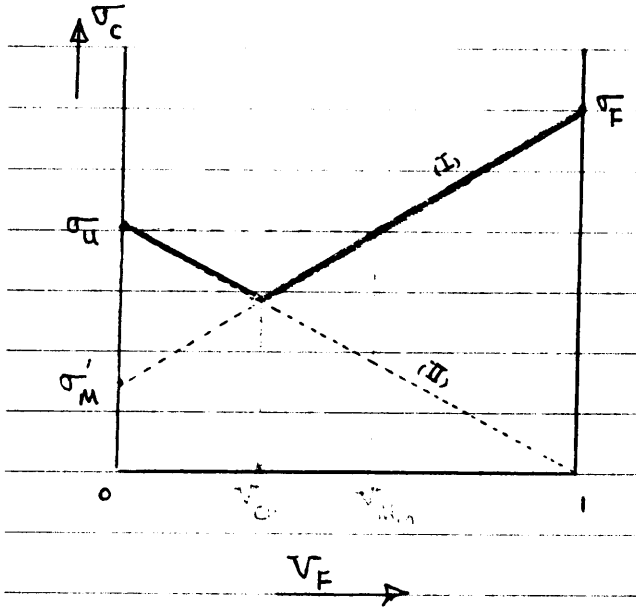
بنابراین حجم بحرانی ما محل تلاقی این دو رابطه است. یعنی حجم بحرانی زمانی است که این دو با هم برابر باشند.

$$\sigma_c = \sigma_c \Rightarrow \boxed{V_{cr} = \frac{\sigma_u - \sigma'_M}{\sigma_u - \sigma'_M + \sigma_F}}$$

V_{cr} حجم بحرانی است که کمتر از آن الیاف حالت تقویت‌کننده دارند و بیشتر از آن حالت تقویت‌کننده

حالا نتایج به‌دست آمده را روی یک نمودار می‌بریم

بسته به استحکام هر جسم درصد حجمی فازهای مختلف رسم می‌کنیم. محور عمودی σ_c و محور افقی V_F است که بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. ابتدا رابطه (I) را رسم می‌کنیم. چون شیب خطی است دو نقطه از آن را پیدا می‌کنیم برای رابطه II هم به همین ترتیب عمل می‌کنیم:



رابطه (I)	رابطه (II)
$V_F = 0$	$V_F = 0$
$\sigma_c = \sigma'_M$	$\sigma_c = \sigma_u$
$V_F = 1$	$V_F = 1$
$\sigma_c = \sigma_F$	$\sigma_c = 0$

σ_F از σ_u و σ'_M معمولاً بیشتر است. σ_u هم بیشتر از σ'_M است

اگر دو خط را رسم کنیم، V_{Min} جایی است که $\sigma_c = \sigma_u$ است. V_{cr} جایی بود که دو خط یکدیگر را قطع می‌کردند

رابطه (I) زمانی صادق است که حجم الیاف از حجم بحرانی بیشتر باشد و رابطه (II) زمانی صادق است حجم الیاف از حجم بحرانی کمتر باشد. پس نتیجه‌گیری این است که برای کامپوزیت شدن باید از V_{Min} بیشتر ساخته شود. پس از نظر حجم محدودیت وجود دارد چون در V_Fهای بزرگ‌تر از ۱ مشکل بالا می‌رود

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

مارتنزیت غیرقابل استفاده می‌شود. پس حجم اسلاب ما باید از حجم V_{min} بیشتر باشد اما از یک حدی هم نباید بیشتر شود چون قدرت پایانی می‌رود.

۸۴، ۸، ۲۹ «جلسه شانزدهم»

«سخت شدن برای عیب نقطه‌ای»

فصل جدید را بررسی می‌کنیم که عضو شبکه نقطه‌ای است. Vac ها را هم بررسی می‌کنیم.

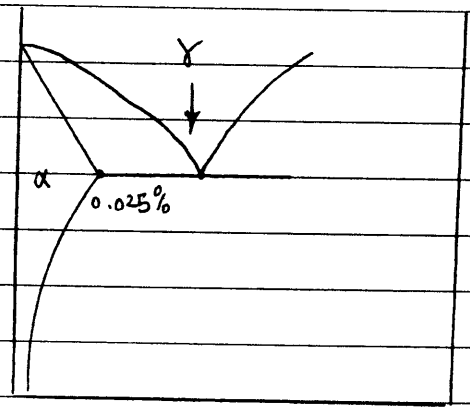
سخت شدن برای فاز مارتنزیت «Martensite Strengthening»:

می‌دانیم در استحاله آستنیت، پرلیت اگر سرعت سرد کردن از یک حدی بیشتر باشد فازی به نام فاز مارتنزیت به وجود می‌آید که این استحاله بدون نفوذ انجام می‌شود. اگر منحنی تعادلی آهن کربن را در نظر بگیریم (حالت تعادلی):

$\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$

آستنیت ← فریت + سمنتیت

پرلیت

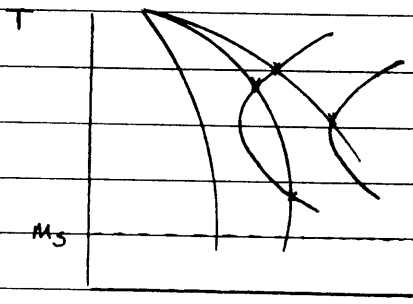


پرلیت یک مخلوط پرکنتیدار است

اگر سرد کردن آستنیت سریع‌تر باشد به این صورت فاز مارتنزیت شکل می‌گیرد. روی منحنی T + t هم مشخص است اگر از γ قبل از اینکه به پرلیت تبدیل شود به زیر دمای M_S برسد، فاز مارتنزیت شکل می‌گیرد.

البته ممکن است سرعت سرد کردن طوری باشد که هم پرلیت شکل بگیرد و هم مارتنزیت. فاز مارتنزیت سخت‌ترین فاز آستنیت کردن است. پس فاز مارتنزیت زمانی شکل می‌گیرد که آستنیت قبل از استحاله کامل به پرلیت، زیر دمای M_S برود.

علت اینکه در این شرایط γ تبدیل به پرلیت نمی‌شود این است که استحاله γ به پرلیت یک استحاله با مکانیزم نفوذ است. یعنی باید اتم‌ها از طریق نفوذ صورت می‌پذیرد که نفوذ شدیداً وابسته به دما و زمان است. فاز γ پایدارتر شد حدود 0.8% دارد. این فاز γ می‌خواهد به فاز α تبدیل شود که سرد کردن دما فرصتی نمی‌دهد و 0.025% دارد (یعنی بیشترین حلالیت کم) و سمنتیت که حدود 6.67% کربن دارد. این استحاله نیز زمان‌بر است. استحاله‌ای کربن است که طوری کربن آستنیت را از بین می‌برد که فازهای مختلف شکل بگیرند. و این نیز زمان‌بر است.



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

بنابراین اگر زمان زیادی نداشته باشیم، آستنیت کاملاً تبدیل به پرلیت نمی‌شود و نهایتاً وقتی به زیر خط M_s می‌رسیم مارتنزیت تشکیل می‌دهد. پس چون مکانیزم نفوذ است، زمان کافی برای نفوذ وجود نداشته و نمی‌تواند پرلیت تشکیل بشود. از طرفی تغییر آلوتروپی آهن هم باید صورت بگیرد چون آستنیت F.C.C است و فریت B.C.C بنابراین یک فاز جدید بوجود می‌آید که خیلی سخت است و استحاله آن بدون نفوذ انجام می‌شود.

می‌خواهیم علت سخت شدن فاز مارتنزیت را بررسی کنیم.

وقتی که ساختار مارتنزیت را نشان می‌دهیم متوجه می‌شویم ساختار مارتنزیت با پرلیت یا فریت و سمنتیت متفاوت است.

$\gamma \longrightarrow M$

از ترکیب خود تعادلی تک توتکتوئید را در نظر بگیرید در فاز γ 0.8% کربن داریم (البته مقدار کربن بیشتر هم می‌تواند باشد). این درصد کربن درصد بالایی است. حلالیت اتم کربن در فاز γ و در دمای توتکتوئید 2% است. یعنی 2% کربن در این دمای حدود 700° در γ محلول می‌تواند باشد. بنابراین وقتی 0.8% کربن داریم در این دما، هنوز اشباع نشده است.

با وقتی به دمای اتاق می‌رسیم درصد حلالیت خیلی کاهش می‌یابد.

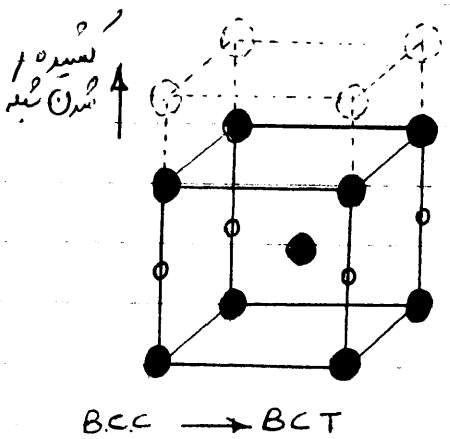
درصد حلالیت فاز مارتنزیت نسبت به کربن (چون دما پایین است) خیلی کم است.

پس وقتی ما این آستنیت را Quench می‌کنیم فاز مارتنزیت ما فوق اشباع است چون درصد حلالیت کربن در آن خیلی کم است. پس مقدار خیلی زیادی کربن فوق اشباع در فاز مارتنزیت داریم. این کربن‌های فوق اشباع در سخت شدن این فاز تأثیر دارند. یعنی یکی از دلایل سخت بودن فاز مارتنزیت وجود کربن‌های فوق اشباع است.

در اینجا دو حالت وجود دارد:

1- یا اتم‌های کربن خوشه‌هایی تشکیل می‌دهند. یعنی دور هم جمع می‌شوند و مناطقی بوجود می‌آورند شبیه مناطق GP یعنی در بعضی مناطق درصد کربن خیلی زیاد است.

2- یا اینکه اتم‌های کربن بیشتر از حد در فاز با ساختار B.C.C حل می‌شوند (در دمای محیط آهن باید B.C.C باشد) در شبکه فریت BCC آهن، اتم‌های کربن، Site‌هایی را اشغال می‌کنند مثل Site‌های تتراهدرال مشخص شده و نتیجه آن این می‌شود که در جهت مشخص شده شبکه BCC کشیده می‌شود. یعنی یک انبساط شبکه بوجود می‌آید که در واقع BCC تبدیل می‌شود به BCT (Body Centered Tetragonal).



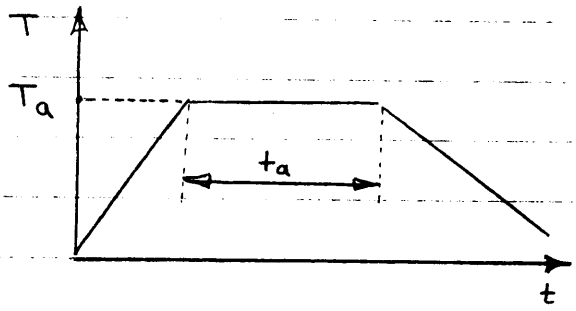
خود این انبساط شبکه از یک طرف باعث می‌شود که خود سطوح لغزش منبسط بشود. سطوح لغزش سطوح {111} هستند. وقتی سطح لغزش منبسط شود، تراکم آن کم می‌شود و لغزش کمتر انجام می‌شود.

از طرف دیگر، تعداد اتم‌های کربن خیلی زیاد است و اینها می‌توانند از حرکت نابجایی‌ها جلوگیری کنند.

پس این دو عامل سبب می‌شوند که سختی فاز مارتنزیت بالا برود. حتی در بعضی موارد که می‌بینیم هر چه مقدار کربن بیشتر باشد سختی مارتنزیت هم بیشتر است.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

بنابراین وقتی جسمی را تغییر شکل پلاستیک دادیم نمی‌توانیم برگشت به شکل اولیه داشته باشیم، اما اتمهای اولیه را نمی‌توانیم برگردانیم. برای برگشت به شکل اولیه جسم را Anneal می‌کنیم. در anneal کردن یک نمونه T-t (دو مرحله‌ای زمان) داریم بصورت روبرو که در آن T_a دمای annealing است، t_a زمان anneal است. در اثر annealing شکل تقریباً حالت اول برمی‌گردد ("تقریباً" را برای این گفتیم که ممکن است اندازه دانه‌ها تغییر کرده باشد) اما تغییر در حالت اولیه برمی‌گردد. در هر صورت خواص جسم خواص اولیه برمی‌گردد. یعنی مثلاً وقتی Al را تغییر شکل می‌دهیم، بعد از تغییر شکل استحکام آن خیلی بالاتر از Al معمولی است. اما وقتی آن را anneal می‌کنیم، خواص آن مثل یک Al معمولی می‌شود.



در برگشت یک جسم به حالت اول که تحت تاثیر دما و زمان مراحل مختلفی وجود دارد که مهمترین این عوامل عبارتند از:

- بازیابی (Recovery)
- تبلور مجدد (Recrystalization): به وجود آمدن دانه‌بندی جدید.

مرحله بازیابی معمولاً در دمای پایین‌تر انجام می‌شود. بازیابی یک بازیابی خواص فیزیکی است. چون در اثر تغییر شکل پلاستیک و افزایش چگالی یک سری خواص فیزیکی جسم مثل هدایت تغییر می‌کند. در این مرحله، معمولاً خواص فیزیکی جسم برمی‌گردد. در مرحله تبلور مجدد خواص مکانیکی برمی‌گردد مثل استحکام.

به عبارت دیگر مرحله بازیابی به شکل روی عیب نقطه‌ای اثر می‌گذارد چون غلظت نقص‌های بعضی نقص نقطه‌ای خواص فیزیکی ماده را تغییر می‌دهد. پس دماهای پایین‌تر که Recovery در آن صورت می‌گیرد غلظت نقص‌های نقطه‌ای به حالت تعادل برمی‌گردد ولی در تبلور مجدد عیب خطی به حالت تعادل می‌رسد و این روی خواص مکانیکی ماده اثر می‌گذارد.

تعریف: در تغییر شکل پلاستیک در دمایی که تبلور برگردان در آن صورت نمی‌گیرد، آن کار سرد (Cold Work) می‌نامند.

یعنی در دماهای کار سرد هیچ گونه عیب نقطه‌ای به وجود آمده حذف نمی‌شود (از بین نمی‌رود). بنابراین دمای تغییر شکل سرد هم است. مثلاً وقتی جسمی را در دمای بالا تغییر شکل می‌دهیم ممکن است تمام این مراحل انجام شود یعنی بازیابی و حتی تبلور مجدد هم انجام شود. اما در کار سرد، در دمای تغییر شکل می‌دهیم که هیچ گونه بازیابی ای صورت نمی‌گیرد. وقتی هیچ گونه بازیابی صورت نگیرد به این معنی است که هیچ گونه تبلور مجدد هم صورت نگرفته. چون همیشه اول بازیابی انجام می‌شود بعد تبلور مجدد.

پس تعریف کار سرد یک تعریف نسبی است. چون مثلاً ممکن است دمای کار سرد یک کبالت با یک تنگستن محاسبه متفاوت باشد. مثلاً ممکن است دمای 300° برای یک جسم کار سرد باشد و برای جسم دیگر کار گرم.

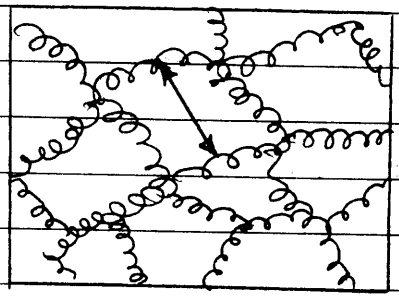
حالا می‌خواهیم ساختار یک جسم کار سرد شده را بررسی کنیم.

تقسیم دمای جسمی به دماهای پایین تغییر شکل پلاستیک می‌دهند که در آن انرژی داخلی تغییر است

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

(هم خطی هم نقطه ای). وقتی چگالی دررفتگی ها افزایش می یابد، خود افزایش دررفتگی ها، حرکت دررفتگی ها را کنترل می کند. یعنی در واقع یک نوع کارسختی بوجود آمده. عوامل کارسختی اولیه تنش داخلی دررفتگی ها هستند با افزایش دررفتگی ها، کارسختی بیشتر می شود.

فاصله عنصری نقص

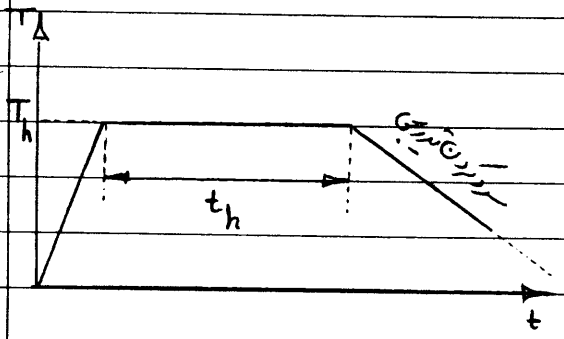


Dislocation tangles

بترتیب افزایش دررفتگی ها، حرکت دررفتگی ها را دشوار می کند و افزایش استحکام را حاصل می کنیم. تقسیم دررفتگی ها دو نوع هستند یکی دررفتگی های لازم از نظر هندسی و دوم دررفتگی های اتفاقی و تصادفی. دررفتگی های اتفاقی نقش اصلی را ایفا می کنند (شبکه ی Lomer cotrell می تواند تجمع دررفتگی ها را موجب) یعنی در مناطق خاصی افزایش دررفتگی ها را داریم. یعنی دررفتگی ها در مناطق خصوصی تجمع می کنند. یعنی در مناطق هم دررفتگی ها بالا است و در مناطق دیگر دررفتگی ها بصورت متراکم بوجود آمده و فاصله بین این سدها دررفتگی ها می تواند حرکت کند. یعنی یک شیب تنشی می شود تا دررفتگی ها حرکت کنند. معمولا در تعریف این فواصل، دررفتگی ها فاصله ی بین این سدهای دررفتگی ها را "فاصله هندسی لغزش" می گویند. یعنی مسافتی که دررفتگی ها می توانند بلغزش کنند (البته خیلی کم پیدا و واقع شود با افزایش دررفتگی ها (یعنی با افزایش تغییر شکل پلاستیک) این فاصله کم می شود. اما نهایتا به یک عددی می رسد و دیگر از آن کمتر نمی شود.

علت بوجود آمدن این تجمع ها در مناطق خاص و هم در مواقع مثل دررفتگی های غیر متحرک در داخل شبکه است و یا ایجاد آن ها در حین تغییر شکل پلاستیک. بنابراین هر چه تغییر شکل بیشتر و تغییر شکل پلاستیک بیشتر باشد، استحکام بیشتر می شود و می آید.

بنابراین با یک ساختاری مواجه هستیم که خصوصیات های آن را دررفتگی ها بالا رفته و دیگر تست های دررفتگی ها بالا نیست. روشی از افزایش دررفتگی ها بصورت کلی خواص مکانیکی است استحکام، سختی، قدرت را افزایش پیدا می کنند. دستی تقسیم دهم تغییر می کند یعنی که تغییر در خواص مکانیکی داریم. برای اینکه این خواص را حالت اول برگردانیم به Anneal کنیم.

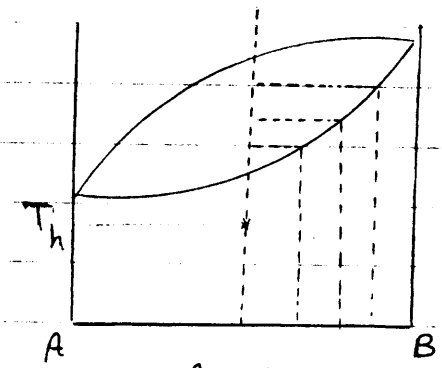


سیکل حرارتی Annealing هم تقسیم بر این است که یک زمان گرفتن (زمان Annealing) حرارت می دهیم یک زمان نگه داشتن (زمان Annealing) دمای آن را نگه می داریم و بعد به تدریج سرد می کنیم. این cycle را Annealing می گویند. حالا ممکن است چه چیزی از این Annealling داریم انتظار داشته باشیم. یکی از آن ها این است که می تواند Homogenization (Recrystalization & stress relief) یکبار دیگر تنش زدایی و یکبار هم دیگر تبلور مجدد. یعنی cycle همه این ها یکی است. گرم کردن تا یک دمای نسبتا بالا و سرد کردن تدریجی. تنها تفاوت

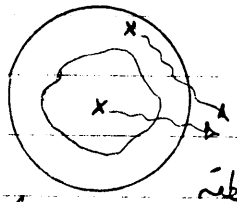
s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



%50A
%50B



ترکیب این دو منطقه یکی نیست (توزیع ترکیب غیر یکنواخت)

آن عملیاتی نام گذاری کردیم شما در اینجا Homogenization عملیاتی دیدیم.
حالا اگر دیاگرام اتحال کامل دو فلز A و B را در نظر بگیریم
اگر ترکیب %50A و %50B را در نظر بگیریم و دمای
این جسم را سریع کنیم همه جای این جسم ترکیب %50 - %50 نیست
در واقع در هر دمایی یک فاز جامد در حال تعادل است که در شکل مشخص
شده است.
یعنی شما وقتی یک دانه شروع به انجماد می کند وقتی آنالیز کنیم ترکیب
دوست با هم یکی نیست. اگر مذاب را در نظر بگیریم چون
مذاب متلاطم است همگون می شود یعنی ترکیب آن با تعادل می رسد
اما در جامد اینطور نیست یعنی این سرعت به تعادل نمی رسد هرچند
دما بالاست، اما توزیع ترکیب یکنواخت نیست.
یعنی شما وقتی مذاب را در دمای ثابت نگه می دارید هیچ وقت
به تعادل نمی رسد یعنی توزیع ترکیب یکنواخت نمی شود. شما چنین
آنیلی می کنید که خیلی طولانی باشد چون ضرایب نفوذ جامد را
ندارد. این آنیل ها باید یک عملیات حرارتی annealing فرو بشن انجام شود که به آن
Homogenizing می گویند. یعنی باید خود جامد را گرم کنیم تا زیر دمای خود منحنی Solidus یعنی نباید مذاب به وجود آید
و مدتی نگه داریم (البته با اتمام آنیل) تقریبا داریم بگوییم که توزیع یکنواخت از ترکیب A و B خواهیم داشت
با این عملیات همگون کردن می توانند در این صورت $t_a = t_h$ ، $T_a = T_h$ یعنی دما و زمان برای این هدف
مشخص می شود.
یا مثلا یک قطعه ای را آسکاری کرده ایم، روی سطح قطعه کسری تنش های به وجود آمده. این قطعه ها باید بس
زدایی کنند. به این نوع annealing تنش زدایی یا Stress Relief می گویند.
هدف ما در اینجا بیشتر عملیات Recrystalization است. یعنی برای هر فلز یا آلیاژی می توانیم
یک دما و زمان مشخص تعیین کنیم که آن فلز یا آلیاژ با ساختار اولیه برگردانده. یعنی اگر تغییر شکل پلاستیک
به قطعه ای داده شده باشد این عملیات را انجام می دهیم تا این امر برداشته می شود.
ما هر این عملیات ها را برای تغییر اندازه دانه ها انجام می دهیم. بر اساس میزان تغییر شکل پلاستیک می توانیم
دما و زمان را مشخص کنیم.

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۸۴/۹/۶ "جلسه هفدهم"

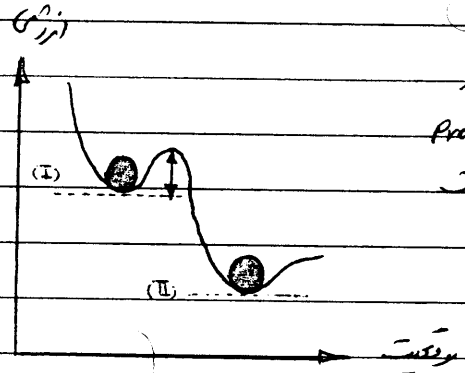
"Annealing" جسم تغییر شکل یافته و

تفاوت دو تغییر شکل پلاستیک خواص فیزیکی و مکانیکی تغییر می‌کند:

ـ کاهش استحکام ـ کاهش تنش تسلیم ـ افزایش toughness ـ کاهش مقاومت الکتریکی	Annealing	ـ افزایش استحکام ـ افزایش تنش تسلیم ـ کاهش ازدیاد طول ـ کاهش toughness ـ افزایش مقاومت الکتریکی
تغییر شکل پلاستیک		تغییر شکل پلاستیک

دو واقع annealing کاربرد بیشتر عکس می‌شود

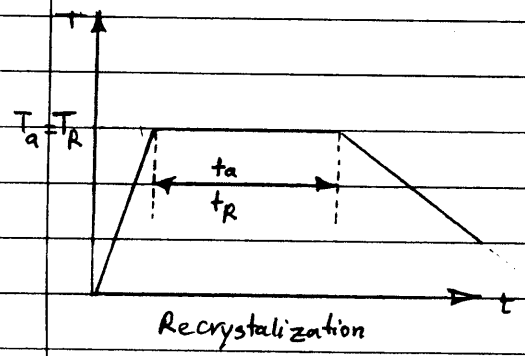
یعنی خواص ایجاد شده در جسم تغییر شکل یافته که در اثر افزایش انرژی در جسم (ذخیره انرژی) درآن بوجود آمده با آنیل کردن برمی‌گردد. یعنی وقتی anneal می‌کنیم در جهت کاهش انرژی با یعنی تعادل نمی‌رویم می‌کنیم. یعنی وقتی anneal می‌کنیم به سیستم انرژی می‌دهیم تا انرژی آن کاهش یابد. چون خود سیستم تمایل به انرژی بالایی قرار دارد باید مقداری انرژی به آن به جسم چون برای شروع Process یک انرژی activation لازم است. مثلاً انرژی که به جسم جهت حرکت رسم کنیم. جسم با دو حالت تغییر شکل یافته (حالت I) و یک تعادل نمی‌تواند به سطح انرژی آن مثلاً باشد



وقتی می‌خواهیم به حالت تعادل نمی با انرژی پایین‌تر یعنی حالت II، برسیم باید از یک سد انرژی عبور کنیم و این همان دمایی است که باید به جسم بدهیم

پس انرژی یا در Annealing تأمین انرژی activation شروع process است. با توجه این انرژی جسم متوجه می‌شود انرژی آزاد می‌کند بنابراین annealing به جسم می‌توضیح دادیم. برای برگرداندن خواص مکانیکی در نتیجه عملیات Recrystalize استفاده می‌کنیم.

اگر بخواهیم این عملیات را به صورت شماتیک توضیح دهیم،

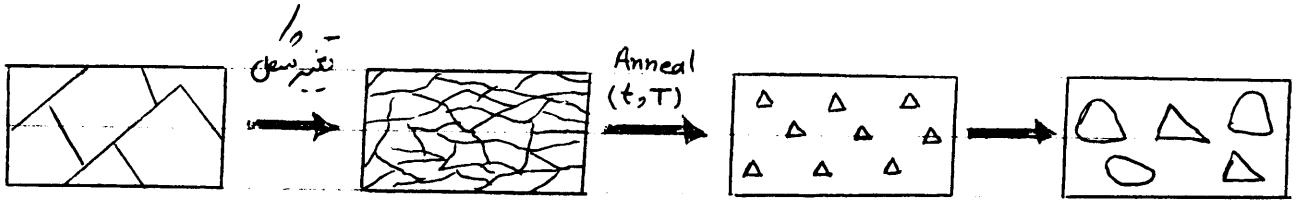


یک Block از یک جسم با خواص فیزیکی و مکانیکی مشخص در نظر می‌گیریم این جسم را تغییر شکل پلاستیک می‌دهیم در اثر این تغییر شکل دانسیته نابجایی‌ها افزایش می‌یابد یا دانسیته نقص بالا می‌رود و مثلاً نظم افزایش پیدا می‌کند. در این جسم استحکام، تنش تسلیم و مقاومت الکتریکی بالا رفته و خواص پیدا کرده.

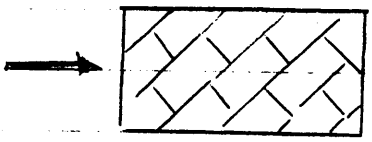
اگر بخواهیم خواص شبیه بر گردد با برگرداندن زمان (annealing) اینکار را انجام می‌دهیم.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



*(مراحل در شکل « رشد جوانه » و « بهم پیوستن جوانه‌ها و تشکیل دانه‌های جدید » با نام Recrystalization توضیح داده شده است)



« بهم پیوستن جوانه‌های جدید و تشکیل دانه‌های جدید »
Recrystalization(II) *

اولین اتفاقی که می‌افتد این است که بعضی از هسته‌های جانبدار جدید در واقع جوانه‌های جدید در این جسم به وجود می‌آید در واقع جوانه‌های دانه‌های جدید به وجود می‌آید که از نظر تنش به سطح پایین‌تری قرار گرفته‌اند.

این جوانه‌ها در جاهایی به وجود می‌آیند که بیشترین انرژی را دارند (و یا اینکه در اثر تغییر شکل مرزدانه به وجود می‌آیند، چون در واقع نزدیک شدن دانه‌ها در اثر حرکت مرزهاست. یعنی مرز حرکت می‌کند که قسمتی از انرژی‌های فشش (هد) مرحله بعدی رشد جوانه‌ها است. در اینجا جوانه‌ها بزرگ می‌شوند یعنی قسمت‌هایی که دانسیته عیوب بالایی دارند کمتر می‌شوند. در واقع مناطق با دانسیته عیوب کمتر بزرگتر می‌شوند.

مرحله نهایی تشکیل دانه‌های جدید است یعنی در واقع بهم پیوستن جوانه‌های جدید و تشکیل دانه‌های جدید. از این به بعد اگر مرحله‌ای داشته باشیم، مرحله رشد است.

یعنی بعد از تغییر شکل پلاستیک جوانه‌ها به وجود می‌آیند رشد می‌کنند، بهم می‌رسند و دانه‌های جدید به وجود می‌آید و بعد دانه‌ها رشد می‌کنند.

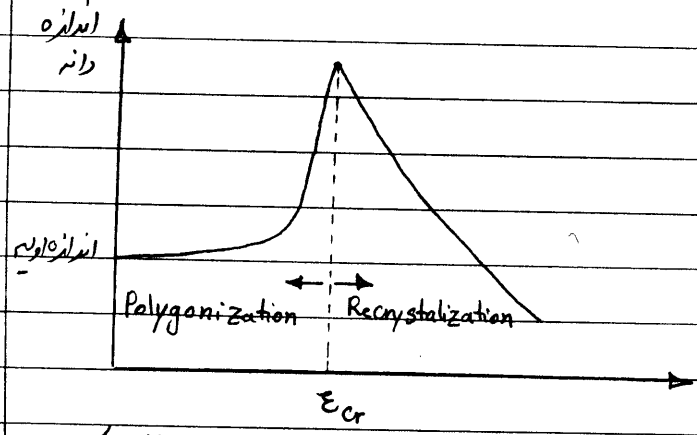
سؤال: اندازه دانه‌ها بستگی خواهد داشت به تعداد جوانه‌ها، یعنی هر چه جوانه‌ها تعدادشان بیشتر باشد اندازه دانه ریزتر خواهد شد. و هر چه تعداد جوانه‌ها کمتر باشد اندازه دانه‌ها درشت‌تر خواهد بود.

تعداد جوانه‌ها هم بستگی به درصد تغییر شکل پلاستیک دارد یعنی هر چه درصد تغییر شکل بالاتر باشد جوانه‌ها بیشتر تشکیل می‌شوند چون محل‌های بیشتری برای تشکیل جوانه وجود دارد. بنابراین اندازه دانه نهایی بستگی دارد به درصد تغییر شکل پلاستیک. هر چه درصد تغییر شکل پلاستیک بیشتر باشد تعداد جوانه‌ها بیشتر و دانه‌ها ریزتر شده (درجه بندی شده) یعنی مثلاً یک جسم در دمای T_1 و در مدت زمان t_1 annealing می‌کنیم یعنی شرایط شبیه است که ما جسم هر چه تغییر شکل پلاستیک بیشتر باشد دانه‌ها ریزتر شده. اگر T و t متفاوت باشند نمی‌توانیم اینطوری مقایسه کنیم.

پس این process می‌تواند برای ریز کردن دانه‌ها کاربرد داشته باشد و ما وقتی داریم می‌خواهیم دانه‌بندی را کنترل کنیم نوردی می‌کنیم بعد anneal می‌کنیم و دانه‌بندی مورد نظر را می‌رسیم.

نکته: برای به وجود آمدن دانه‌بندی جدید یک تغییر شکل اولیه لازم است، هر تغییر شکلی نمی‌تواند منجر به تشکیل دانه‌بندی جدید شود. یک مرز برای شروع این process یک تغییر شکل اولیه لازم است.

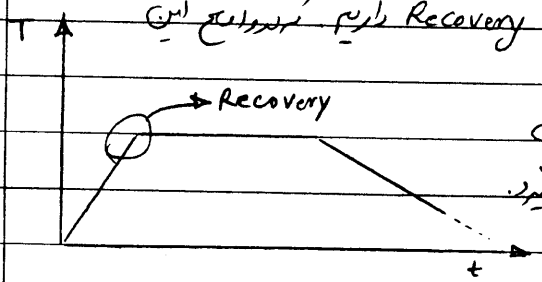
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



از بخش اندازه دانه بر حسب درصد تغییر شکل سرد بحث کردیم و اندازه دانه اولیه را مشخص کردیم (سایر نقاط اندازه دانه بعد از تغییر شکل سرد بدست آمدن می دهد)، منحنی شکل رو به رو می رسیم: (از لحاظ تئوری ε_{cr} نقطه ضعیف Sharp ای است.)

یعنی ثابت درصدی تقریبا اندازه دانه ها تغییر نمی کند. یعنی تقریبا اندازه دانه ها ثابت است بجز در یک تقریبا نقطه ای تغییر شکل سرد باعث بوجود آمدن تبلور مجدد می شود. درست ع ضعیف اولین جوانه ها ظاهر می شوند. اندازه اولین جوانه ها ظاهر می شود یعنی اندازه دانه ها درشت می شوند. چون از لحاظ تئوری جوانه های جدید اصلی تشکیل می شوند و این جوانه ها تمرکز دانه های زیادی بوجود می آورند. لذا این ع هر چه جلوتر برویم جوانه های بیشتری تشکیل می شوند و دانه ها ریز ترند. بنابراین تعداد جوانه ها بیشتر و اندازه تغییر شکل بیشتر دارد. اما یک درصد تغییر شکل لازم است تا جوانه زنی صورت گیرد و عمل Recrystalize انجام شود. بعد از این ع هر چه درصد تغییر شکل بیشتر باشد دانه های ریزتر خواهند شد و در حالت شبیه (annealing) التهاب اول تغییر شکل تاثیر گذار است. نواحی مرزدانه ای بعنوان جوانه زا عمل می کنند و باعث ریزتر شدن دانه ها می شود. برای اینکه بوجود آمدن جوانه ها تسریع کنیم. (دو واقع نقطه ε_{cr} را اگر بتوانیم زودتر به آن نزدیک شویم عملا تغییر شکل بیشتر باشد یعنی جوانه زنی ما بیشتر و دانه ها ریزتر)

دو اثر عمده بر درصد ع داریم، و این اصلی تاثیر گذار بر اندازه دانه ها بصورت همزمان است و این دو تاثیر ما خیلی بیشتر از زمان است. درصد تغییر شکل سرد بر اندازه دانه ها هم تاثیر دارد. یکی از تفاوت های تاثیر گذاری این دو اینست که درصد ع مهم است. یعنی باید حتما تغییر شکل بیشتر از ع داشته باشیم تا دانه بندی مجدد شکل بگیرد. اگر ع نداشته باشیم دانه بندی مجدد بوجود نمی آید.



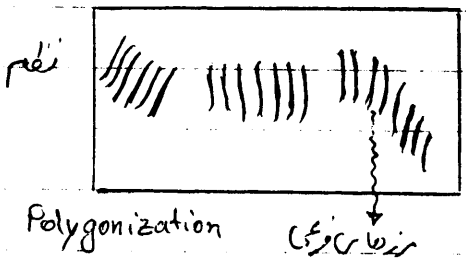
قبل از شکل گیری جوانه ها و یا در حین شکل گیری جوانه ها یک منطقه Recovery داریم که دو اتم این منطقه، منطقه بازیابی خواص فیزیکی است. در حین بازیابی عوض نقطه ای متعادل می رسند در عوض خط تغییر جهت می دهد. این وضعیت است که ممکن است در حین گرم کردن هم اتفاق بیفتد. وضعیت دوم مرحله Recrystal شدن یا تبلور مجدد است. وضعیت سوم رشد دانه است.

بعد از annealing خواص فیزیکی و مکانیکی حالت تعادل برگشته، استفاده از لفظ "تعادل" بهتر از حالت اول است زیرا نهایتا دانه بندی ما با دانه بندی اولیه متفاوت خواهد بود. یعنی هر کدام خواص مکانیکی خاص خودشان

s.a.m

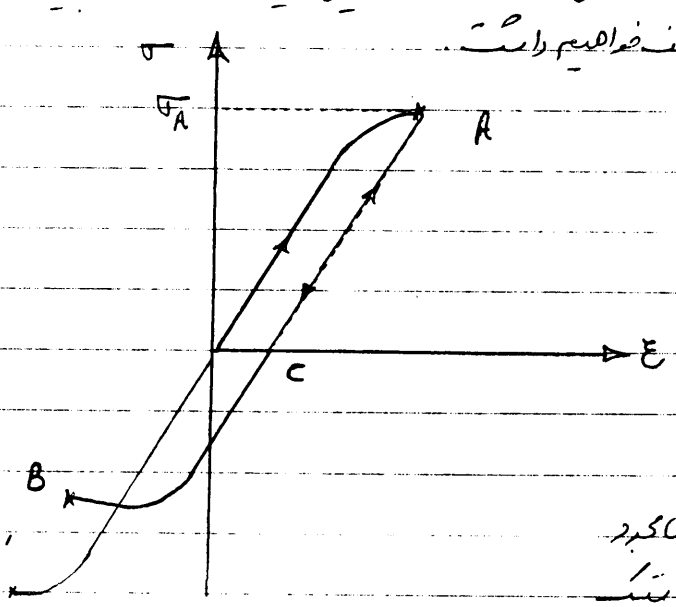
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

دارند. مثلاً Al با دانه بندی بسیار خواص مکانیکی متفاوتی با Al با دانه بندی متوسط دارد.
حالا بررسی می کنیم که قبل از رسیدن ε_{cr} چه اتفاقاتی افتاد. قبل از رسیدن ε_{cr} هیچ تغییری در دانه بندی بوجود نمی آید. در جایی که نابجایی وجود دارد (چون داریم تغییر شکل پلاستیک می دهیم)
وقتی این کار مقطعی به حدی نرسید که جوانه ایجاد شود (یعنی به ε_{cr} نرسیم) در این صورت با اثر دما و زمان نابجایی ها تمایل آرایش خاصی می گیرند که در تعادل مکانیکی باشند. یعنی آرایش خاصی می گیرند که تنش های بین خودشان را حذف کنند. یعنی بصورت مرزهای فرعی درمی آیند.
پس نابجایی ها آرایش خاصی بخود می گیرند که همان مرز فرعی را بوجود می آورند و نیروی مکانیکی بین خود را Min می کنند. به این Polygonization می گویند. یعنی نابجایی ها به اشکال مختلف درمی آیند که انرژی را کاهش دهند. یعنی وقتی با نظم قرار می گیرند یک کاهش انرژی داریم. یعنی یک تعادل نسبی داریم. پس اثر دما و زمان روی این جسم باعث نابجایی ها با Polygonization است. (البته ممکن است دوباره این دما و زمان انرژی داخلی نابجایی ها را زیاد کند اما در هر صورت نابجایی های این جسم با تا حد تعادل است) بنابراین قبل از ε_{cr} جسم Polygonize می شود و بعد از آن Recrystalize.



اثر باوشینگر «Bauschinger Effect»

این اثر مربوط است به واکنش جهت تغییر شکل پلاستیک. نحوه تغییر شکل پلاستیک جهت اعمال نیرو را دارد. میزان تغییر شکل پلاستیک در یک تنش ثابت در جهت اعمال تنش دارد. یعنی این اثر می خواهد بگوید ما اگر در جهت های مختلف تنش اعمال کنیم، کرنش های مختلف خواهیم داشت.
مثلاً تنش کرنش زیر را در نظر می گیریم، تنش های مثبت، تنش های فشاری هستند.
اگر یک جسم را تغییر شکل دهیم یعنی، آن تنش را وارد کنیم به نقطه تغییر شکل A برسیم.
حالا تنش را حذف کنیم یک برگشت داریم و مقداری تغییر شکل پلاستیک
حالا اگر همین جسم را مجدداً تحت تنش کشش قرار دهیم انتظار نقطه A خواهد بود. یعنی دوباره داری کرد تنش تسلیم با نقطه A خواهد بود (می دانیم تغییر شکل پلاستیک باعث تغییر تنش تسلیم می شود)



- حالا اگر همین جسم تحت کشش قرار ندهیم، بلکه آن را تحت فشار قرار دهیم، از نظر تئوری اگر تسلیم مجدد را در این تنش ها داشته باشیم تنش تسلیم فشاری، وقتیست همان نقطه متناظر با A یعنی A' خواهد بود. یعنی تغییر شکل پلاستیک

S.J.T
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

بعد از برداشتن تنش اعمالی تغییر شکل برگشت پذیر خواهد بود یعنی نمونه به طول اولیه خود برمی‌گردد.

- حالا اگر این جسم را تحت تنش کششی قرار دهیم بعد از برداشتن تنش به نقطه B می‌رسیم. بعد از نقطه B جسم دوباره تحت تنش قرار می‌گیرد (منفی فرض شده) و این بار حالت تنش تسلیم خیلی کمتر از حالتی خواهد بود که بدون کشش اولیه تحت تنش قرار دادیم. یعنی تنش تسلیم با نقطه B خواهد بود که تنش آن خیلی کمتر از نقطه A است.

یعنی وقتی جهت اعمال تنش را عوض کنیم جسم خیلی زودتر تغییر شکل پیدا خواهد کرد. به این پدیده اثر بوشینگر گویند.

در نمودار کرنش می‌بینیم که جسم را یکبار تحت نیروی کشش و بار دوم در جهت دیگر، یعنی وقتی جهت را عوض می‌کنیم تغییر می‌شود و تغییر شکل آسانتر.

دلیل این پدیده وجود تنش‌های باقی‌مانده است (Residual stress).

وقتی جسم را تحت تأثیر تنش کششی تغییر فرم می‌دهیم نابجایی‌ها شروع به حرکت می‌کنند. نقطه A را نقطه تسلیم می‌گویند. چون از این نقطه به بعد نابجایی‌ها زیاد می‌شوند، تقسیم‌بندی نابجایی‌ها را از نظر Frank-Read از تنش تسلیم به بعد فعال می‌شوند. یعنی قبل از تنش تسلیم نابجایی‌ها از این مکانیزم پیروی نمی‌کنند. بنابراین در نقطه A یک نابجایی خاص داریم. با وصل کردن نابجایی‌ها با تنش کمتر از نقطه A وجود دارد (τ_A) قابل حرکت نیستند. یعنی برای اینکه حرکت انجام شود باید تنش را افزایش دهیم تا حرکت از سر بیدا کند. یعنی همه نابجایی‌ها در نقطه A حرکت نمی‌کنند. در اینجا دو حالت وجود دارد:

۱- نابجایی‌ها شدت موانع متفاوتی دارند.

۲- یک سطح لغزش وجود دارد که صفر تنش روی آن اعمال شود، مقدار تنش کمتری را می‌بیند.

در هر دو حالت اگر تنش را از این راهیم یا تنش را تغییر کرایی می‌کنیم نابجایی‌ها حرکت می‌کنند، یا نابجایی‌ها گیر کرده وجود دارد.

شیب شکل بیشتر می‌شود نابجایی‌ها صعودی می‌کنند.

به هر دلیل با افزایش تنش حرکت ادامه پیدا می‌کند.

تغییر شکل هم ادامه پیدا می‌کند. در حالتی که دیگر تنش وجود ندارد تنش مانع یک تراکم تنش به وجود می‌آید.

وقتی تنش اعمالی را عوض می‌کنیم (در دیاگرام نقطه A صفر تنش می‌گیریم) این نابجایی‌ها یک هزارم ثانیه یک دارند. اما با اعمال یک تنش معکوس می‌ماند (یعنی جلوی تراکم نابجایی‌ها را داده‌اند) تنش‌های یک تنش باقی‌مانده‌اند این تنش معکوس حالت تنش را حالت اعمال کرده بودیم حالا اگر جهت اعمال تنش را عوض کنیم یعنی حرکت نابجایی‌ها در جهت عکس انجام شود.

بنابراین حرکت نابجایی‌ها خیلی زودتر خواهد بود چون اثر آن مانع دیگر تنش نیست. یعنی وقتی تنش کمی برای حرکت خواهد کرد.

نکته مهم: این که جسم نابجایی‌ها در جهت عکس حرکت می‌کنند منظور این نیست که نابجایی‌ها می‌روند یعنی دیگر نابجایی نداریم. وقتی یک نابجایی با مانع برخورد می‌کند و ما جهت را عوض می‌کنیم (جهت اعمال تنش) حرکت در جهت عکس هم از دیاد طول است یعنی نابجایی از دیاد طول ایجاد می‌کند یعنی تغییر شکل پلاستیک. در جهت عکس هم تغییر شکل پلاستیک ایجاد می‌کند. اگر جسم را به حالت اولیه برگردانیم منظور این نیست که به حالت اولش برگردد.

s.a.m

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

بلکه این برگشت قسمی از زمان طول و تغییر شکل پلاستیک است. درواقع در این حالت نابجایی ها با تنش کمتری شروع به حرکت می کنند تا تغییر شکل پلاستیک به وجود آورند. یعنی تنش های پسماند کمک می کنند تا تنش ما جهت اعمال تنش را عوض می کنیم، جسم سریعتر تسلیم شود و حرکت نابجایی راحت تر انجام پذیرد. زیرا نابجایی در جهتی حرکت می کند که دیگر تراکم تنش وجود ندارد. یعنی تنش های پسماند در اینجا به جای اینکه در مقابل تنش ما باشند، در جهت تنش ما هستند بنابراین:

$\tau_e = \tau_{ap} + \tau_r$ (applied str) تنش کرانی در این حالت مجموع تنش اعمال شده

است و تنش پسماند (Residual str). یعنی تنش پسماند کمک می کند که نابجایی ها زودتر حرکت کنند. یعنی تنش اعمال شده ما سریعتر تنش کرانی را فراهم می کند.

نه اینکه نابجایی ها تحریک شده به حالت اولیه برگردند. برگشت نابجایی به حالت اولیه در اینجا مفهوم ندارد. بلکه نابجایی قبلاً در یک جهت حرکت می کرد و حالا در یک جهت دیگر حرکت می کند. (البته قسمی از نابجایی در جهت عکس حرکت می کند ولی ما جهت عکس در همان ابتدا حذف شده است، منظور ما این است غیر از جهت اولیه) تنش پسماند به نابجایی کمک می کند که در جهت تنش اعمالی حرکت کند. یعنی تنش پسماند اگر به تنهایی می توانست نابجایی را حرکت دهد، آن را حرکت می داد تا اینکه برگشت الاستیک کند و وقتی برگشت الاستیک تمام شد دیگر پسماند نمی تواند نابجایی را حرکت دهد. یعنی یک تنش باید باشد تا اعمال کنیم تا نابجایی در جهت عکس حرکت کند.

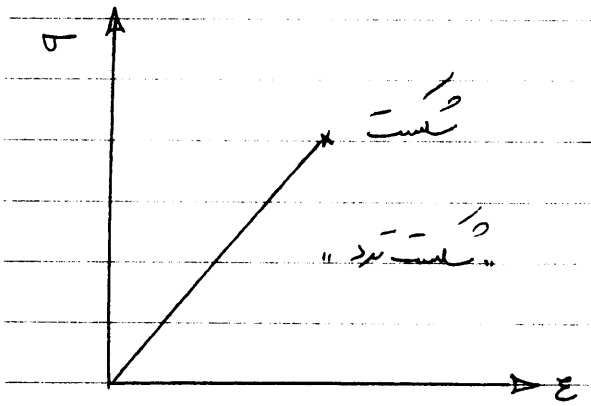
"مقدمه ای بر شکست"

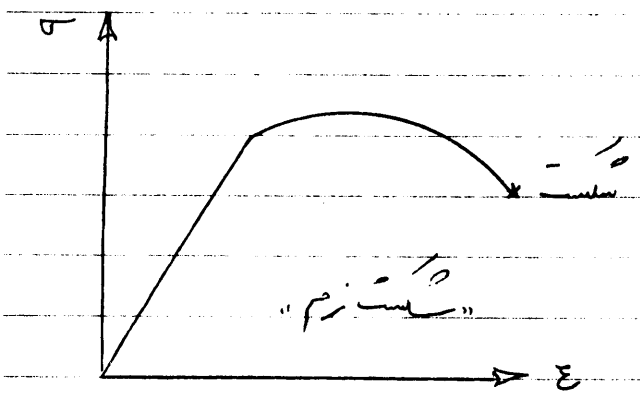
وقتی منحنی تنش-کرنش را در نظر می گیریم، در یک تنش جسم می شکند و جسم تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست نمی توانیم این شکست ها را تقسیم بندی کنیم. اگر قبل از شکست جسم تغییر شکل خوبی داشته باشد، به شکست آن "شکست نرم" می گویند.

اگر قبل از شکست جسم هیچ تغییر شکل پلاستیکی نداشته باشد آن "شکست ترد" می گویند.

در شکست نرم چون تغییر شکل پلاستیک داریم، معمولاً قابل پیش بینی است. یعنی جسم دیگر جا گذاری می شود و بعد می شکند، یعنی جسم قبل از شکست تغییر شکل ظاهری قبل از شکست پیدا می کند و بعد می شکند.

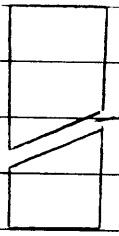
اما در شکست ترد، تغییر شکل ظاهری نداریم چون در محدوده الاستیک است. بنابراین یک شکست ناگهانی است می تواند بسیار خطرناک و فاجعه آفرین باشد چون قابل پیش بینی نیست. به همین علت روی شکست ترد خیلی کار شده است.





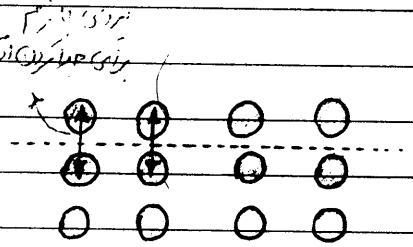
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

وقتی یک جسم تحت تنش قرار می‌گیرد، انرژی ذخیره شده در آن به صورت انرژی کرنشی ظاهر می‌شود. انرژی کرنشی در واحد حجم را چگالی انرژی کرنشی می‌نامند.



سطح شکست

سطح شکست می‌تواند صورت‌های گوناگونی داشته باشد. مثلاً در شکست ترد، سطح شکست صاف و عمود بر راستای تنش اعمالی است. اما در شکست نرم، سطح شکست ناصاف و مورب است.



۸۴/۹/۸

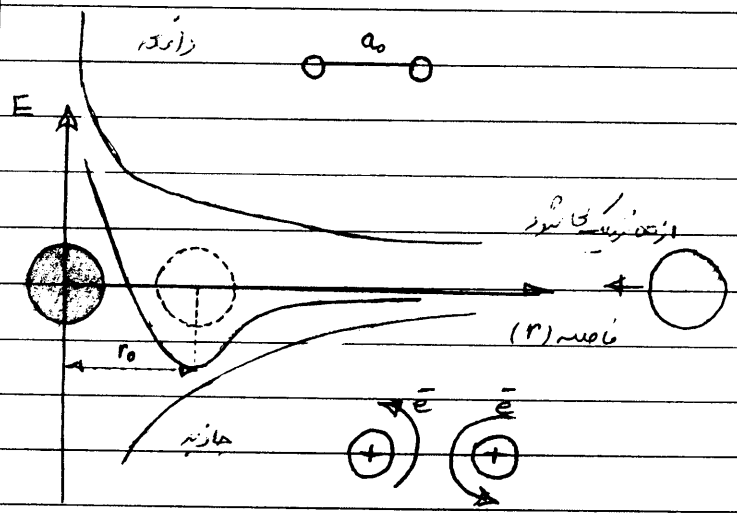
«جلسه دوم»

«شکست ترد»

(Brittle Fracture)

تنش چسبندگی تئوری (σ_c):

تنش لازم برای جدا کردن دو اتم یک ماده است که با دخیل دادن نیروهای جاذبه و دافعه بین اتم‌ها از محاسبات تئوری انرژی سطح شکست تئوری برای جدا کردن اتم‌ها و این تنش چسبندگی محاسبه کرد



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در هر شبکه بلوری یک یا چند شبکه داریم (a_0). ما دانیم a_0 یا فاصله اتم‌ها در بلور همیشه ثابت و معین نیست، بلکه محل تعادل برایند نیروهای اتم‌های آن ساختار اتمی است. اگر سیستمی را در نظر بگیریم که فقط شامل دو اتم است و نیروی اتمی آن‌ها به فاصله‌ی دو اتم بستگی دارد، می‌توانیم یکی از اتم‌ها را ثابت در نظر گرفته و اتم دیگر را از فاصله‌ی بی‌نهایت به آن نزدیک کنیم. در این سیستم هر اتم هم با بار مثبت دارد و با منفی. وقتی به هم نزدیک می‌شوند نیروی جاذبه بین هسته‌ی یک اتم با الکترون‌های اتم دیگر وجود دارد و یک نیروی دافعه بین دو هسته و الکترون‌های دو اتم. نیروی جاذبه و دافعه را به صورت شماتیک رسم می‌کنیم. مجموع این دو نیروی جاذبه و دافعه در یک فاصله‌ی r_0 از یک Min می‌گذرد. جایی که مجموع این دو نیرو Min است یعنی نیروی بین دو اتم صفر است. بنابراین a_0 در شبکه بلوری به این روش تعیین می‌شود، یعنی جایی که این اتم‌ها دیگر هیچ نیرویی به هم وارد نمی‌کنند

حالا یک منحنی برای جدایی دو اتم رسم می‌کنیم. ابتدا نیرو (تنش) برحسب فاصله رسم می‌کنیم. می‌بینیم که حداکثر تنش از یک Max می‌گذرد و بعد به سمت صفر می‌رود. تنش متناظر با این نقطه را σ_c می‌نامیم، یعنی Max تنشی که باید به دو اتم وارد کنیم تا از هم جدا شوند.

در اینجا فرض می‌کنیم که این تنش یا نیرویی که وارد یک نیروی شناوری است. یعنی نسبت اولیه این تنش بخشی از یک تابع سینوسی است. اگر فاصله را x بگیریم می‌توانیم بنویسیم:

از Sin را با کسان برابر بگیریم (چون کسان کوچک است):

تغییرات σ را نسبت به فاصله می‌توانیم به دست آوریم.

از طرفی در محدوده‌ی الاستیک هستیم یعنی $\sigma = E\varepsilon$ است

از طرف دیگر می‌توانیم فرض کنیم $\varepsilon = \frac{x}{a_0}$ است.

چون از یک اتم به اندازه‌ی x به ϕ می‌شود $\tan\alpha = \frac{x}{a_0}$

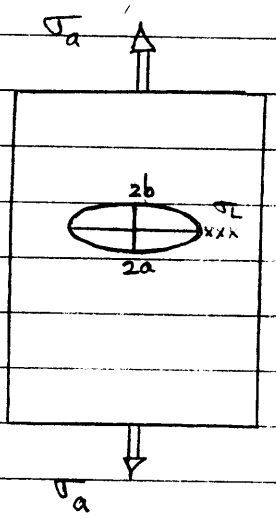
از طرف دیگر می‌توانیم λ را برحسب a_0 محاسبه کنیم

می‌توانیم $\lambda = 2a_0$ یا $\lambda = a_0$

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

وقتی نیاز داشته باشیم که دقت تنش‌های سازه‌ای را بسنجیم ($\frac{E}{\pi}$ یا $\frac{E}{2\pi}$)
یعنی تنش حساسیت‌زدایی (تنشی که برای جدا کردن این دو تنش لازم است) تنش خیلی زیاد است
این روش‌ها می‌توانیم با روش‌هایی که برای جداسازی به‌جای نظر گرفتیم مقایسه کنیم. یعنی تنش برای بوجود آمدن ناپیوستگی
واضح، لازم بود مقدار بسیار زیادی بود. این تنش تئوری در نظر گرفته شده بود. هرچند این عدد یک عدد
تئوری است اما عدد واقعی را نشان می‌دهد.
وقتی یک نمونه با دقت تنش تئوری (تنش حساسیت) σ_F را می‌سنجیم این σ_F خیلی
کوچکتر از σ_Z است که حساب کردیم یعنی تنش شکست از تنش حساسیت تئوری خیلی کمتر است. بنابراین ما این مسئله
ترجیح می‌دهیم که این‌طور باشد:
$\sigma_F \ll \sigma_Z$
یعنی چرا تنش ظاهری شکست از تنش تئوری آن خیلی کمتر است؟
چون عیب‌هایی که وجود دارد بسیار کوچک‌تر هستند از عیب تئوری که ما در نظر گرفتیم. تنش تئوری برای عیبی بود
که $\frac{E}{16}$ تا $\frac{E}{20}$ بود که تنش بسیار بزرگی بود. در حالی که این عیب‌ها خیلی کوچک‌تر و تنش‌های
کمتری را هم می‌شود تحمل کرد و عیب‌هایی هست که می‌شود خیلی راحت‌تر از آن عبور کرد یعنی تنش لازم برای
بوجود آوردن عیب در حدود $\frac{E}{1000}$ بود.



« تانسور تنش »
حالتی که تنش تک‌محوره است تانسور تنش تعریف می‌کنیم.
در این صورت که جسم تحت دو نیرو قرار می‌گیرد
در داخل این جسم تحت یک حفره بیضی شکل به وجود می‌آوریم
که قطر بزرگ این بیضی $2a$ و قطر کوچک آن $2b$ خواهد بود
این جسم هنوز تحت تأثیر تنش اعمالی σ_a قرار دارد
تنش که در نتیجه این بیضی بر روی جسم احساس می‌شود
خیلی بیشتر از تنش اعمال شده است.
یعنی تنشی که ما اعمال می‌کنیم در انتهای قطر بزرگ بیضی به دلایلی
بیشتر می‌شود. یعنی:

$\sigma_L = \sigma_a(1+\frac{2a}{b})$

σ_L تنش موضعی (Local) است در دو انتهای قطر بزرگ بیضی
σ_a تنش اعمالی (applied) است
a: نصف قطر بزرگ بیضی
b: نصف قطر کوچک بیضی
این تئوری به ما می‌گوید تنش در انتهای قطر بزرگ بیضی چندین برابر تنش اعمالی است ($a>b$)

$\rho = \frac{b^2}{a}$

ρ: شعاع انحنای قطر بزرگ بیضی
(انتهایی)

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

$b = \sqrt{a\rho}$

می خواهیم طول ترک را حذف کنیم:

ضریب $(1+2\sqrt{\frac{a}{\rho}})$ فاکتور تراکم تنش می نامند

$$\sigma_L = \sigma_a\left(1+\frac{2a}{\sqrt{a\rho}}\right) = \sigma_a\left(1+2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)$$

یعنی اینکه وقتی یک حفره بیضی شکل درون یک جسم وجود دارد در انتهای قطر بزرگ آن تنش اعمالی در یک فاکتور ضرب می شود.

$$\text{فاکتور تراکم تنش} = \left(1+2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)$$

یعنی در هر حالت $\sigma_L > \sigma_a$.

در لحظه شکست تنش را نظیر به این صورت تغییر می کند:

$$\text{لحظه شکست: } \sigma_c = \sigma_F\left(1+2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)$$

چون در لحظه شکست تنش که ما اعمال می کنیم همان تنش شکست است ($\sigma_a = \sigma_F$).

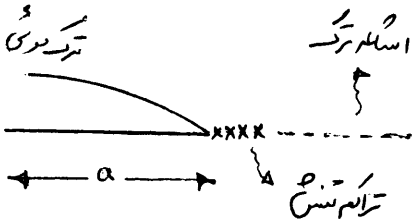
لحظه شکست ضریب ما (فاکتور تراکم تنش) به قدری بزرگ می شود که اگر تنش اعمالی ضرب شود همان تنش σ_c را برای ما ایجاد خواهد کرد (تنش جسم تسلیم می دهد)

حالا چرا درون جسم بیضی در نظر گرفتیم؟

زیرا درون جسم ترک های موئی وجود دارد که این ترک های موئی تنش همان بیضی را در درون جسم دارند. پس این ترک می توانیم a در نظر بگیریم[1].

در این حالت وقتی تنش اعمال می کنیم در انتهای ترک موئی تراکم تنش بوجود می آید و وقتی تراکم تنش ایجاد شد ترک شروع می کند به اشاعه پیدا کردن و جسم می شکند.

همانطور که در تغییر شکل پلاستیک، با جابجایی ها تغییر شکل (لغزش) را آسان می کردند، در شکست هم ترک ها شکست را آسان می کنند.



اگر بخواهیم رابطه را مجدداً در نظر بگیریم و ترک ما یک ترک موئی باشد:

$$\sigma_c = \sigma_F\left(1+2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)$$

چون ρ برای ترک موئی خیلی کوچک است، $\frac{a}{\rho}$ عدد خیلی بزرگی می شود و می توانیم از عدد 1 صرف نظر کنیم. بنابراین:

$$\sigma_c = \sigma_F\left(2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)$$

پس رابطه تنش شکست با a (طول ترک) و ρ (شعاع انحنای انتهای ترک) بدست می آید:

$$\sigma_F = \sigma_c \times \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\rho}{a}}$$

- اگر ρ کاهش پیدا کند، σ_F کاهش می یابد (جسم زودتر می شکند)
- اگر a افزایش پیدا کند، σ_F کاهش می یابد (جسم زودتر می شکند)

یعنی اینکه هرچه ترک تیزتر باشد (شعاع انحنا کم) جرم زودتر می شکند و هرچقدر طول ترک بزرگتر باشد جسم زودتر می شکند.

پس ترک های بزرگ تر قدرت بیشتری دارند در تراکم تنش در آن ها بیشتر است.

مثلاً اگر ترک های ایجاد شده در شیشه را در نظر بگیریم با کوچکترین نیروی، ترک ها اشاعه پیدا می کنند و حرکت می کنند.

منظور از اشاعه ترک جدایش دو سطح است. یعنی وقتی ترک اشاعه پیدا می کند، جدایش دو سطح ادامه پیدا می کند.

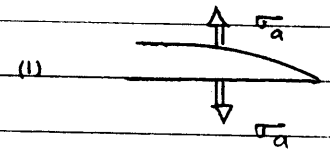
مثلاً در شیشه اگر ترک اشاعه پیدا کند نهایتاً شیشه دو تکه می شود.

(1) یک a و یک شعاع انحنا

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

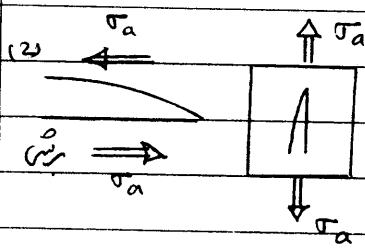
ما در اینجا بیشتر با خزش در اثر تنش برشی و در جهت عمود بر قطر ترک سر و کار داریم (عمود بر طول ترک)
اما در درون جسم ترک‌های متنوعی با جهت‌های مختلف و تنش‌های گوناگون وجود دارند.
این سه حالت را بررسی می‌کنیم:

1- جهت اعمال تنش عمود بر طول ترک باشد. در این حالت ترک را ناصیه‌ی بین دو صفحه جدا شده در نظر می‌گیریم. تنش برای جدا کردن این دو صفحه از هم کم است.

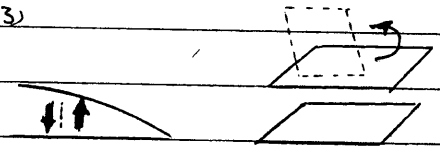


در این حالت تنش باعث رشد ترک می‌شود.

2- تنش را اعمال می‌کنیم در جهت طول ترک،
تنش برشی است. در این حالت دو سطح جدا شده با این تنش می‌خواهند روی هم بلغزند. در این حالت هم تنش است که عمل می‌کند.



3- تنش برشی در جهت موازی با ترک اعمال شود
این تنش می‌خواهد در سطح رو نسبت به هم کج شوند.
در این حالت هم ترک رشد پیدا خواهد کرد.



در هر سه حالت تنش رشد خواهد کرد. رشد ترک بستگی به این دارد که آن را در کدام یک از این سه حالت قرار دهیم. بنابراین وقتی جسم نیرو وارد می‌کنیم، وقتی که متعاقب تنش‌ها، هر کدام از این سه تنش رشد پیدا می‌کنند، بنابراین جسم می‌شکند.
بحرانی‌ترین حالت، حالت (1) است، و هم‌چنین حالت ترک با جهت σ_a که خواندید.
بنابراین در شکست تردد تنش شکست ظاهری از تنش تئوری خیلی کمتر است به دلیل وجود ترک‌های ریز داخل جسم.

«متغیرهای خارجی شکست»
منظور از خزش شکست در اینجا شکست تردد یا شکست غیر تردد است.

(1) دما (T):
هر چه دمای آزمایش پایین‌تر باشد شکست تردد‌تر است.

(2) وجود شیار:
نمونه‌های شیاردار تردد‌تر می‌شکنند. در آزمایش خزش هم با وجود نقوش شیار ایجاد می‌کنیم تردد‌تر می‌شکند.

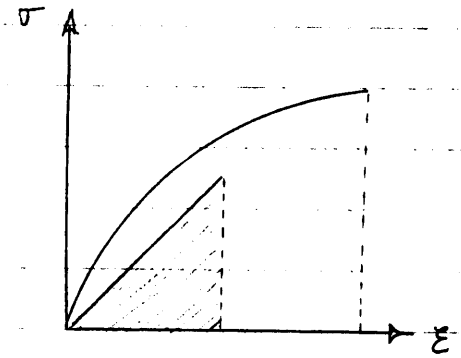
(3) سرعت اعمال تنش (سرعت بارگذاری)
هر چه سرعت اعمال تنش $\frac{d\sigma}{dt}$ بیشتر باشد، شکست تردد‌تر است. وقتی نیرو را خیلی سریع اعمال کنیم شکست تردد‌تر خواهد بود.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

وقتی ولتاژ بالایی بر یک مقدار انرژی گرمایی به سیستم منتقل می‌شود و این مقدار انرژی به انرژی کشش اضافه می‌شود اگر جسم ما کاملاً تردد نباشد و در آن یک ترک وجود داشته باشد، در اثر اعمال کشش در انتهای ترک یک تراکم تنش بوجود می‌آید و این تراکم تنش باعث بوجود آمدن یک تغییر شکل پلاستیک در آن نقطه می‌شود. وقتی منطقه تغییر شکل یافته بوجود می‌آید خود بخود از حرکت کردن ترک جلوگیری می‌کند. حداقل وقتی ولتاژ پایین است، تغییر شکل پلاستیک بوجود نمی‌آید و صفحه تردی حفظ می‌شود. اما وقتی ولتاژ بالا باشد، این انرژی به تغییر شکل پلاستیک کمک می‌کند و منطقه تغییر شکل یافته جلوگیری می‌کند از حرکت ترک و باعث آن شکل می‌شود.

"انرژی شکست"



از زیر منحنی ε-σ که در نظر بگیرم سطح زیر این منحنی متناسب با میزان انرژی است که در حال شکست یک ماده صرف شده البته تمام این انرژی جذب جسم نمی‌شود. در شکست تردد تنش زیادی و در این انرژی صرف خلق سطح جسم در حین آمدن و در شکست تنش زیادی از آن بصورت انرژی تغییر شکل یافته است.

هر چقدر انرژی شکست بیشتر باشد، آن جسم چقرتر است.

در اینجا نمی‌گوییم جسم نرم‌تر است بلکه می‌گوییم جسم چقرتر است. چقرتی (toughness) در مقابل تردی (Brittleness) بکار برده می‌شود. پس هر چقدر انرژی لازم باشد جسم تردتر است و هر چقدر بیشتر باشد جسم چقرتر است. پس می‌توانیم اجسام را با توجه به میزان انرژی ای که برای شکست آن‌ها صرف می‌شود، طبقه‌بندی کنیم.

اجسام در ارتباط با نحوه شکست:

(1) اجسام کاملاً تردد:

این اجسام toughness خیلی کمتری دارند و هیچ تغییر شکل پلاستیکی قبل از شکست در آن‌ها انجام نمی‌شود. یا این اجسام آمده‌اند و در آن‌ها مفهوم نابجایی معنی ندارد و یا اینکه نابجایی در آن‌ها وجود دارد اما نمی‌تواند حرکت کند. این مواد مثل شیشه یا الماس هستند.

(2) اجسام نیمه تردد:

میزان تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست در آن‌ها زیاد نیست. در این اجسام نابجایی وجود دارد و لی حرکت نابجایی در آن‌ها کم است مانند اجسام با شبکه B.C.C

(3) اجسام غیر تردد:

میزان تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست در آن‌ها خوب است و حرکت نابجایی‌ها در آن‌ها زیاد است مثل F.C.C ها.

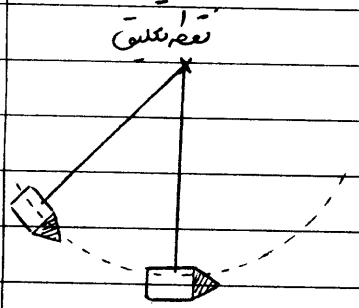
می‌بینیم که طبقه‌بندی ما در اینجا برحسب میزان تغییر شکل پلاستیک است. در تغییر شکل پلاستیک انرژی در جسم ذخیره می‌شود بنابراین طبقه‌بندی ما بر اساس انرژی است. وقتی جسمی تغییر شکل پلاستیک زیادی دارد

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

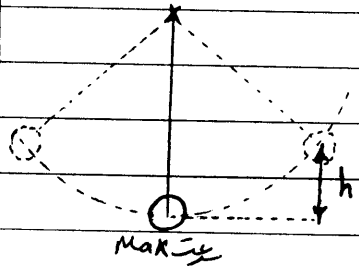
بدان اضربه زیادی وارد نشود، جسم به تغییر شکل پلاستیک نرسد و تغییر شکل پلاستیک ان کم است. ولیکن اگر به جسم ترک وجود داشته باشد تغییر شکل پلاستیک در اطراف ترک متمرکز دارد که باعث ایجاد مقاومت در آن ناحیه ترک می‌شود. هرچه تغییر شکل پلاستیک بیشتر باشد چقرمگی بیشتر است. چقرمگی یعنی مقاومت در برابر گسترش شدن. وقتی می‌گوییم جسم چقرمگی ندارد یعنی براحتی شکسته می‌شود (ایدئال ترد است)

وقتی به جسمی تنش اعمال می‌کنیم این تنش صرف راه‌های مختلف جسم توزیع می‌شود و بدان تغییر شکل پلاستیک بوجود می‌آید. وقتی به جسم ترد است و خواستیم با همین تنش به آن ضربه بزنیم (شتاب 1mm/sec² تغییر شکل می‌دهد) و این حالت تا آنجا تنش بوجود نیاید، هیچ ترک به آن صورت اثر نمی‌کند. ترک زمانی ایجاد می‌شود که جسم تسلیم نشده یعنی نتواند تغییر شکل دهد، بنابراین جاهایی که تنش‌ها زیاد است مثل ترک بوجود می‌آید. پس تا زمانی که تغییر شکل پلاستیک وجود دارد و اتفاق می‌افتد وجود ترک بدان صورت نبود نخواهد یعنی سخت است ترک وجود داشته باشد ولی نفوذ کند چندان ندارد.

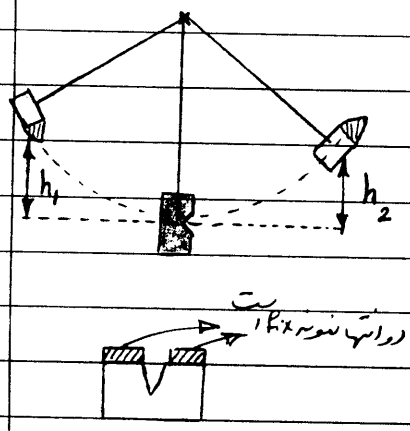
«ازمایش ضربه»



ازمایش ضربه یعنی مادی بسیار مهم است. روش ازمایش به این صورت است که یک چکش داریم که از یک نقطه آویزان است (نقطه تعلیق) چکش می‌تواند حرکت دورانی داشته باشد. آن را از یک ارتفاع h_1 رها می‌کنیم تا با سرعه نمونه برخورد کند و نمونه را بشکند (چکش در موقعیت آویز با نمونه برخورد می‌کند) و پس چکش تا یک ارتفاع h_2 بالا می‌رود. این اختلاف ارتفاع می‌تواند معیاری برای مقاومت جسم در برابر شکست باشد (انرژی صرف شده برای شکست جسم)



حرکت چکش مانند حرکت یک آونگ است بنابراین گفته که ارتفاع بی‌وزن آونگ از ان است و حول یک نقطه نوسان می‌کند. اگر از مقاومت هوا صرف نظر کنیم، طبق خاصیت قسم انرژی آن ثابت می‌ماند و صرفاً از Potential به Kinetic و برعکس تبدیل می‌شود. در موقعیت اولیه سرعت Max است و ارتفاع صفر است و در دو انتها ارتفاع آن Max است و سرعت صفر است. در مورد چکش هم به همین ترتیب است با این تفاوت که جاری‌ی بی‌وزن از یک میله فلزی استفاده می‌شود.



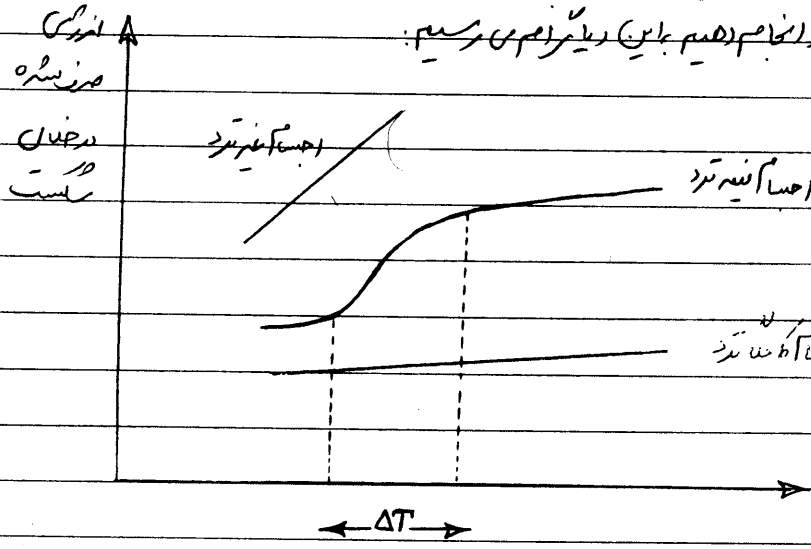
نمونه یک استاندارد است که ابعاد و شیار دارد که زاویه و عمق شیار استاندارد است. نمونه در وضعیت افقی قرار می‌گیرد و چکش در پشت شیار برخورد کند. نمونه در دو سمت Fix است و نیز تراز تعادل خود شیار رفتگی می‌کند تا نمونه از همان شیار براحتی و چکش به آن ضربه بزند. چکش بعد از اینکه با نمونه برخورد کرد و آن را شکست یک بالا می‌رود (ارتفاع h_2) یعنی اگر جسم نشکند

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

که آزمایش ضربه ست ولی ضربه شکننده و خیلی با انرژی زیاد (دهان باز نباشد) از ضربه آزمایش کشش ست.
مقدار $mg(h_1-h_2)$ میزان انرژی که شکست می‌تواند باشد. این یک آزمایش ساده است و چون جسم شکننده
دارد این مقدار انرژی که toughness نیست ولی معیاری از انرژی شکست است که می‌تواند برای مقایسه
بکار برود.

آزمایشی که گفتیم که انرژی صرف شده در حین شکست را مرتب با میزان دما نشان دهد و برای
اجسام ترد، نیمه ترد و غیر ترد این کار را انجام دهیم با این دیاگرام می‌رسیم:



(بطور کلی شکست)
جسم کاملاً ترد انرژی
کمی دارد. با افزایش
دما انرژی آن افزایش
می‌یابد (نه خیلی زیاد)
اجسام غیر ترد مثل fcc
انرژی بالایی دارند و دما
هم انرژی آن را بالاتر
می‌برد یعنی مثلاً وقتی Al
را تغییر شکل می‌دهیم در دمای
بالاتر خیلی راحت‌تر تغییر شکل می‌دهد. یعنی با افزایش دما toughness آن‌ها افزایش می‌یابد.
اما اجسام نیمه ترد رفتار غریبی دارند. در دمای پایین toughness کمی دارند و در دمای بالا toughness بالایی دارند
وقتی دما پایین است بصورت ترد می‌شکنند وقتی دما را از یک محدوده‌ای مثلاً ΔT بالاتر می‌بریم بصورت
نرم می‌شکنند. یعنی یک محدوده‌ای وجود دارد که این مواد انرژی خیلی نرمی را از خود نشان می‌دهند.
این محدوده دما را دمای انتقال (Transition Temprature) می‌گویند. یعنی انتقال انرژی خیلی کم.
برای اجسام نیمه ترد این دمای انتقال خیلی مهم است. بطوری که بتوان آن را قطعه‌ای بصورت ترد شکست
باید خیلی مواظب باشیم چون ممکن است فاجعه‌آمیز شود. چون ترک‌های اولیه است این مسئله تقویت
می‌شود که بصورت $\sigma_F = \sigma_c \sqrt{\frac{a}{2}}$ اندازه ترک‌ها را Detect می‌کنند (ترک‌هایی که خیلی مهم است)
یعنی قطعه دقیقاً تست می‌شود که ابعاد بحرانی ترک‌هایش چقدر است. یعنی ابعاد از یک حدی بزرگتر نباشد
باشد چون قطعه می‌شکند. پس ما باید دقیقاً بدانیم که آیا جسم ما بصورت ترد می‌شکند یا غیر ترد.
اگر بصورت ترد می‌شکند باید خیلی دقت کنیم. اما اگر بصورت نرم شکست خیلی نیازمند دقت نداریم. چون
ظاهر قطعه نشان می‌دهد که تاردی می‌شکند. بنابراین بحث دمای انتقال خیلی مهم است مثلاً
برای آزمایش ضربه (Sharping) مراقبت بیشتر می‌کنیم کافی است نمونه‌ها سرد کنیم و دماهای مختلف
زیر همگن تولید دهیم. این آزمایش در عین سادگی نتایج مهمی را بدست می‌دهد. هر چند یک آزمایش ضربه
است.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

۸۴/۹/۱۵ «جلسه نوزدهم»

مکانیزم‌های شکست از نقص‌های بلوری:

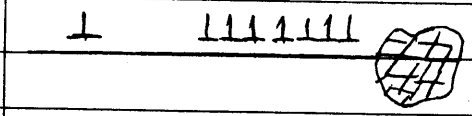
اصطکاک مرسیت تقسیم کردیم: اصطکاک ترمی، نیمه‌ترمی و غیرترمی.

نکته اصلی شکست عبور ترک‌های موئی از اتم‌های آن جاست. بر اصطکاک ترمی نقص‌های بلوری غیر ساختاری وجود دارد مثل همان ترک‌های موئی، حفره‌ها و حباب‌ها که می‌توانند تنش‌ها را شدت دهند یعنی تنش‌ها حفره‌های میکروسکوپی ساختاری هم می‌توانند شکست ایجاد کنند. بر این اساس چون تغییر شکل پلاستیک نداریم پارامتر عبور ترک عبوری می‌شود و جسم سریع می‌شکند.

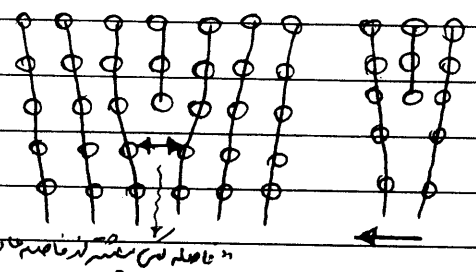
بر اصطکاک نیمه‌ترمی عبور ترک‌های موئی می‌توانند وجود داشته باشند، اما اولاً: اصطکاک ترمی بیشتر از تغییر شکل جسم دارد و حول این اصطکاک مقداری تغییر شکل می‌دهند و وقتی ترک موئی به نقاطی می‌رسد در راستای آن یک منطقه تغییر شکل یافته وجود دارد برای اینکه ترک نیش وجود دارد. خود به خود کندن منطقه تغییر شکل یافته می‌تواند اثر عبور ترک را کند کند. این را سختی یا toughness نیز نامیده می‌شود یعنی هر چقدر میزان تغییر شکل پلاستیک بیشتر باشد عبور ترک بیشتر مقاومت می‌کند و toughness بالاتری دارند. ممکن است ترک‌های وجود داشته باشند که تغییر شکل پلاستیک نکنند در راستای آن‌ها وجود ندارد بر این صورت مقاومت آن‌ها در برابر عبور ترک کم خواهد بود یعنی شکست بیشتر حالت تردی خواهد داشت. هر چه منطقه تغییر شکل یافته بزرگ‌تر باشد شکست بیشتر به صورت نرمی پیش می‌رود.

دومین اثر عبور ترک بستن یا بسته شدن ترک‌ها است که خود جسم هم دارد. بر اصطکاک نیمه‌ترمی میزان تغییر شکل پلاستیک و میزان مقاومت ذاتی خود جسم برای شکست اهمیت دارد.

نقص بعدی نقص‌های دو بعدی هستند که وجود دارند و آن هم حوزه‌های ترک است. بر اصطکاک نیمه‌ترمی نقاطی هم داریم که خنثی هم هستند یعنی ترک به وجود می‌آید. یکی از مکانیزم‌های جوانه‌زنی ترک به این صورت است که فرض می‌کنیم در یک منبع دارای نابجایی‌های مواجه هستیم که یک مانع وجود دارد



نابجایی‌ها حرکت می‌کنند و نابجایی‌های موازی هم‌علامت دفع می‌شوند و نابجایی‌های موازی هم‌علامت جذب می‌شوند. این منبع را منبع Frank Read نامیده می‌شود.



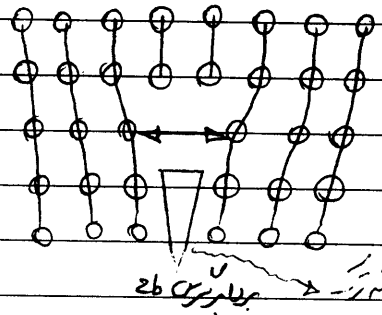
هم‌علامت‌ها جذب می‌شوند و نابجایی‌های غیر متحرک یا یک مانع Jomer cotrell

این نابجایی‌ها این حالت است که نابجایی‌ها هم‌علامت جذب می‌شوند و نابجایی‌ها از یک منبع هستند بنابراین یک نیروی دافعه بین آن‌ها وجود دارد و یک میدان تنش وجود دارد که این تنش تعداد نابجایی‌های انباشته شده هم دارد.

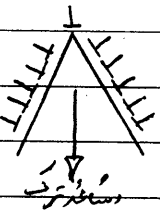
انباشتگی مکانیزم بوجود آمدن جوانه ترک به این صورت است که از ادغام چند نابجایی یک نابجایی بزرگ (مواد مرسی‌تر) و هر چه بیشتر این نابجایی بزرگ می‌توانند شدت تنش ترک باشد یک نابجایی بزرگ می‌تواند

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



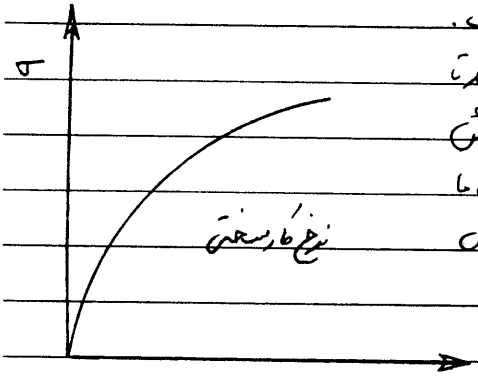
در بعضی از شبکه‌های راه‌آهن، فاصله‌ی تراورس‌ها در بخش‌های مختلف تغییر می‌کند. معمولاً در حالت عادی از فاصله‌ی تراورس‌های کمتری استفاده می‌شود و در نقاطی که احتمال تغییر شکل بیشتر است، فاصله‌ی تراورس‌ها کمتر می‌شود. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود. یعنی فاصله‌ی تراورس‌ها در نقاطی که احتمال تغییر شکل بیشتر است، کمتر می‌شود. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود. در این حالت، فاصله‌ی تراورس‌ها در نقاطی که احتمال تغییر شکل بیشتر است، کمتر می‌شود. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود.



در این حالت، فاصله‌ی تراورس‌ها در نقاطی که احتمال تغییر شکل بیشتر است، کمتر می‌شود. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود. در این حالت، فاصله‌ی تراورس‌ها در نقاطی که احتمال تغییر شکل بیشتر است، کمتر می‌شود. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود.

به طور کلی، تغییر شکل ریل‌ها در اثر تنش‌های ناشی از حرکت قطارها رخ می‌دهد. این تنش‌ها باعث می‌شوند که ریل‌ها به سمت جلو حرکت کنند. این حرکت را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: حرکت طولی و حرکت عرضی. حرکت طولی به سمت جلو و عقب است و حرکت عرضی به سمت چپ و راست است. در این حالت، حرکت طولی بیشتر از حرکت عرضی است. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود. در این حالت، حرکت طولی بیشتر از حرکت عرضی است. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود.

در این حالت، حرکت طولی بیشتر از حرکت عرضی است. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود. در این حالت، حرکت طولی بیشتر از حرکت عرضی است. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود.



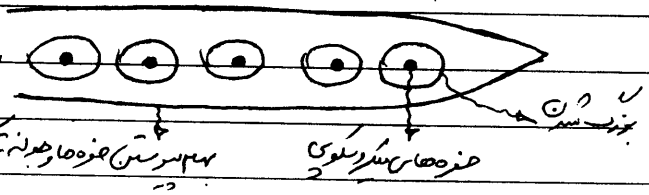
در این حالت، حرکت طولی بیشتر از حرکت عرضی است. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود. در این حالت، حرکت طولی بیشتر از حرکت عرضی است. به این حالت، حالت عادی گفته می‌شود.

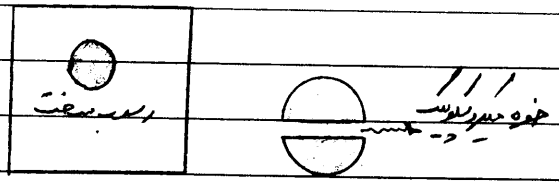
s.a.m

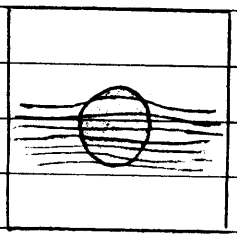
www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

و با تبرک های وجود دارد که انتهای آن ها تراکم تنش بوجود آمده و اما تغییر شکل پلاستیک هم نداریم انجام می شود. یعنی
شکست ترد تغییر شکل پلاستیک زیادی داریم. یعنی سرعت
ترک خیلی زیاد است و تراکم تنش بوجود آمده. اما تنش
لازم برای جوانه زنی ترک تنش کاهش است. بنابراین تراکم تنش
تراکم تنش ترک ترد زیاد است زیرا انتهای تغییر شکل پلاستیک هم
خیلی کم است به جایی که به اصطلاح غیر تیز این تراکم تنش افزایش پیدا نکند
برای ایجاد ترک تغییر شکل پلاستیک هم خیلی زیاد است. یعنی به اصطلاح
غیر تیز هر چقدر Rate کرنش بالا باشد اما تا زمانی که نابجایی های وجود داشته باشد می تواند
حرکت کند تغییر شکل بوجود آید و این تراکم تنش شکسته نمی شود. چون جسم پلاستیک است پس نیازی
به شکست نیست. تنش وقتی بوجود می آید که حرکت نابجایی ها متوقف شود و تنش متراکم افزایش یابد و تغییر
شکل پلاستیک انجام نشود. بنابراین به اصطلاح غیر تیز هر چقدر ترک اصطلاحی اصلاح نیست تیز
تغییر شکل پلاستیک بقدر کافی وجود دارد. شرایطی که عیب کاهش وجود داشته باشد شرایط غیر عادی است.
برای مورد اصطلاح غیر تیز یک مکانیزم دیگر وجود دارد:
یکی از مکانیزم های مهم است اصطلاح غیر تیز می تواند نام برد وجود حفره های میکروسکوپی با ابعاد آن ها
و نزدیک شدن حفره ها به هم بیرون حفره ها و نهایتاً شکل ترک. یعنی به اینجا جوانه زنی ترک یک
مکانیزم دیگری دارد به اصطلاح مختلف دارد:
حفره های میکروسکوپی وجود دارند یا بوجود می آیند
بعد حفره ها رشد و بهم می پیوندند.
نهایتاً ترک شکل می گیرد و ادامه پیدا می کند
به واقع یک شبکه بوجود می آید حفره های
میکروسکوپی می تواند شکل های مختلف بوجود آید.
یا اینکه جسم دو یا سه فاز وجود دارد و وقتی
تغییر شکل پلاستیک ها زیاد شد. زیرا تغییر شکل خوبی
می خواهد ریز تغییر شکل نمی دهد یک عدم
انطباق تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه بوجود می آید
که تراکم تنش ایجاد می شود و ترک زودتر بهم می پیوندد یک حفره میکروسکوپی بوجود می آید
یعنی در اثر شکست دو یا چند حفره میکروسکوپی می توانند بوجود آیند.
یا اینکه ذرات دوم جسم را داریم. وقتی تغییر شکل می دهیم
حرکت نابجایی ها در فصل مشترک متوقف می شود چون در داخل ذره
یک میدان کرنش وجود دارد و نابجایی ها نمی توانند از این یک
ذره به ذره دیگر حرکت کنند. ممکن است حالتی بوجود
آید که این ذره ها از جسم خود جدا شده و حفره







ریسه بوجود آمده

s.a.m

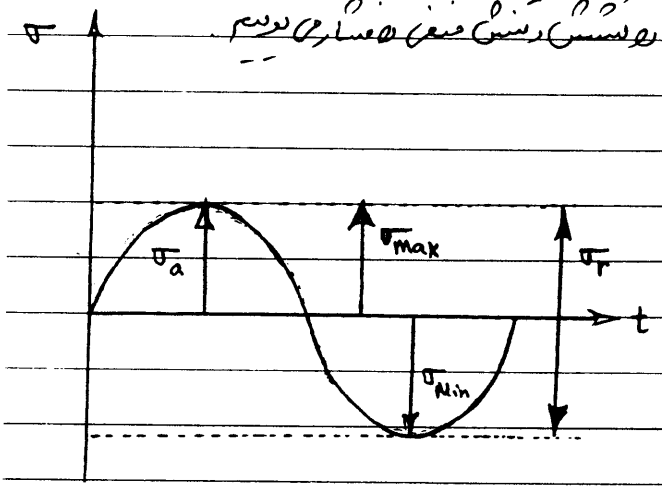
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

در بررسی رفتار فلزات در برابر نیروهای خارجی دیدیم که فلزات در برابر نیروهای ثابت و زیاد مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند. بنابراین قطعاتی که تحت تأثیر نیروهای ثابت کار می‌کنند باید طوری طراحی شوند که تنش وارده از تنش تسلیم آن کمتر باشد. اما در مواردی که نیروهای وارده متغیر هستند، قطعات زودتر از آنچه انتظار می‌رود دچار شکست می‌شوند. به این نوع شکست، شکست خستگی می‌گویند. در این نوع شکست، قطعه تحت تنش‌هایی کمتر از تنش تسلیم دچار شکست می‌شود. به عبارت دیگر، قطعه‌ای که تحت تنش‌های متغیر کار می‌کند باید ضریب اطمینان بیشتری داشته باشد.

در مواردی که قطعات تحت تنش‌های متغیر کار می‌کنند، شکست‌شان ترد است یعنی قبل از شکست تغییر شکل پلاستیک زیادی نمی‌دهند.

"Fatigue"
(خستگی فلزات)

اصولاً وقتی جسمی تحت تأثیر تنش‌های متناوب قرار می‌گیرد، در اثر این تنش‌های متناوب که از تنش تسلیم کمتر است، شکست جسم را شاهد هستیم. این شکست‌ها معلول خستگی است و از تنش شکست جسم هستند. به نوع شکست، شکست در اثر خستگی می‌گویند. شکست در اثر خستگی تابع زمان است زیرا متناوب اعمال می‌شود. این شکست بستگی به میزان تنش و فرکانس نوسان و ... دارد. وقتی راجع به متناوب صحبت می‌کنیم بیشتر تنش‌های سینوسی به ذهن می‌آید. البته در واقع تنش سینوسی نیست. مثلاً در ترمز تنش‌ها می‌توانند به صورت پله‌ای باشند. در ترمز خستگی نیز تنش سینوسی نیست. مثلاً در ترمز تنش‌ها می‌توانند به صورت پله‌ای باشند. در ترمز خستگی نیز تنش سینوسی نداریم. در ادامه خواهیم دید که تنش‌ها همیشه خستگی می‌شوند یعنی تغییر شکل تنش‌ها زمان می‌توانند خستگی به وجود آورند. البته حسی در هوایی که در آن زندگی می‌کنیم دائماً سرد و گرم می‌شود. این سرد و گرم شدن و تغییر حال می‌تواند یک تنش ایجاد کند که منجر به شکست در اثر خستگی شود. چون تغییر حال همیشه در دوره‌ای محصور است و دوباره سرد و گرم شدن تکرار تنش ایجاد می‌کند.



با همین تنش‌های سینوسی سروکار داریم. تنش شکست و تنش تسلیم همیشه مشخص می‌کنیم.

منظور از σ چیست؟ زمان را رسم می‌کنیم.

σ_a : $\sigma_{alternative}$ دوطرف دامنه منظور Sin است

σ_{max} : تنش Max که در هر Period جسم تحمل می‌کند.

σ_{Min} : تنش Min که در هر Period جسم تحمل می‌کند

σ_r : $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{Min}$ = Ranged stress

یعنی دامنه Peak - Peak سینوس Sin.

یا به عبارتی دامنه تنش است.

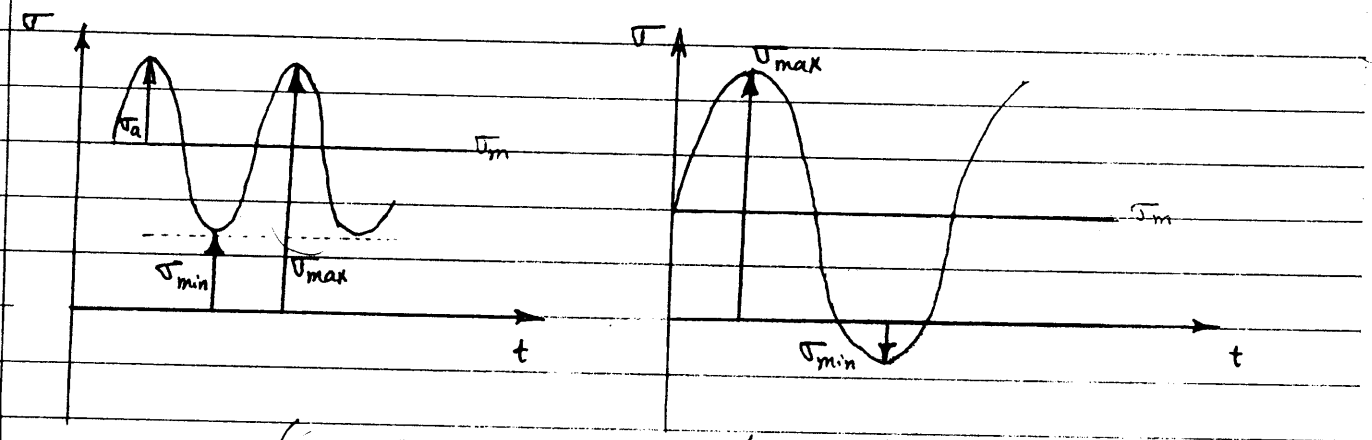
σ_m : تنش متوسط است $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

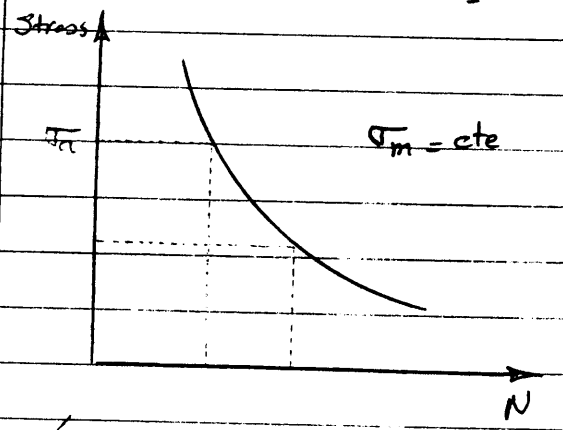
در اینجا σ_m صفر است. σ_a یا σ_{max} می‌توانند یکی نباشند. این ساده‌ترین حالتی بود که در نظر گرفتیم. حالات دیگری می‌توانند در هر دوره داشته باشیم.

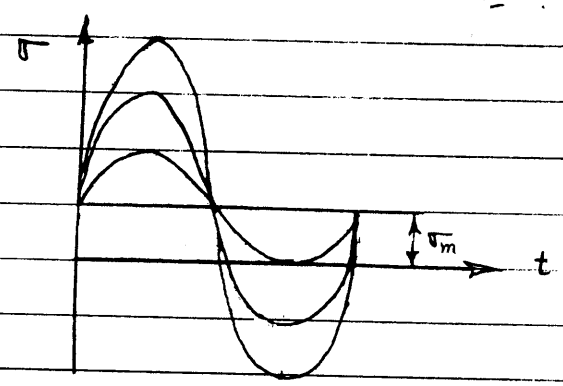
تنش اعمالی یا همیشه مثبت و منفی است. یا تغییر علامت در زمان دارد. تنش Max یا همیشه مثبت صفر تنش می‌تواند منفی باشد. یا تنش alternative دامنه Sin است. تنش Min می‌تواند مثبت، صفر یا منفی باشد. تنش متوسط هم همیشه مثبت است چون Sin است (دقت شود)

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



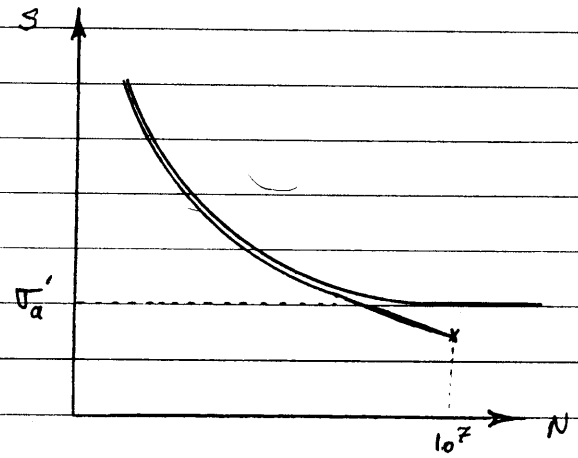




s.a.m

www.iran-mavad.com

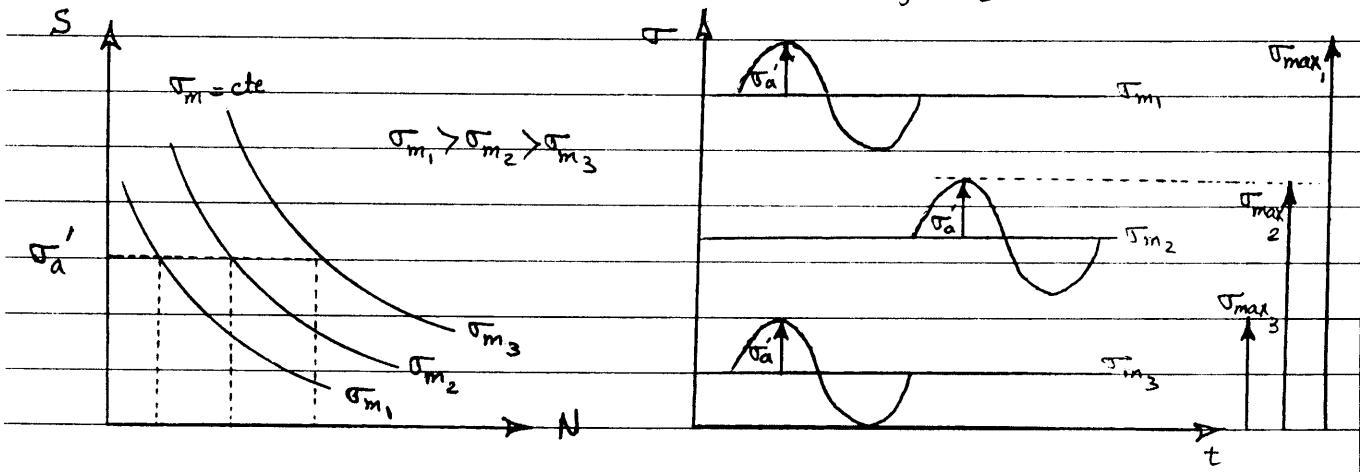
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد



در غیر این صورت تنش alternative کم می شود.
منحنی آن ها موازی محور N می شود. اگر عضو
حالتی وجود داشته باشد که این σ_a از حد خستگی کمتر شود
در واقع حد خستگی مقدار تنش alternative ای است
که اگر میزان تنش از آن کمتر باشد عمر قطعه بی نهایت
می شود. یعنی بیشتر قطعه فنی ساخته شده از فولادها حد خستگی دارند
بنابراین نزدیک ترین آلیاژها این حد خستگی را ندارند. مثل آلیاژهای
غیر آهنی. برای همین حالت یک نقطه را خودمان در نظر می گیریم
مثلاً 10^7 یا 10^8. اگر قطعه ای بتواند 10^7 بار عمل تنش
را تحمل کند از نظر ما عمرش بی نهایت است. این امر یک امر قراردادی است و برای این آلیاژها حد خستگی داریم
و حد خستگی هم تنش هایی هستند منحنی موازی محور N می شود.
حالا ما منحنی ها را برای یک تنش متوسط خاص رسم کردیم یعنی آن ها ثابت گرفتیم. می توانیم اثر تغییرات
σ_m ها روی منحنی های S-N نشان دهیم

۱۴۰۹۰۲۷ «جلسه بیستم»

حالا می خواهیم اثر تغییرات σ_m را بررسی کنیم. منحنی S.N های برای σ_m های مختلف رسم می کنیم اعم از این که حد خستگی دارند
یا نه. سه منحنی برای σ_{m_1}، σ_{m_2}، σ_{m_3} رسم می کنیم. برای یک تنش alternative ثابت σ_a' عمر این سه نمونه

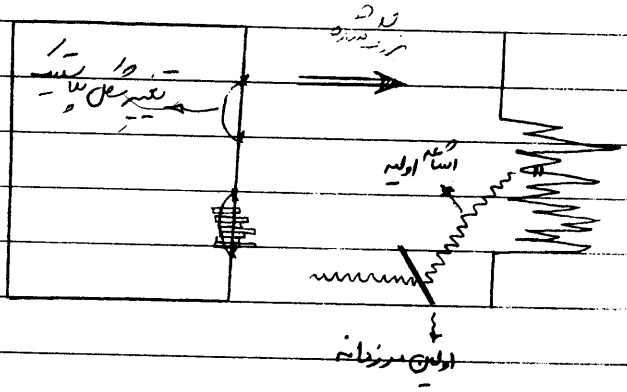


را با هم مقایسه می کنیم. کمترین عمر قطعه مربوط به σ_{m_1} است که بیشترین میزان تنش متوسط است یعنی $\sigma_{m_1} > \sigma_{m_2} > \sigma_{m_3}$
هرچه قدر تنش متوسط بیشتر باشد عمر قطعه برای یک تنش alternative داده شده کمتر خواهد بود. یعنی قطعه زودتر
می شکند. این مسئله واضح تر خواهد شد اگر منحنی تنش زمان این سه قطعه را هم رسم کنیم. مقدار σ_a
هر سه حالت برابر است اما σ_m ها متفاوت است. اگر دقت کنیم مقدار σ_{max} برای سه نمونه متفاوت است
بنابراین می فهمیم هرچه مقدار σ_m برای یک تنش alternative ثابت بیشتر باشد، عمر قطعه کمتر است.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

«مکانیزم شکست در خستگی»



شکست از نقطع شروع می‌شود و یا از نزدیکی نقاط تمرکز تنش‌ها در حین هر cycle ای ترک رشد می‌کند. در این صورت سطوح شکست هایی نزدیک به نقطع تمرکز تنش با سرعت انجام می‌شود. یعنی در اثر اعمال تنش alternative تغییر شکل های پلاستیک در نقاط تمرکز تنش بارهای ها بوجود می‌آید. یعنی وقتی بارهای فشاری بر سطح می‌رسند ناصافی‌ها بوجود می‌آیند. اینجا تغییر شکل پلاستیک در اثر بارهای کششی بوجود می‌آیند یعنی همان برجستگی‌ها و فرورفتگی‌ها. سطح ایجاد شده توسط یک منطقه ناصافی بوجود می‌آید. این منطقه ناصافی همان برجستگی‌ها و فرورفتگی‌ها می‌باشد که در بالا ذکر کردیم. این منطقه ناصافی نزدیکی به مرکز تنش است. یکی از این ناصافی‌ها بصورت ترک عمل می‌کند. ترک شروع به گسترش می‌کند. اشاعه اولیه ترک تقریباً با زاویه 45° نسبت به تنش alternative اعمال می‌شود، بصورت می‌آید. اشاعه ترک ادامه پیدا می‌کند تا اولین مرز دانه و معمولاً وقتی از اولین مرز دانه گذشت در جهت عمود بر تنش اعمالی اشاعه پیدا می‌کند. یعنی بقدر ضخامت پیدا کرد اعمال تنش alternative ناصافی سطح بوجود می‌آید. در اثر این ناصافی ترک جوانه می‌زند. در اثر تمرکز تنش در نوک ترک ترک اشاعه پیدا می‌کند (از زاویه 45° عمود) تا اینکه به مرز دانه برسد و از آن گذشت پیدا کرده عمود بر جهت اعمال تنش حرکت می‌کند و نهایتاً خسته می‌شود. روند تنش alternative اعمال می‌شود ترک یک مقدار حرکت می‌کند. هر بار که ترک حرکت می‌کند قسمتی از سطح شکست ایجاد می‌شود. یعنی هر Period یک بار ترک وجود دارد. این مراحل را می‌توانیم لیست کنیم:

1- ایجاد ناصافی در روی سطح
2- جوانه زنی ترک در محل ناصافی ها
3- اشاعه ترک تا اولین مرز دانه
4- گذشتن ترک از مرز دانه
5- اشاعه ترک به طول جسم و شکست

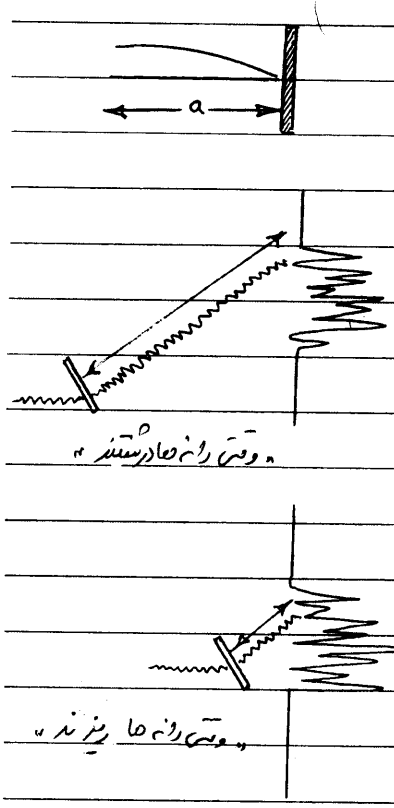
اینها در اثر اعمال تنش alternative می‌افتد. در اثر تنش الاقل در این مراحل شروع می‌شوند. از این مراحل برای شکست یک جسم در اثر اعمال تنش alternative نتیجه می‌گیریم می‌توان گفت مدت زمانی که طول می‌کشد این مراحل به شکست جسم یا خسته شدن جسم بستگی دارد. هر چه زمان کمتر باشد یعنی ترک ناصافی ایجاد شود و طول سطح بیشتر شود یعنی ترک جوانه بزند. مدت زمان کمتر طول می‌کشد تا شکست جسم اتفاق بیفتد. بنابراین عمر قطعه است. اشاعه ترک را می‌توانیم معادله گذشتن از مرز دانه این علت است که مرز دانه می‌تواند عنوان یک مانع برای اشاعه ترک باشد. تنش لازم معمولاً برای اشاعه ترک (اشاعه پیدا نکند) فرایندی که یکی از این زمان‌ها یا چند تا از آن‌ها طولانی‌تر کند، آن عامل بر طولانی‌تر شدن عمر قطعه مؤثر است یعنی شدت حادثه بر اثر خستگی را بیان می‌کند.

1- ناصافی سطح: اگر سطح جسم صاف باشد زمان لازم برای ایجاد ناصافی و جوانه زنی ترک خیلی طولانی خواهد

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

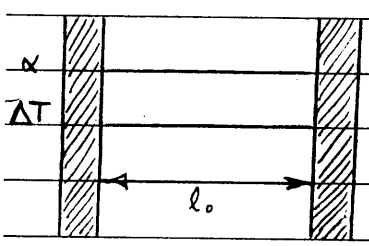
بود. چون ناصافی با بد اول ایجاد شود و بعد چون پدید می‌تواند شکل جدید ترک شود یعنی بدانیم که آن تراکم تنش
به وجود آید. اما اگر سطح ناصاف باشد خود شکل یک قدم جلوتر است برای ایجاد جدایی ترک



اندازه دانه‌ها: وقتی یک ترک می‌خواهد از مرز دانه بلند رد، چون مرز دانه یک مانع است ترک پشت مانع متوقف می‌شود در ابتدا، یعنی تراکم تنش باید به حدی برسد که ترک بتواند از آن عبور کند. اگر جسمی دانه‌های درشت‌تری داشته باشد و سرعت طی آن ناصافی و فرورفتگی ترک به مرز دانه می‌رسد ناصافی‌های طی کرده چون دانه‌ها درشت‌ترند. وقتی به مرز رسید بنابراین طول زیادی دارد.
اما اگر دانه‌ها خیلی ریز باشند در این صورت وقتی ترک به مرز می‌رسد ناصافی کمتری طی کرده چون دانه‌ها ریزند. یعنی سریعتر به مرز می‌رسد. در مورد ترک نشستیم اگر طول ترک a شد هم، دو هفده، a بزرگتر باشد تراکم تنش بیشتر است. پس ترک قدرت بیشتری دارد برای عبور چون تنش بالای دو انتهای آن وجود دارد. بنابراین دو جاهایی که طول ترک زیاد است همان تنش می‌تواند طی باشد که ترک از مرز رد شود. چون تراکم تنش در انتهای آن زیاد است. بنابراین دو جایی که اندازه دانه‌ها درشت است ترک به خیلی از مرز دانه‌ها عبور می‌کند ولی در جاهایی که دانه‌ها ریزند چون طول کمتر است و تراکم تنش هم کمتر است ممکن است ترک مدت‌ها پشت مرز بماند. بنابراین اگر اندازه دانه‌ها ریز باشد مقاومت جسم در برابر خستگی بیشتر است. زمانی که اندازه دانه‌ها درشت شد مقاومت جسم کمتر است.

تقسیم‌بندی جسم از نظر تنش‌های متناوب می‌تواند باعث شکست جسم شوند اما تنش‌ها می‌توانند روش‌های غیرمکانیکی هم اعمال شود.

«خستگی حرارتی»
جسم ممکن است دائم تغییر دما داشته باشد و خستگی شود و شکند. وقتی دما تغییر کند، انقباض و انبساط متناوب خواهیم داشت. مثلاً فرض کنید یک قطعه بین دو دیواره محصور است و طول اولیه آن l_0 است. با زیاد شدن دما طول این قطعه زیاد می‌شود



اگر ضریب انبساط حرارتی α و تغییر دما ΔT در نظر بگیریم و طول بعد از انبساط l_1 باشد

$$l_1 = l_0(1+\alpha\Delta T)$$

روابط زیر در خواهیم داشت یعنی در هر ΔT یک تنش به اندازه $E\alpha\Delta T$ به آن وارد می‌شود. اگر دما برعکس شود عکس هم

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \alpha\Delta T$$

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

عمل اسپری تنش پسماند جسم ایجاد می‌شود. به ترتیب یک تنش alternative به صورت دیده شده جسم اعمال می‌شود. معنی این است جسم دائم خستگی می‌شود.

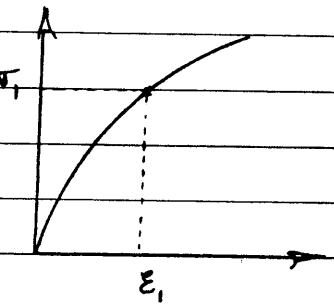
چیزی که در اینجا مهم است این است که وقتی از خستگی صحبت می‌کنیم یعنی اعمال تنش‌های متناوب. ماده‌ای دوباره مکرر است با تغییر دما جسم باشد. مثلاً یک نقطه خیلی گرم (مثلاً شیشه) آب سرد روی آن می‌ریزیم می‌شکند یعنی تنش که به صورت آنی بالا می‌رود. یا مثلاً یک نمونه Al خیلی نازک را از دمای بالا سریع Quench کنیم خم می‌شود یعنی در اثر تغییر ناگهانی دما یک تنش به صورت آنی ایجاد می‌شود که اینها معمولاً «شوک حرارتی» می‌دهند که با خستگی حرارتی فرق دارد. یعنی وقتی با شوک ناشی از تغییر درجه حرارت ناگهان جسم می‌شکند (شوک حرارتی) با اینکه جسم دائم تغییر متناوب دما می‌کند ولی متفاوت است. خستگی حرارتی زمانی اطلاق می‌شود که بتوانیم بگوییم جسم تحت تأثیر تنش‌های متناوب قرار گرفته است. یعنی جسم چندین سیکل تنش را تحمل کرده بعد شکست.

«خستگی در آلیاژهای فلزی»

این نوع خستگی در محیط خورنده است. اگر یک قطعه در نظر بگیریم که یک سمتش در محیط عادی قرار گرفته و دیگری در یک محیط خورنده و تحت تأثیر همان سیکل‌های متناوب قرار بگیرند. قطعه‌ای که در محیط خورنده است عمرش کوتاه‌تر است و زودتر می‌شکند. زیرا خوردگی بر روی سطح اثر می‌گذارد. ناصافی‌هایی که سطح بوجود می‌آید سبب تمرکز تنش می‌شود. در واقع در اثر خوردگی برخی قسمت‌های سطح بیشتر در تماس با محیط خورنده می‌شوند که تمرکز تنش ایجاد می‌کند. ناصافی است که عوامل خوردگی ترک ایجاد می‌کنند. یعنی در محیط خورنده مرحله جوانه‌زنی سریعتر انجام می‌شود زیرا خوردگی سطح را ناصاف کرده است.

«خزش» (Creep)

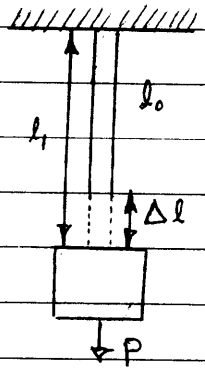
خزش یک سیستم تابع زمان است. بطور خلاصه، خزش عبارت است تغییر شکل بدست آمده تحت تنش ثابت بر حسب زمان. یعنی برخلاف تنش ثابت با گذشت زمان تغییر شکل اتفاق می‌افتد برخلاف آزمایشاتی که تا بحال در حالت‌های عادی با تنش ثابت تغییر شکل نداریم. یعنی وقتی به فلزی تنش ثابت می‌دهیم می‌بینیم تنش با افزایش مدت زمان تغییر شکل اولیه پیدا کند مثلاً تنش ثابت σ_1 یک تغییر شکل ثابت ε_1 برای آن ایجاد می‌شود باید تنش را بیشتر کنیم. اما در خزش اینطور نیست با تنش ثابت و هم مرور زمان تغییر شکل داریم. البته خزش در دماهای بالا صورت می‌گیرد.

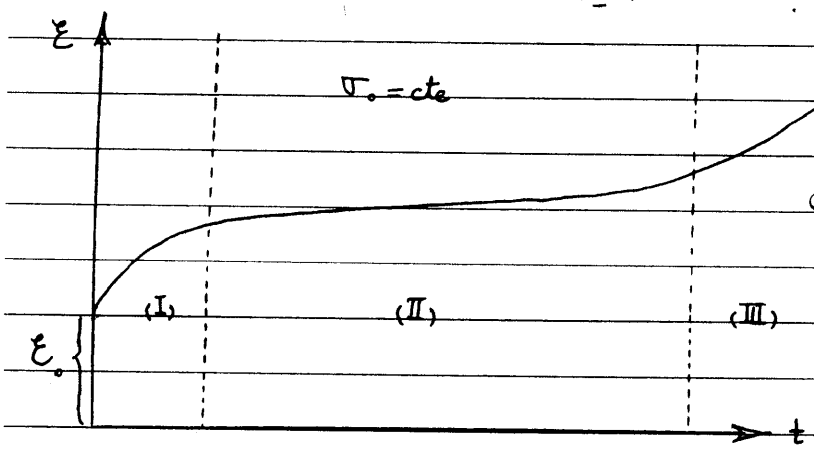


s.a.m

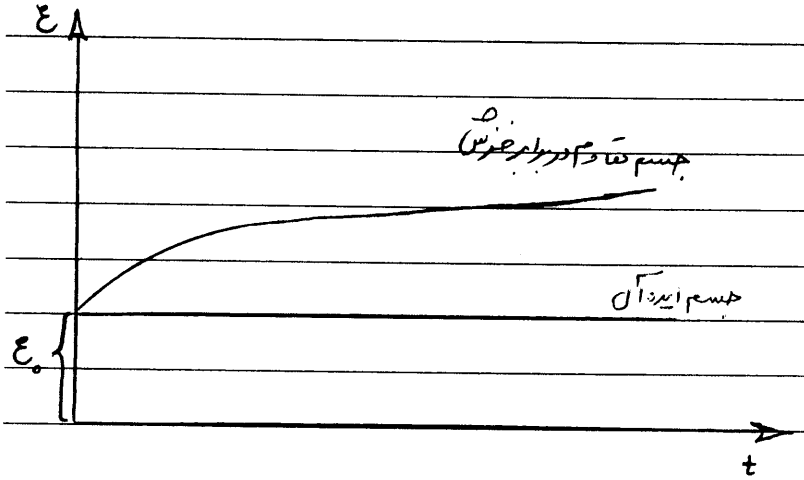
www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اگر میله، طول l_0 را در نظر بگیریم و آن را به آویزان کنیم که آن تنش یا نیروی ثابت P را وارد کند طول آن به l_1 می‌رسد و آن یک تغییر شکل برحسب می‌آید. اگر جنس جسم بررسی‌ما پلاستیک و شکننده نباشد زمان گذشته طول آن ثبت می‌شود و نهایتاً می‌شکند. در واقع خزش هم یعنی تغییر شکل بر تنش ثابت در دمای بالا و مرور زمان. یعنی برای اعمال وزنه یک تغییر شکل اولیه داریم و بعد در دمای بالا و مرور زمان طول آن رشد نوشتن می‌یابد و نهایتاً می‌شکند. بنابراین آمدیم اهمیم منحنی خزش رسم کنیم بر منحنی تغییر شکل بر حسب زمان رسم کنیم





چون تنش ثابت است پس متغیر ما زمان است
بنابراین منحنی خزش منحنی ε بر حسب
زمان است.
وقتی σ ها اعمال می‌کنیم بر ابتدا
یک ε_0 داریم. پس از آن با گذشت
زمان تغییرات ε به صورت بررسی است
تا جایی که شکست. برای منحنی خزش می‌توان ۳ منطقه در نظر گرفت. منطقه (I) خزش اولیه است، منطقه (II) خزش کندشونده و منطقه (III) خزش نهایی است. بررسی این مناطق منطقه II خزش برای ما مهم است. در هنگام منطقه I از $t=0$ تا جایی است که جسم شکست اما برای بررسی عمر قطعه معمولاً منطقه II را نگاه می‌کنیم، منطقه III یک منطقه ناپایدار است یعنی وقتی به منطقه III رسیدیم شکست انجام می‌شود. بنابراین وقتی که خزش منطقه II را بررسی می‌کنیم بیشتر در مورد منطقه خزش کند صحبت می‌کنیم چون می‌توانیم بگوییم عمر قطعه ما بیشتر وابسته به منطقه II است.
تقسیم خزش در دمای بالا صورت می‌گیرد. بالا یعنی دمایی که برای Al مثلاً $400^\circ C$ بالاست ولی برای تنگستن $800^\circ C$ هم بالا نیست.



در مورد جسم خزش را بحث می‌کنیم.
منظور جسم ایده‌آل نیست نداریم که
بتوان خزش را بررسی کند اما جسمی
داریم که مقاوم در برابر خزش هست
آن جسم ایده‌آل با شیب منفی آن دوازی
با محور زمان است یعنی هیچ وقت
نمی‌شکند یعنی هیچ تغییر شکل

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

پایستگی با نیست زبان برقرار اتفاق نمی افتد.

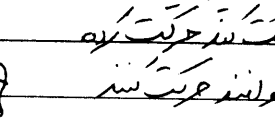
اما جسمی که مقاوم بود برای خزش نقشه منطقه تنش ها راسم اما منطقه II تقریبا نواحی محو زبان می شود. یعنی یک خزش اولیه داریم اما منطقه (II) بسیار طولانی است یعنی خیلی طول می کشد که جسم خراب شود. به همین جسمی که مقاوم است برای خزش. بنابراین خزش تقریبا همه عمر جسم رخ می دهد اما برای جسم مقاوم برای خزش مقاومند برجسم اینده آن که مقاوم نباشد) پایستگی زبان نابجایی ها برقرار است. چون تغییر شکل پایستگی یعنی حرکت نابجایی ها. برای جسم مقاوم برای خزش حرکت نابجایی ها کمتر است.

مکانیزم خزش:

وقتی جسمی را تحت تاثیر تنش قرار می دهیم یک مقدار تغییر شکل داریم. به نحوی سر تنش هم دیدیم برای تغییر شکل ادامه پیدا کند باید تنش را افزایش دهیم. اما اگر دما بالا باشد و اجازه دهیم زبان نابجایی خزش اتفاق می افتد. تقسیم تغییر شکل پلاستیک یعنی حرکت نابجایی ها تحت تنش

وقتی به یک مقدار ۰.۲٪ برسیم که عدد تغییر شکل پ ع داریم یعنی در این تنش هر چقدر نابجایی بوجود آمده می توانست حرکت کند حرکت کرده

صعود به صورت زبان



باز هم تقسیم دو نوع نابجایی داریم که حرکت نکرده اند یعنی توانند حرکت کنند یک نوع نابجایی هایی که تحت تنش توانسته همدیگر را خنثی کنند.

و نابجایی هایی که تحت تنش به مرز دانه ها رفته اند و مرز دانه ها را ترک کرده اند. این نوع نابجایی ها حرکت نکرده اند. وقتی که دما بالا است یک مکانیزم دیگر هم اتفاق می افتد. دما بالا صعود نابجایی ها اتفاق می افتد. تقسیم مکانیزم صعود داشتیم. صعود نابجایی ها نیاز به Vac ها دارد و Vac ها در زبان زیاد است (یعنی زبان لازم است تا Vac ها بتوانند حرکت کنند) بنابراین در این حالت Vac به سمت زبان شروع می کنند و نابجایی ها به سمت صعود می کنند و چون تنش هنوز وجود دارد شروع به حرکت می کنند. یعنی با صعود نابجایی از بین خنثی می شود و با همان تنش باقی مانده وجود دارد شروع به حرکت می کند. بنابراین تغییر شکل ادامه پیدا می کند.

حالا اگر جسم را دوباره تحت تنش قرار دهیم و بعد دما بالا ببریم در این صورت یک اتفاق دیگر هم می افتد دوباره با یک سری سطوح لغزش تنش هنوز به تنش جریان نرسیده است دوباره حرکت نابجایی رخ می دهد. چون دما بالا حرکت تنش کمک می کند. مثلا همین صعودی صعودی یک مقدار پیش رفته هنوز به آن تنش نرسیده ایم دوباره افزایش دما به آن تنش کمک می کند. چون مقاومت جسم (مقاومت حرکت نابجایی) کم می شود. یعنی اگر فرض کنیم اول با تنش ۱۰ اعمال کنیم و بعد مسئله ۱۰ دما بالا ببریم در مرحله اول یک چنین حالتی هم اتفاق می افتد. یعنی خزش در سطوحی که هنوز به تنش جریان نرسیده اند و با دما بالا آن را به سمت اتفاق می افتد. ولی اصولا مکانیزم خزش در سطح Vac ها کنترل می شود. یعنی Vac ها به سمت زبان یا زیر حط نابجایی می آیند برای کنترل زبان ضروری است و با هم بالا رفته Vac هم بالا است) و فقط آنها نیست. و نهایتا تغییر شکل تحت تاثیر تنش ثابت ادامه پیدا می کند و نمونه شکست جسم می شود.

s.a.m

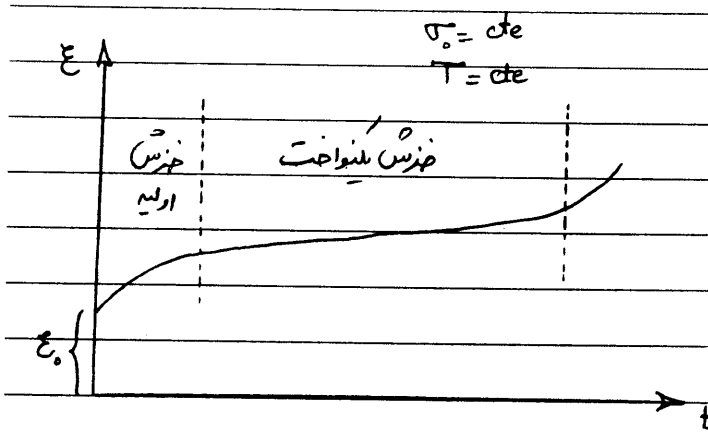
www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

وقتی صحبت از خزش می کنیم به تغییر شکل اولیه داریم این تغییر شکل ممکن است اصلا برای تیغه گیردهای مناسب نباشد
بنابراین تغییر شکل اولیه باید به نوعی مرتفع شود.
تیغه گیرد ممکن است خزش کند ولی هرچه خزش اتفاق می افتد. ما دو منطقه خزش اولیه و خزش
پایدار داریم و دوبیره همین اتفاق می افتد یک تغییر شکل پلاستیک است و دیگر برای بالاست.
نتیجه: تقسیم تغییر شکل پلاستیک، افزایش کارسختی است
نتیجه: تقسیم با بالا بردن دما، بازیابی است (منظور از بازیابی در اینجا بیشتر بازیابی
این دو پدیده در جهت عکس هم عمل می کنند. چون در هر کار سختی با افزایش دما تقاومت جسم در برابر تغییر شکل پلاستیک
بیشتر می شود و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک کمتری می شود اما وقتی بازیابی اتفاق می افتد مقاومت جسم در برابر
تغییر شکل کمتر می شود بنابراین تغییر شکل پلاستیک بیشتر اتفاق می افتد. در مناطق مختلف این دو اثر
با هم در تقابلند چون با هم تنش داریم هم دما بالاست و هم تغییر شکل ادامه پیدا می کند بنابراین هم کارسختی
داریم و هم بازیابی.
در منطقه (I) کارسختی بیشتر از بازیابی است یعنی انگیزه بقود در کارسختی است.
در منطقه (II) کارسختی با بازیابی برابر شده و عملا مکانیزم خزش داریم که نرخ کرنش ثابت است.
بنابراین از این به بعد ما سه مکانیزم خزش را بررسی کردیم. ما مکانیزم خزش در مناطق (I) و (II) بررسی کردیم چون
منطقه III یک منطقه ناپایدار است و در آن نرخ تغییر شکل مدام زیاد می شود یعنی دیگر اتفاق خاصی
که بشود خزش نیست.

۴ مارس ۸۴ «جلسه بیست و یکم»

تنش زمان مربوط به مرحله خزش
ثانویه ضمنی بیشتر از زمان مرحله های (I) و (III)
است بنابراین ما می توانیم عمر قطعه را همان
محدوده زمان خزش ثانویه در نظر بگیریم.
تنش خزش در دماهای بالا و تحت تنش
تنش ثابت اتفاق می افتد. دما هم هر چند
بالا باشد است یعنی در حین خزش
تغییر دما نداریم



می توانیم اثر تغییرات ε_0 و T را بررسی کنیم
خزش بررسی کنیم یعنی اگر دما تغییر کند یا σ_0 یا ε_0 تغییر کند منحنی چه صورتی تغییر می کند.

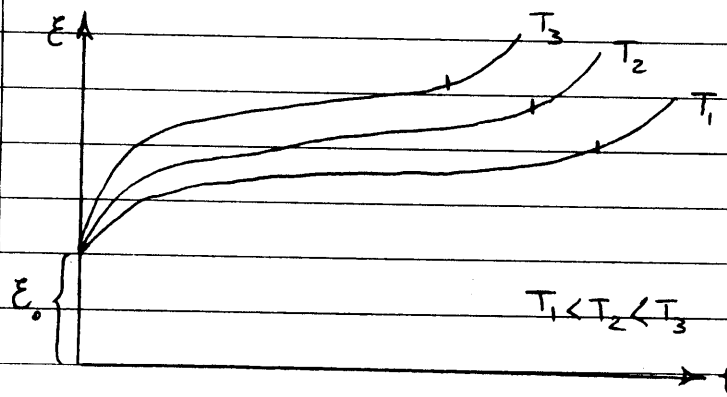
«اثر تنش اولیه (σ_0) و دما روی منحنی خزش»

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

اثر دما بر تغییر دما را بررسی می‌کنیم:

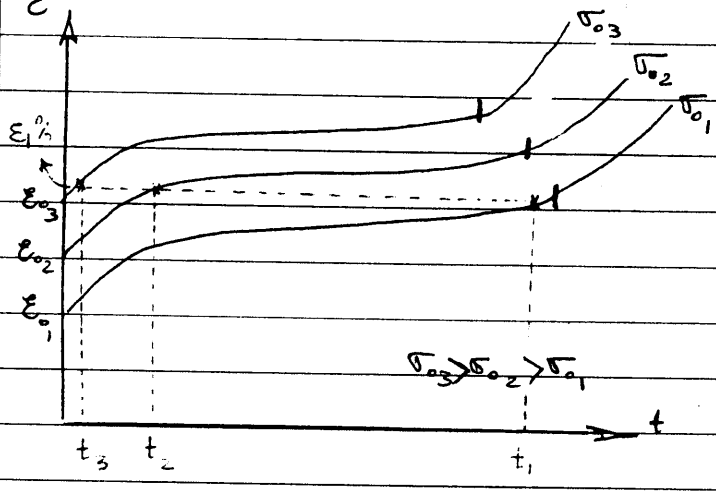
اثر دما بر خزش را در دماهای مختلف رسم کنیم به منحنی مقابل می‌رسیم هر چقدر دما بالاتر می‌رود اثری که می‌گذارد در منطقه (II) است یعنی طول عمر قطعه با افزایش دما کوتاه‌تر می‌شود.



وقتی تنش منطقه (II) منطقه طول عمر قطعه است این شرط‌ها در این منطقه مشهود است. ε_0 برای هر قطعه را نشان می‌دهد این شیب است زیرا دما هر چقدر بالا برود سریع‌تر است و هر چقدر تنش بالا برود سریع‌تر است بنابراین میزان خزش بیشتر است.

اثر تنش اولیه (σ_0) روی منحنی خزش:

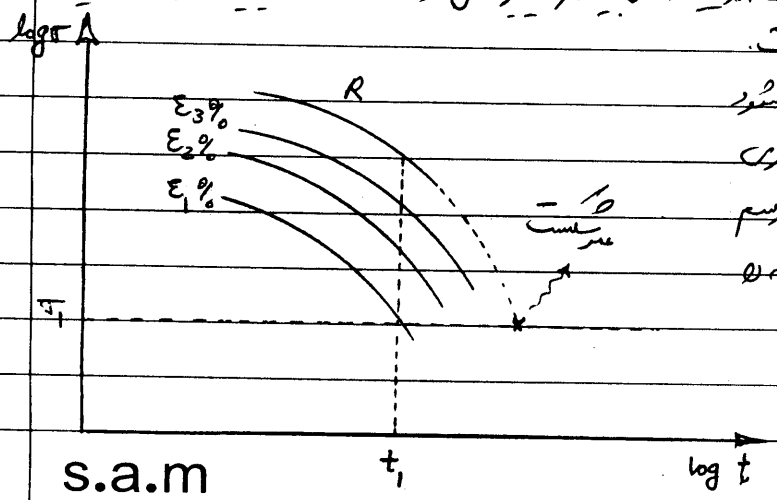
اثر تنش اولیه متفاوت بررسی می‌کنیم برای هر σ_0 یک ε_0 خواهیم داشت بنابراین ε_0 در اینجا متفاوت خواهد بود.



باز هم می‌بینیم که تغییر تنش اولیه بر روی منطقه II اثر می‌گذارد یعنی هر چه تنش اولیه بیشتر باشد منطقه II کوچکتر و عمر قطعه کمتر است.

تنش خزش در همه اجسام هست می‌باشد وقتی قطعه‌ای داریم که دماهای بالا طی می‌کند باید سراغ خزش برویم و بدانیم آیا این قطعه ما یک قطعه‌ای است که خیلی بیشتر تغییر شکل می‌دهد یا نه برای تشخیص این قطعه و یا چقدر تغییر شکل این قطعه شده $\varepsilon\%$ است.

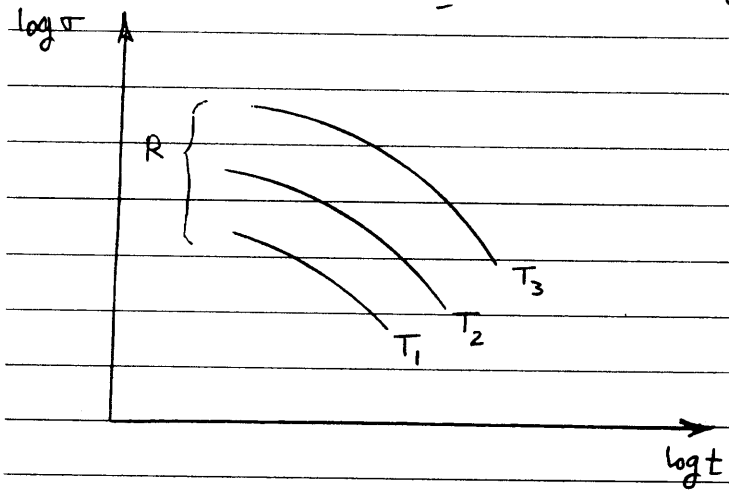
اگر تغییر شکل بیشتر از $\varepsilon\%$ بود باید این قطعه عوض شود یعنی دوره تعویض ما چقدر است برای بررسی این موضوع $\log t$ بر حسب $\log \sigma$ رسم می‌کنیم σ تنش اولیه است. می‌خواهیم عمر قطعه‌ای که یک تنش اولیه داده شده بدست آوریم منتها عمر قطعه برای ما نقطه شکست قطعه نیست.



s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد

عمر قطعه برای مادرلینه‌ها زیاد است تا ۱٪ تغییر طول بعد. این قطعه دیگر قابل استفاده نیست و باید عوض کنیم
بنابراین برای این منحنی‌ها عمر قطعه تا تغییر طول ۱٪ در نظر گرفتیم. مثلاً ممکن است یک قطعه تحت تنش σ_1
تغییر طول ۱٪ برسد. در منحنی‌ای که برای آن σ_1 رسم کرده‌ایم (منحنی $t-\varepsilon$) مثلاً اگر ۱٪ ε مجاز باشد
زمان‌های t_1, t_2, t_3 عمر این قطعه‌ها خواهند بود. اما در مواردی که رسم کرده‌ایم می‌توانیم دیاگرام‌های
$\varepsilon_1\%, \varepsilon_2\%, \varepsilon_3\%$ و ... تا Rupture یا شکست رسم کنیم. مثلاً اگر قطعه‌ای ۲٪ ε را مجاز باشد و دیاگرام‌های
تنش ثابت رسم کنیم ← با شروع از σ_2 لگاریتم این منحنی‌ها را $\log t_{\sigma_2}$ و سپس رسم کنیم و یک خط افقی رسم
می‌کنیم تا منحنی $\varepsilon_2\%$ را قطع کند. حال با رسم خطوط عمود از نقاط تقاطع زمان لازم برای ایجاد تغییر طول مورد نظر ما
به دست آورده می‌شود.



بعضی از قطعه‌ها برای مدت طولانی بار می‌شوند و ۱٪ ε مورد
نظر آن‌ها در مدت زمان کمتری به قطعه می‌رسد
بنابراین ما به دست آوردیم. حال اگر چند قطعه همان
جنس باشند ولی تنش‌های متفاوتی را تحمل کنند
ما برای هر کدام از آن‌ها یک منحنی R
مانند آنچه رسم کردیم به دست می‌آوریم.
بنابراین این منحنی‌ها می‌توانند زمان لازم
برای رسیدن به یک کرنش خاص و یا حتی
شکست را در تنش‌های مختلف برای ما
مشخص کنند. داده‌های لازم برای
استفاده از منحنی سوم را از منحنی دوم به دست می‌آوریم و نیازی به قطعه‌های مختلف نیست. اما اندازه‌گیری‌هایی
که ما انجام داده‌ایم به دست آوردن قطعه نیست همین طوری تقریبی کار کرده‌ایم. منتها عددی که به دست آوردیم را
با یک ضریب اطمینان می‌توانیم بزنیم. حتماً بعضی‌ها قبلاً یک ضریب اطمینان در نظر می‌گیرند.

خاصیت خزش یک ماده را می‌توان به صورت تغییر طول بر حسب زمان در نظر گرفت. یعنی
عمر قطعه برای ما زمان شکست است. در این صورت منحنی‌های شکست یا برای دماهای مختلف رسم می‌کنیم
یعنی منحنی $\log\sigma - \log t$ را داریم و نقاط منحنی‌های R را رسم می‌کنیم منتها برای دماهای مختلف. یعنی عمر
قطعه در دماهای خزشی برای شکست در دماهای مختلف و تنش‌های اولیه متفاوت به دست آوردیم. مثلاً اگر قطعه‌ای در
تنش σ_1 کار کند عمر این قطعه برای سه دمای متفاوت، سه زمان متفاوت خواهد بود. یعنی باز هم داده‌های ما
در این حالت از منحنی اول و دوم تأمین می‌شود.
از این منحنی‌ها در طراحی‌ها استفاده می‌شود و حتماً یک ضریب اطمینان هم در نظر می‌گیرند.

s.a.m

www.iran-mavad.com
مرجع دانشجویان و مهندسین مواد