نابجایی ها و مکانیزم های استحکام دهی (فصل ۷)

Dislocations and strengthening mechanisms

تهیه کننده: ش. منصورزاده

1

مقدمه

- **تغییر شکل الاستیک در مقیارس اتمی نتیجه تغییر طول پیوند بین اتم ها است. اگر پیوند بین اتم ها را مانند فنر فرض کنیم، زمانی که نیرو اعمال می شود ، طول پیوند تغییر می کند و مجموع این تغییر طولها همان تغییر شکل الاستیک در مقیاس ماکروسکوپی خواهد بود. با برداشتن نیرو ، طول پیوندها به حالت اولیه خود بر می گردد و تغییر شکل الاستیک صفر می شود.**

- **تغییر شکل پلاستیک در مقیاس اتمی نتیجه حرکت نابجایی ها درون ماده است و برای این حرکت باید پیوند بین اتمی بارها شکسته و تشکیل شود.**

2

نابجایی ها و تغییر شکل پلاستیک

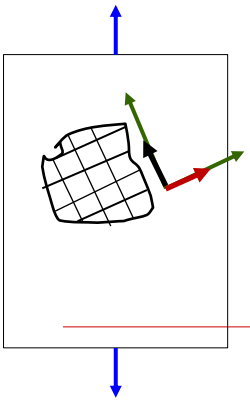
مفاهیم بنیانی

قبل از توجیه حرکت نابجایی چند فرض می شود

- برای تغییر شکل پلاستیک باید نابجایی ها درون ماده حرکت کنند
- عمده تغییر شکل پلاستیک نتیجه حرکت نابجایی پیچی است
- به دلیل نمایش ساده تر نابجایی لبه ای ، حرکت این نابجایی شرح داده می شود
- برای حرکت نابجایی باید تنش برشی درون جسم وجود داشته باشد
- فاصله بین ۲ صفحه اتمی مجاور را یک فاصله اتمی می گویند

3

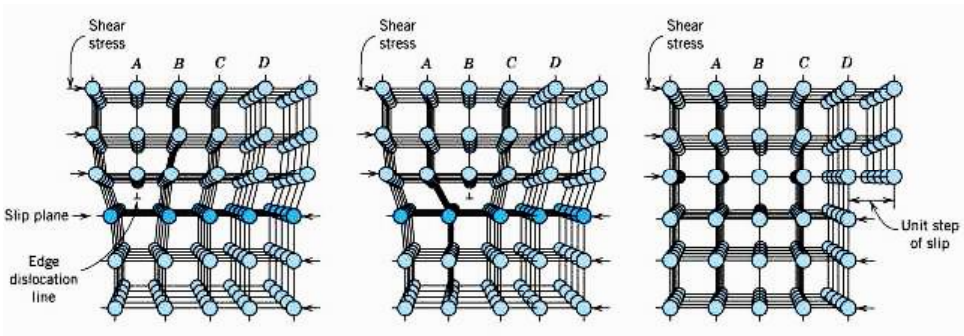
- هر نوع نیروی که روی جسم گذاشته می شود، اگر از حدی بیشتر باشد باعث تغییر شکل پلاستیک می شود . به عبارتی باید درون جسم تنش برشی به اندازه کافی بزرگ ظاهرگردد که باعث حرکت نابجایی شود. در واقع می توان برای هر دانه یک سیستم مختصات تعریف کرد طوری که یک محور در امتداد چیده شدن سلول اولیه و محور دیگر عمود بر آن باشد (محورهای سبز). نیروی که به یک دانه می رسد در این مختصات به دو مولفه تجزیه می شود. مولفه عمودی نیرو، نیروی عمودی (پیکان مشکی) و مولفه افقی نیرو همان مولفه نیروی برشی (پیکان قرمز) و مسئول حرکت نابجایی درون ماده است.



4

حال حرکت نابجایی توضیح داده می شود.

- در شکل زیر نابجایی لبه ای در موقعیت **A** است و تنش برشی به ماده وارد می شود. اگر تنش برشی به اندازه کافی بزرگ باشد ، پیوند بین اتمی بین ۲ ردیف اتمی در **B** شکسته می شود و ۲ نیم صفحه ایجاد می شود اما چون این اتمها یک پیوند خود را از دست می دهند



5

- انرژی شان افزایش می یابد و تمایل به پیوند مجدد دارند. پس در ادامه نیم صفحه پایینی **B** با نیم صفحه **A** پیوند می دهد و نیم صفحه اتمی یا نابجایی لبه ای به **B** منتقل می شود. با تکرار مطالب فوق برای صفحات اتمی **C, D** در نهایت نابجایی به سطح جسم ختم می شود و در سطح جسم لبه ای به اندازه یک فاصله اتمی ایجاد می کند.

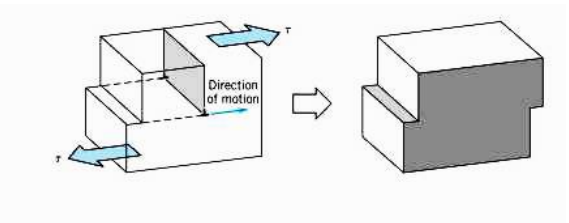
- لبه ایجاد شده باعث می شود که نیمی از بلور نسبت به نیم دیگر جابجا شود (شکل سمت راست در اسلاید ۷)
- درون ماده تعداد زیادی نابجایی وجود دارد که با اعمال نیرو ، شروع به حرکت می کنند و بعضی از آنها به سطح جسم ختم می شوند و لبه های به بزرگی هزاران برابر فاصله اتمی ایجاد می کنند اما چون

6

- بین ۲ قسمت بلور پیوند اتمی وجود دارد این جابجایی به شکل افزایش ابعاد یا تغییر ابعاد (تغییر شکل پلاستیک) مشاهده می شود.

- در شکل زیر با حرکت یک نابجایی لبه ای ، یک لبه ایجاد شده است و زمانی که نابجایی به انتهای سمت راست برسد کل نیمه بالایی نسبت به پایینی به اندازه یک فاصله اتمی جابجا می شود (شکل راست).

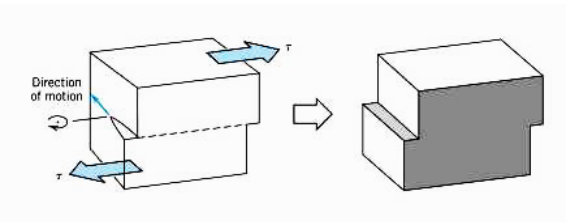
- طبق شکل جهت حرکت نابجایی لبه ای موازی جهت تنش اعمالی است.



7

- اگر با حرکت نابجایی پیچی این لبه در حال تشکیل باشد، طبق شکل زیر جهت حرکت نابجایی به داخل صفحه است.
- پس جهت حرکت نابجایی پیچی عمود بر تنش اعمالی است

- صفحه لغزش (Slip plane): صفحه ای است که نابجایی روی آن تحت تنش برشی لغزش می کند (شکل اسلاید ۵)



8

- تمام فلزات و آلیاژها دارای نابجایی هستند. از جمله منابع تولید نابجایی ، انجماد، تغییر شکل پلاستیک و تنش های حرارتی است.
- میزان نابجایی یک ماده با چگالی نابجایی[1] گزارش می شود و عبارت است از طول خط نابجایی به حجم ماده یا تعداد نابجایی به سطح ماده

$$\rho = \frac{L}{V} \quad or \quad \rho = \frac{N}{A} \qquad mm^{-2}$$

- کمترین چگالی نابجایی مربوط به فلزی است که مذاب آن با دقت و آهسته سرد شده است و برابر $10^3\ mm^{-2}$
- چگالی فلزی که به مقدار زیاد تغییر شکل پلاستیک داده است $10^9 - 10^{10}\ mm^{-2}$

1- Dislocation density

- چگالی نابجایی فلزی که به مقدار زیاد تغییر شکل پلاستیک داده است و سپس عملیات حرارتی تابکاری شده است $10^5 - 10^6\ mm^{-2}$

عملیات حرارتی مجموعه ای از گرم و سرد کردن ها است که روی جسم جامد انجام می شود تا خواصی از ماده بهبود یابد. تابکاری[1] یا آنیل کردن عملیاتی است که بعد از آن ماده نرم می شود و در واقع چگالی نابجایی کم می گردد.

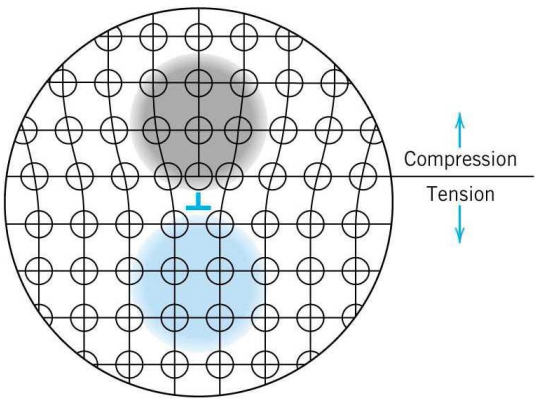
1- Annealing

- چگالی نابجایی مواد سرامیکی $10^2 - 10^4\ mm^{-2}$
- چگالی نابجایی تک بلور سیلسیسم که در مدارهای مجتمع بکار می رود $0.1 - 1\ mm^{-2}$

مشخصه های نابجایی

- ۱- در فصل ۴ برای نابجایی لبه ای فرض شد یک نیم صفحه اتمی با فشار ما بین صفحات کامل اتمی وارد می شود که لبه این نیم صفحه نابجایی لبه ای است. در جای که نیم صفحه وجود دارد تا فاصله ای از آن صفحات اتمی تحت تغییر شکل و کرنش فشاری است و در سمت مقابل تا فاصله ای صفحات اتمی تحت کرنش کششی هستند.

در شکل زیر در اطراف نابجایی لبه ای، منطقه تیره تر تحت کرنش فشاری و در زیر آن منطقه با تیره گی کمتر تحت کرنش کششی است. بطور کلی هر نوع نابجایی با خود کرنش فشاری و کششی همراه دارد.



- ۲- انرژی که صرف تغییر شکل پلاستیک می شود ۹۵٪ آن به صورت حرارت از جسم خارج می شود و ۵٪ آن درون جسم ذخیره می شود. انرژی ذخیره شده به صورت انرژی کرنشی همراه نابجایی ها است (صفحات اطراف به دلیل تغییر شکل انرژی بالاتری دارند و همین افزایش انرژی ، انرژی کرنشی است)

- ۳- تغییر شکل پلاستیک یک منبع تولید نابجایی است. در این حالت
  الف- تکثیر نابجایی های قبلی باعث نابجایی های جدید می شود
  ب- مرز دانه ها، عیوب داخلی و ناپیوستگی های سطحی (خراش، بریدگی .....) محل های برای تمرکز تنش هستند و مکان های برای تشکیل نابجایی جدید

13

سیستم های لغزش

- نابجایی ترجیح می دهد در صفحه خاصی حرکت کند که به آن صفحه لغزش می گویند. در صفحه لغزش نیز جهات معینی وجود دارد که نابجایی در آن امتدادها ترجیح می دهد لغزش کند که به آنها جهات لغزشی گفته می شود.
- از نظر بلورشناسی صفحه لغزش، صفحه ای با بیشترین چگالی صفحه ای و جهات لغزش، جهاتی با بیشترین چگالی خطی است.
- به ترکیب صفحه لغزش و جهت لغزش، سیستم لغزشی می گویند. مثلا نام سیستم لغزشی فلزات FCC و تعداد سیستم لغزشی آنها به ترتیب عبارتند از:

FCC = {111}<110>

$$slip\ system\ numbers = 4 \times 3 = 12$$

14

- تعداد سیستم های لغزشی bcc ، ۱۲ است. دلیل آن که فلزات fcc نرم تر و شکل پذیرتر هستند آن است که با افزایش نیرو می تواند ۱۲ سیستم لغزشی آن با هم فعال شود ، در حالی که برای bcc ، بعضی از سیستم ها در دمای پایین و بعضی در دمای بالا فعال هستند و در یک دمای مشخص ۱۲ سیستم لغزشی فعال نیستند.

- تعداد سیستم های لغزشی در HCP ، ۳ است و به همین دلیل نسبت به BCC , FCC تردتر هستند.

15

مکانیزمهای استحکام دهی

- افزایش استحکام (تسلیم و کششی) فلزات را استحکام دهی می گویند. در روشهای استحکام دهی به روشی حرکت نابجایی کند یا متوقف می شود.

- معمولا با افزایش استحکام ، انعطاف پذیری کاهش می یابد

- روشهای استحکام دهی فلزات

الف- ریز کردن دانه

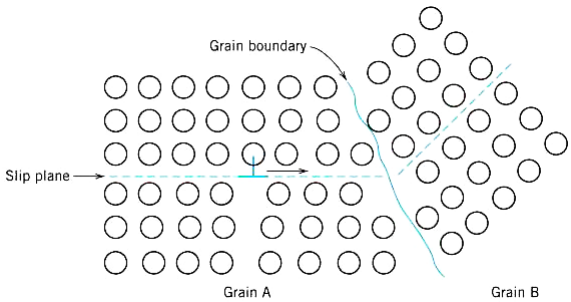
ب- استحکام دهی محلول جامد

ج- کرنش سختی (کار سختی)

16

ریز کردن دانه

- زمانی تغییر شکل پلاستیک اتفاق می افتد که نابجایی بتواند درون دانه حرکت کند. وقتی نابجایی به مرزدانه می رسد ، متوقف می شود. در واقع مرزدانه مانعی در برابر حرکت نابجایی است.
- وقتی دانه ریز می شود ، مقدار مرزدانه افزایش می یابد و مانع بیشتری سر راه نابجایی ظاهر می شود که باعث توقف نابجایی و افزایش استحکام می گردد



17

- معادله هال- پچ [1] ، ارتباط بین تنش تسلیم و اندازه دانه را بیان می کند. در این رابطه **d** قطر متوسط دانه ، σ_0 و k_y ثابت های ماده هستند که داده می شود. این معادله برای بسیاری از چند بلورها صادق است ، مگر اندازه دانه خیلی ریز یا خیلی درشت باشد

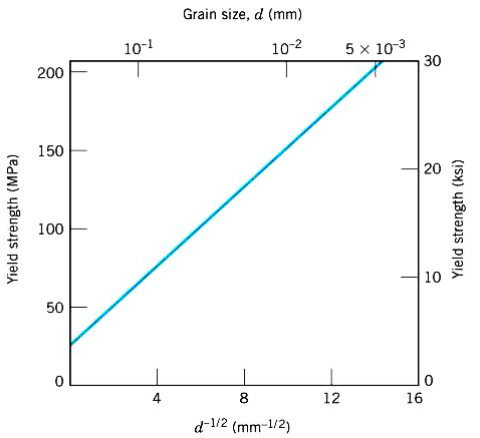
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y\, d^{-1/2}$$

- ریز کردن دانه تنها روشی است که علاوه بر افزایش استحکام تسلیم، باعث افزایش انعطاف پذیری و در نتیجه افزایش چقرمگی می شود
- برای ریز دانه کردن فولاد باید به مذاب آهن (علاوه بر پودر گرافیت که منبع کربن) عنصر آلیاژی وانادیم اضافه شود، تا زمان انجماد به شکل ریز دانه متبلور شود.

1- Hall- Petch

18

در نمودار زیر مشاهده می شود با ریز شد ن دانه (حرکت به سمت چپ)، تنش تسلیم افزایش می یابد.



19

استحکام دهی محلول جامد

- با تشکیل آلیاژ محلول جامد جانشینی یا بین نشینی می توان استحکام فلز خالص را افزایش داد. در این قسمت محلول جامد جانشینی بررسی می شود
- در اسلاید بعد دیده می شود در محلول جامد جانشینی مس-نیکل ، با افزایش در صد نیکل ، استحکام تسلیم و کششی افزایش اما انعطاف پذیری کاهش می یابد
- اتم جانشینی نسبت به اتم مادر بزرگتر یا کوچکتر است. اگر بزرگتر باشد برای این که جای خود را باز کند ، اطراف را تحت کرنش فشاری قرار می دهد و اگر کوچکتر باشد چون اتم های اطراف مکان بیشتری برای حضور خواهند داشت مانند آن است که اطراف را تحت کرنش کششی قرار می دهد

20

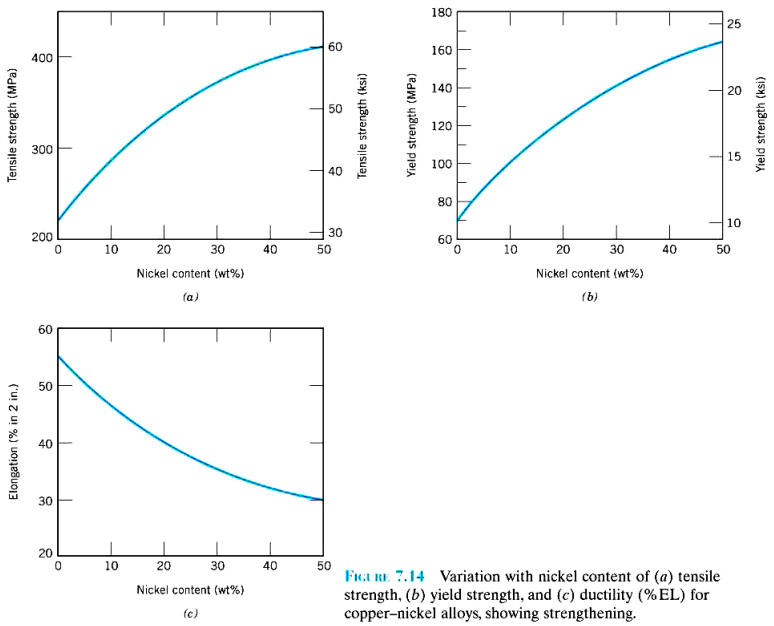
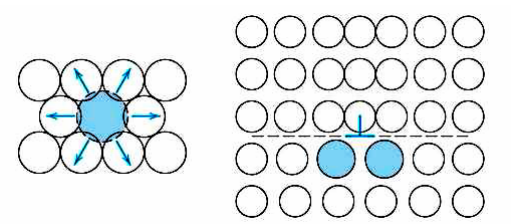


FIGURE 7.14 Variation with nickel content of (*a*) tensile strength, (*b*) yield strength, and (*c*) ductility (%EL) for copper–nickel alloys, showing strengthening.

21

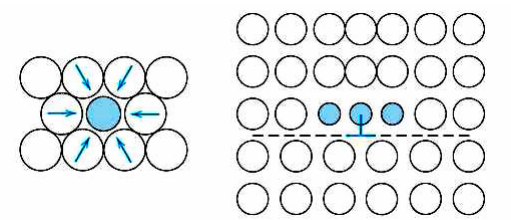
- اتم جانشینی نسبت به اتم مادر بزرگتر یا کوچکتر است. اگر بزرگتر باشد برای این که جای خود را باز کند ، اطراف را تحت کرنش فشاری قرار می دهد و اگر کوچکتر باشد چون اتم های اطراف مکان بیشتری برای حضور خواهند داشت مانند آن است که اطراف را تحت کرنش کششی قرار می دهد. پس اتم بزرگتر با خود کرنش فشاری و



- شکل بالا ، کرنش فشاری اتم بزرگتر و طرز قرار گرفتن اتم ناخالصی نسبت به نابجایی لبه ای را نشان می دهد

22

- اتم کوچکتر با خود کرنش کششی می آورد. چون اطراف خط نابجایی مقداری فضا وجود دارد ، اتم های جانشینی ترجیح می دهند اطراف خط نابجایی قرار بگیرند. بعلاوه اتم بزرگتر نسبت به نابجایی لبه ای طوری قرار میگیرد که کرنش فشاری آن بطور جزیی کرنش کششی نابجایی را کاهش دهد. اگر اتم کوچکتر باشد نسبت به نابجایی طوری قرار می گیرد که کرنش کششی آن بطور جزیی کرنش فشاری نابجایی را کاهش دهد. در هر حالت انرژی بلور کاهش و به پایداری بیشتری می رسد.



- شکل بالا ، کرنش کششی اتم کوچکتر و طرز قرار گرفتن اتم ناخالصی نسبت به نابجایی لبه ای را نشان می دهد

23

- به دلیل بر هم کنش کرنشهای اتم ناخالصی و نابجایی ، حرکت نابجایی محدود می شود و در واقع استحکام محلول جامد بیش از فلز خالص می گردد.

کرنش سختی[1] (کار سختی[2])

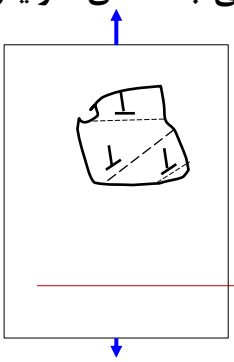
پدیده ای است که به موجب آن یک فلز نرم در اثر تغییر شکل پلاستیک، سخت تر و مستحکم تر می شود.

به این عملیات کار سرد هم گفته می شود. کار سرد[3] تغییر شکل پلاستیکی است که در دمای کمتر از $\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{2}$ دمای ذوب فلز انجام می شود. پس تغییر شکل پلاستیک اکثر فلزات در دمای محیط کار سرد می باشد.

1- Strain hardening 2- Work hardening 3- Cold working

24

- تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش نابجایی می شود و چگالی نابجایی درون دانه مانند شکل زیر افزایش می یابد. خط چین صفحه لغزشی نابجایی را نمایش می دهد.
- هر چه میزان کار سرد بیشتر، نابجایی بیشتری درون دانه ایجاد می شود. زمانی که تعداد نابجایی ها درون دانه زیاد باشد، احتمال برخورد نابجایی های متحرک هم بیشتر می شود.
- وقتی نابجایی های متحرک با یگدیگر برخورد می کنند، هم دیگر را قفل می کنند و متوقف می شوند. متوقف شدن نابجایی به معنای افزایش استحکام قطعه است.



25

- معمولا میزان تغییر شکل پلاستیک بر حسب در صد کار سرد به صورت زیر بیان می شود

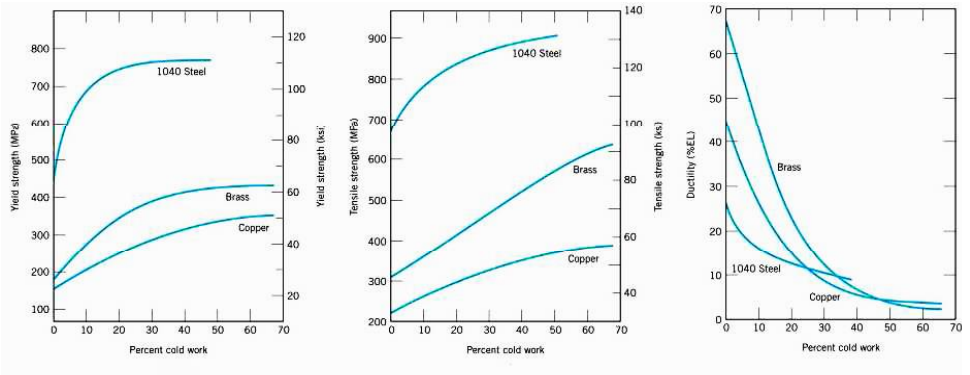
$$CW\% = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

A_0 سطح مقطع اولیه و A_1 سطح مقطع ثانویه است

- در شکل بعد دیده می شود با افزایش CW% ، استحکام تسلیم و کششی افزایش اما انعطاف پذیری کاهش می یابد.

- کار سختی یک روش متداول برای افزایش خواص مکانیکی فلزات در طی فرآیند ساخت است.

26



- **مسئله: در صد کار سرد را برای یک میله مسی که از قطر 15.2 mm به 12.2 mm می رسد را محاسبه کنید.**

$$cw\% = \frac{\pi\left(\frac{15.2}{2}\right)^2 - \pi\left(\frac{12.2}{2}\right)^2}{\pi\left(\frac{15.2}{2}\right)^2} \times 100 = 35.6\%$$