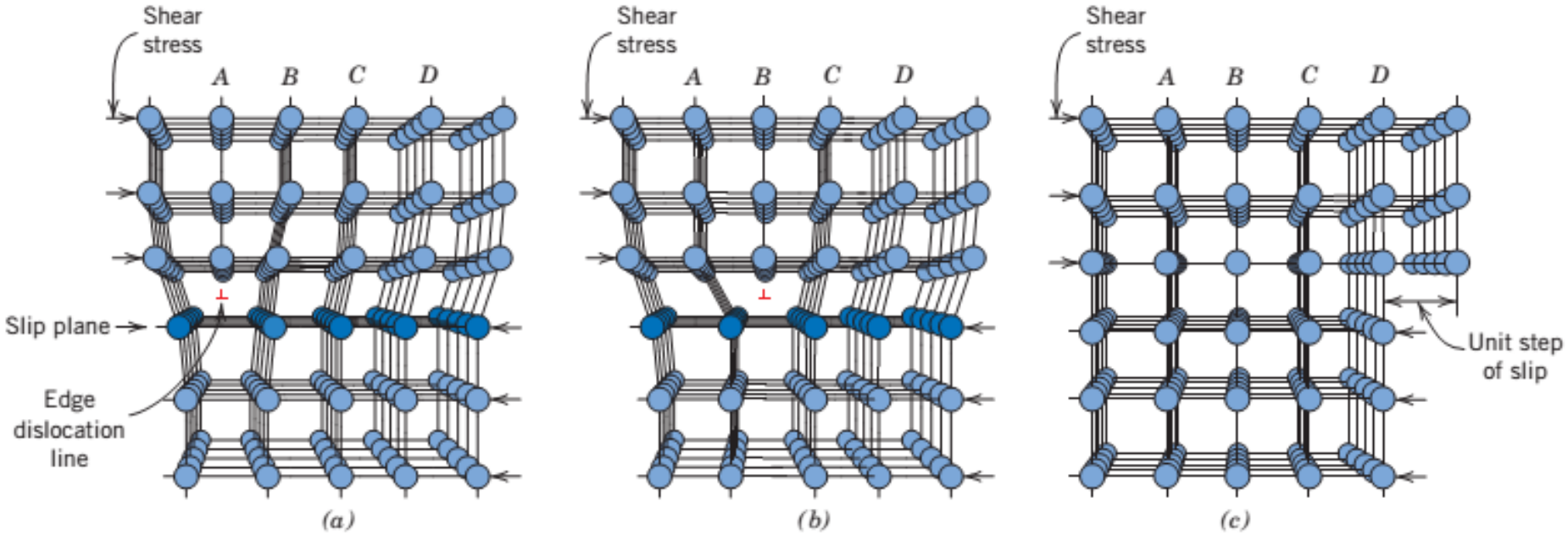
به نام خدا

نابجایی ها و مکانیزمهای استحکام دهی

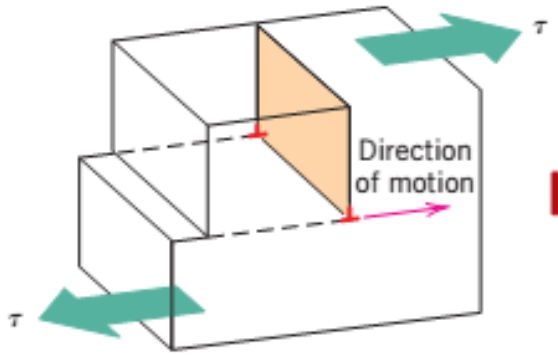
Dislocations and strengthening mechanisms

نابجایی ها و تغییرشکل پلاستیک

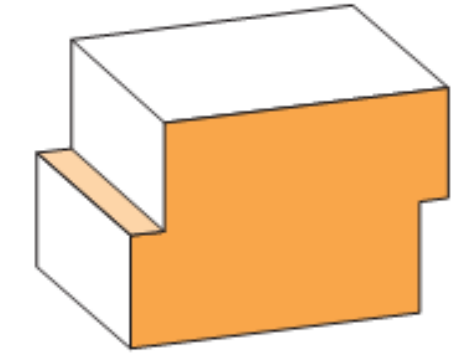
- تغییرشکل پلاستیک ناشی حرکت تعداد زیادی نابجایی ها ناشی از تنش برشی (shear stresss) است.
- فرآیندی که در آن تغییرشکل پلاستیک تولید می شود را لغزش (slip) گویند، و صفحه که در آن لغزش رخ میدهد را صفحه لغزش (slip plane) نامند.



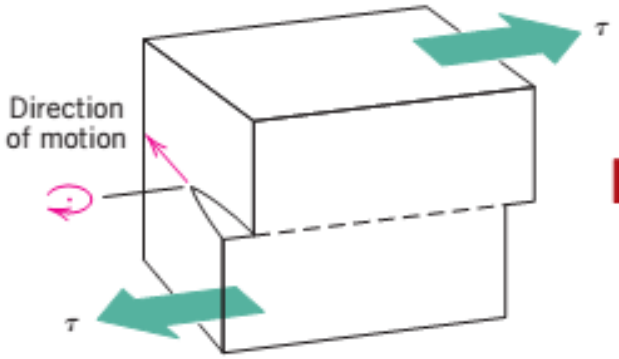
تغییر شکل پلاستیک ایجادشده ناشی از حرکت نابجایی ها



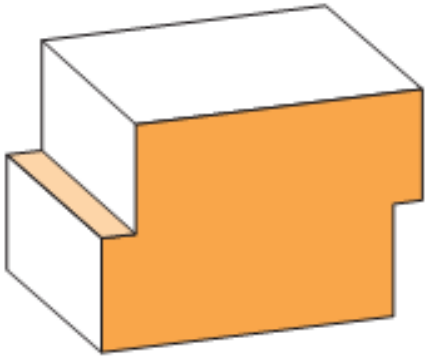
(a)



نابجایی
خطی



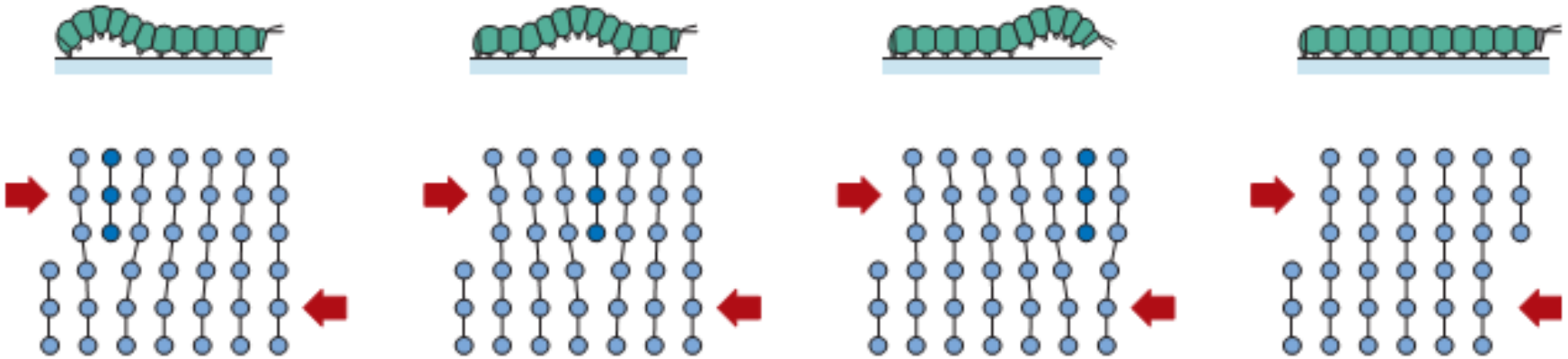
(b)



نابجایی
پیچی

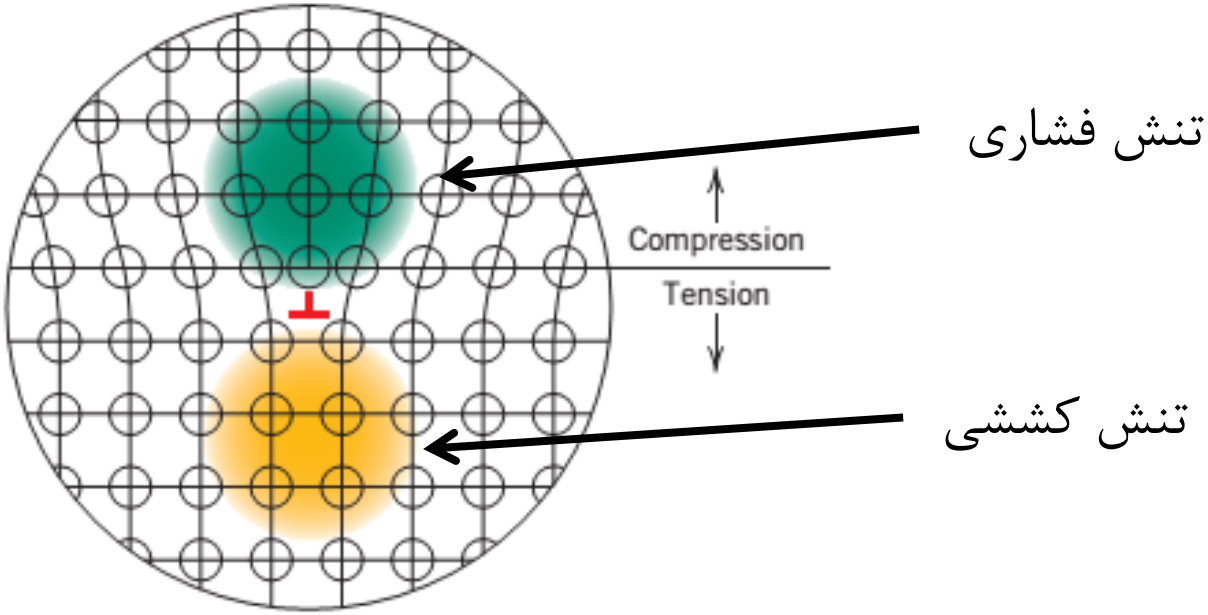
- همه فلزات و آلیاژها شامل نابجایی هستند که در طول انجماد و تغییرشکل پلاستیک و تنش های حرارتی ناشی از سرد شدن سریع بوجود می آیند.
- چگالی نابجایی یک ماده بصورت طول کل نابجایی ها در واحد حجم یا تعداد نابجایی های که بطور تصادفی یک مساحت واحد را قطع میکنند بیان می شود، و واحد آن میلیمتر نابجایی بر میلیمتر مکعب یا یک بر میلیمتر مربع است.
- چگالی 1000 mm^-2 در انجماد کنترل شده یک کریستال فلزی طبیعی است. برای تغییرشکل های سنگین مقدار آن 10^9 mm^-2 تا 10^10 mm^-2 است.
- عملیات حرارتی یک جسم تغییرشکل پلاستیک پیدا کرده می تواند 10^5 mm^-2 تا 10^6 mm^-2 نابجایی را نابود کند.

نحوه حرکت نابجایی

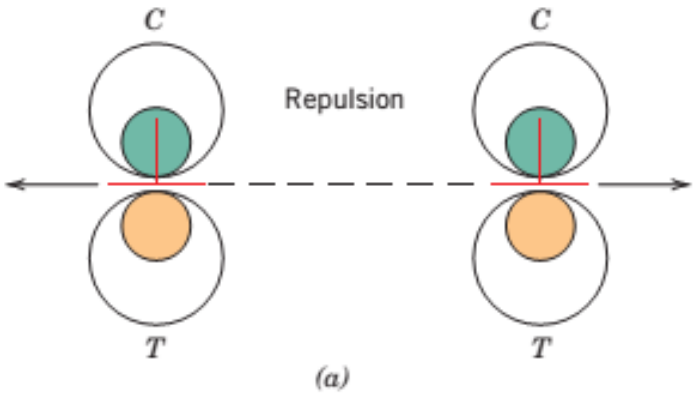


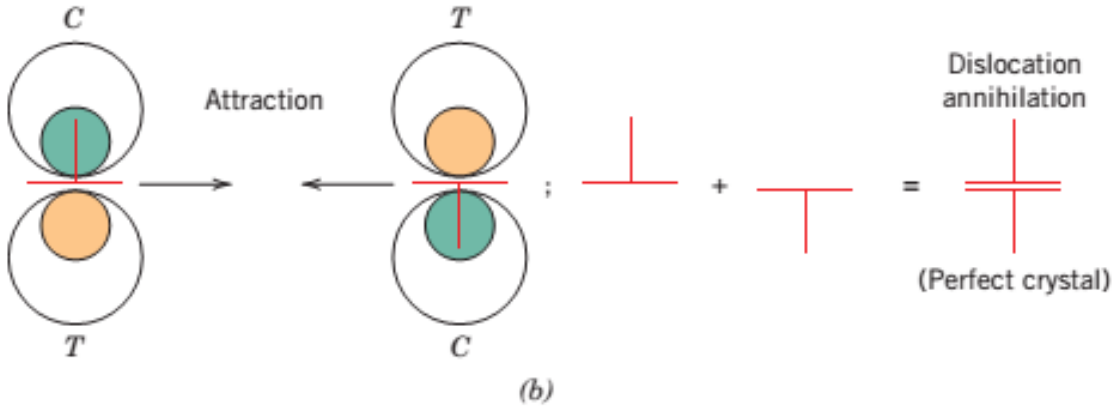
مشخصه های نابجایی ها

- هنگام تغییرشکل پلاستیک ماده مقداری از انرژی ناشی از تغییرشکل بصورت انرژی کرنشی در ماده ذخیره شده و مقدار زیادی از آن بصورت حرارت تلف می شود.
- این انرژی کرنشی مربوط به نابجایی ها است. در اطراف نابجایی نوع تنش فشاری و کششی بوجود می آید.



C: منطقه فشاری
T: منطقه کششی





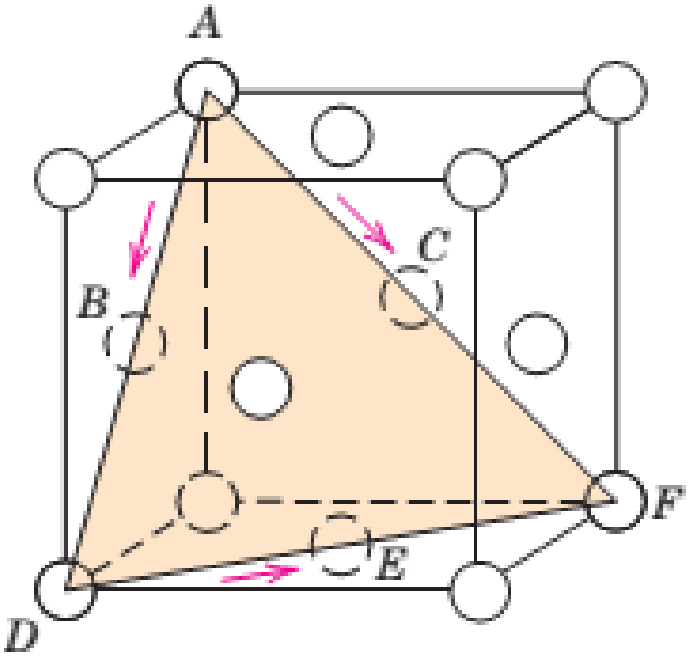
a) دو نابجایی لبه ای با علامت یکسان هستن که روی یک صفحه لغزش قرار گرفته اند و به همدیگر نیروی دافعه وارد می کنند.

b)دو نابجایی لبه ای با علامت مخالف روی یک صفحه لغزش که به همدیگر نیروی جاذبه وارد می کنند، و وقتی به همدیگر میرسند نابجایی ها از بین می روند.

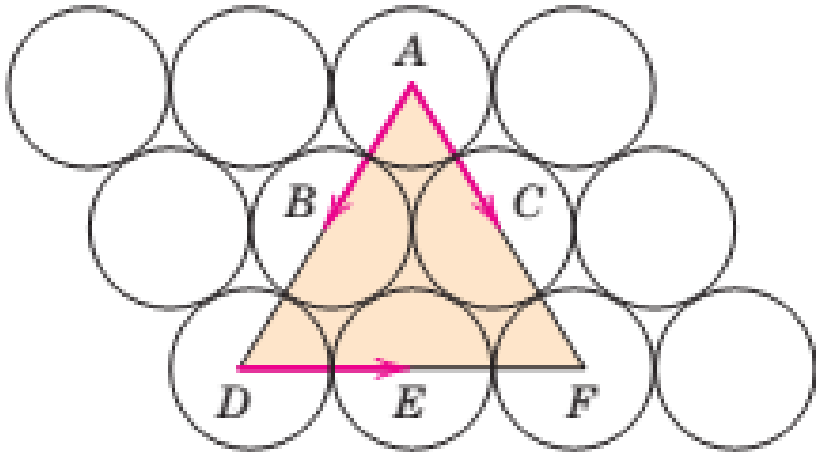
سیستمهای لغزش (SLIP SYSTEMS)

- نابجایی ها روی هر صفحه ای در کریستال حرکت نمی کنند، بلکه صفحاتی وجود دارد که در جهات خاصی روی آن صفحات لغزش صورت میگیرد.
- ترکیب صفحه لغزش و جهت لغزش را سیستم لغزش گویند.
- صفحه لغزش صفحه ای است که بیشترین چگالی اتمی را دارد، و جهت لغزش نیز جهتی است که بیشترین چگالی خطی را دارد.
- برای ساختار FCC این سیستم لغزش شامل خانواده صفحات {۱۱۱} و خانواده جهات<۱۱۰> است. پس برای ساختار FCC تعداد ۱۲ سیستم لغزش وجود دارد: چهار تا مربورط به صفحات {111} و برای هر صفحه نیز سه جهت مستقل <۱۱۰> وجود دارد.

سیستم لغزش ساختار FCC



(a)



(b)

سیستمهای لغزش برای ساختارهای BCC, FCC, HCP

Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

Metals	*Slip Plane*	*Slip Direction*	*Number of Slip Systems*
	Face-Centered Cubic		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
	Body-Centered Cubic		
α-Fe, W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α-Fe, W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α-Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
	Hexagonal Close-Packed		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

- بردار برگرز برای ساختارهای BCC, FCC, HCP بصورت زیر است:

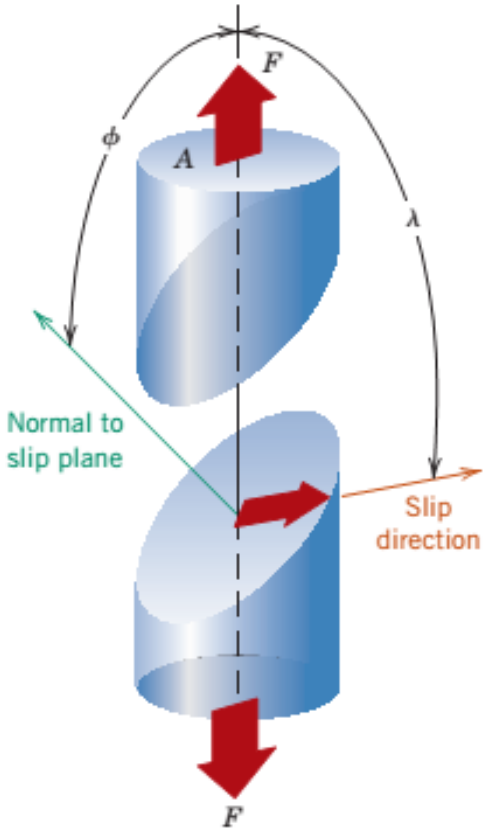
$$b(FCC) = \frac{a}{2}\langle 110 \rangle$$

$$b(BCC) = \frac{a}{2}\langle 111 \rangle$$

$$b(HCP) = \frac{a}{3}\langle 11\bar{2}0 \rangle$$

لغزش در تک کریستال

- اگر Φ زاویه بین بردار نرمال صفحه لغزش و جهت اعمال نیرو باشد و λ زاویه بین صفحه لغزش و جهت اعمال نیرو باشد، تنش برشی در صفحه لفزش بصورت زیر بدست می آید:



$$\tau_R = \sigma \cos\phi \cos\lambda$$

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

$$\phi + \lambda = 90$$

- با توجه به اینکه در هر کریستال چندین صفحه لغزش وجود دارد حداکثر تنش برشی بصورت زیر بدست می آید:

$$\tau_R(\max) = \sigma(\cos\phi \cos\lambda)_{\max}$$

لغزش در تک کریستال

- لغزش در تک کریستال موقعی رخ می دهد که تنش برشی ناشی از تنش کششی یا فشاری به یک مقدار بحرانی (τ_{crss})برسد. این تنش حداقل تنش مورد نیاز برای شروع لغزش است.
- تسلیم در تک کریستال موقعی رخ می دهد که: $\tau_R\,(\max) \geq \tau_{crss}$
- حداقل تنش نرمال مورد نیاز برای شروع تسلیم از رابطه زیر بدست می آید:

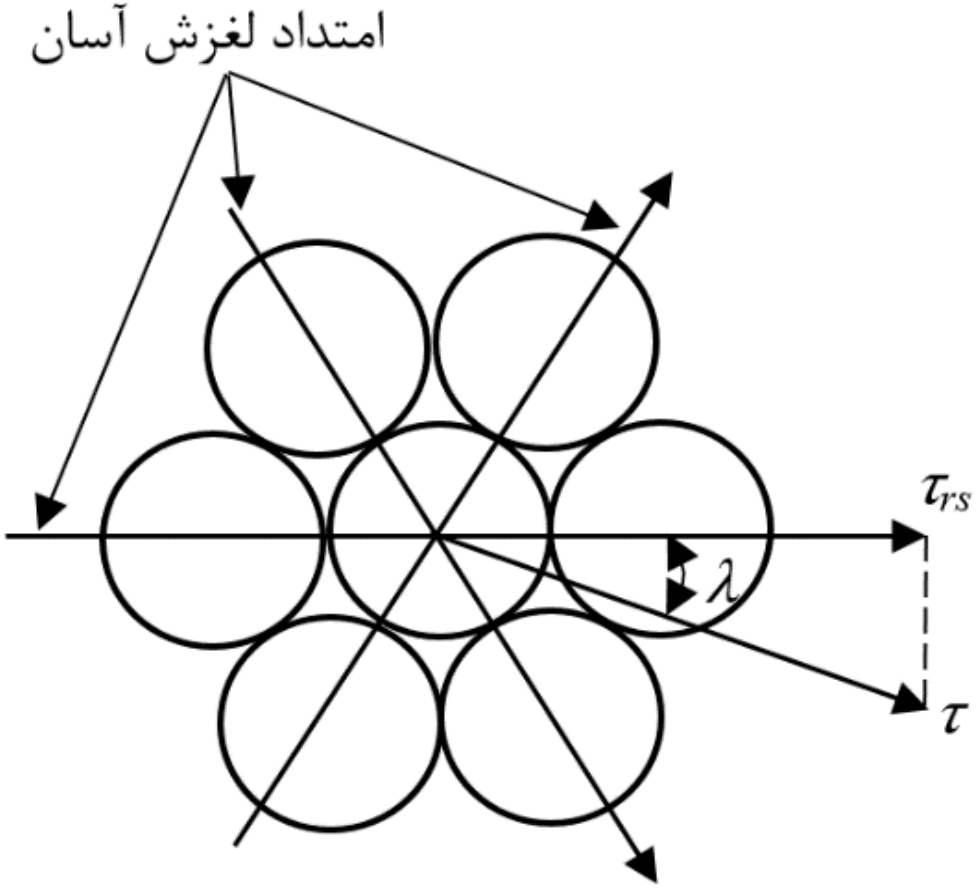
$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{\left(\cos\phi\cos\lambda\right)_{\max}}$$

- این حداقل تنش نرمال موقعی بدست می آید که: $\phi = \lambda = 45^o$

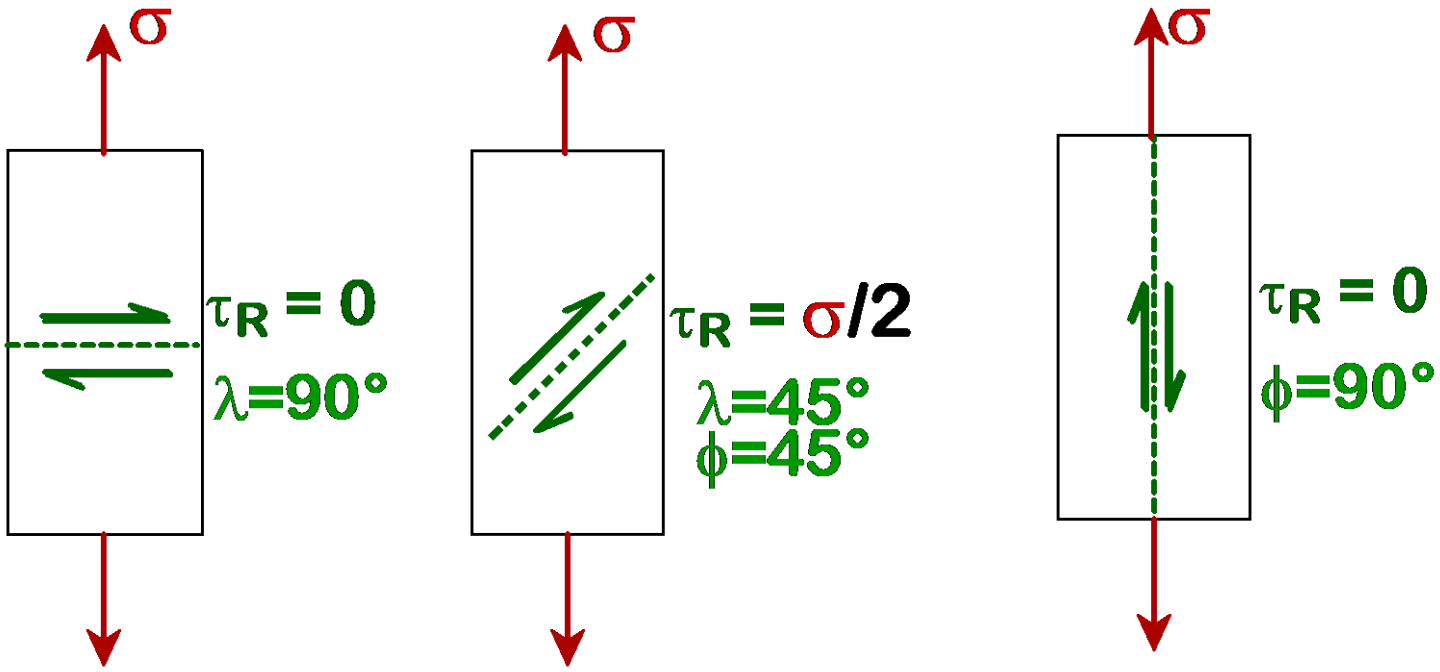
و برابراست با:

$$\sigma_y = 2\tau_{crss}$$

تجزیه تنش برش در یک امتداد لغزش

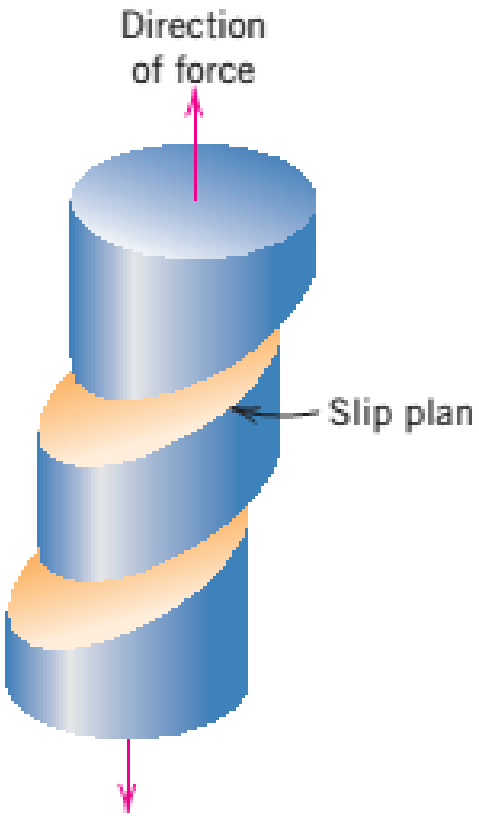


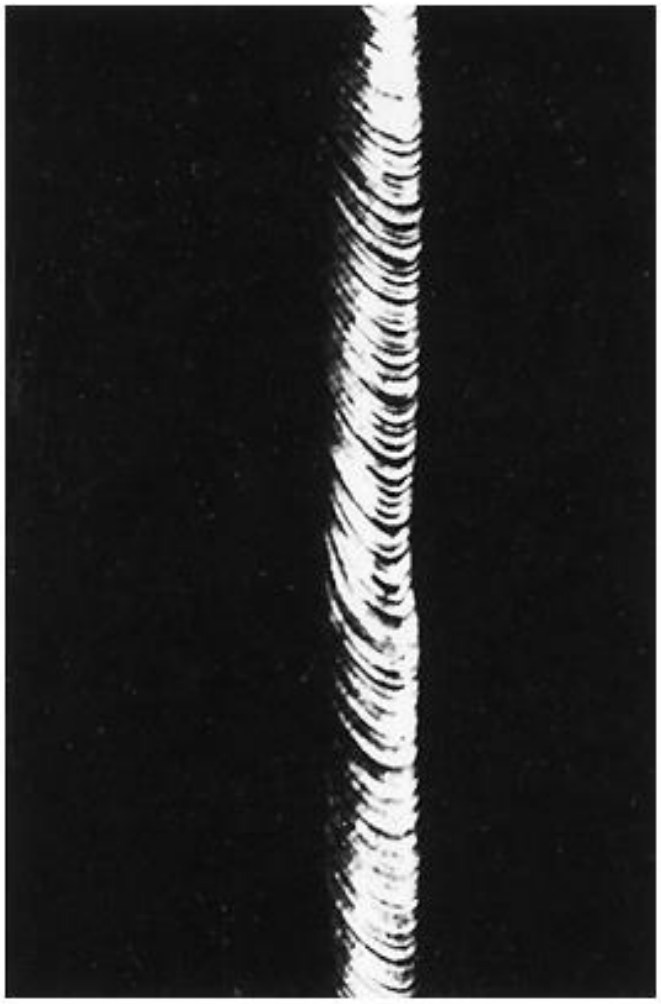
لغزش در تک کریستال



اگر صفحه‌های لغزش موازی یا عمود بر امتداد تنش باشد، لغزشی انجام نمی‌گیرد و ماده یا با دوقلویی شدن تغییر شکل می‌دهد و یا می‌شکند.

لغزش در تک کریستال





مثال) در کریستال آهن BCC تنش کششی در جهت [010] اعمال می شود.

الف) تنش برشی ناشی از آن را در صفحه (110) و در جهت $[\bar{1}11]$ را هنگامی که تنش کششی 52 MPa است محاسبه کنید.

ب) اگر لغزش در صفحه (110) و جهت $[\bar{1}11]$ رخ دهد، و تنش برشی بحرانی نیز 30 MPa باشد مقدار تنش کششی اعمالی مورد نیاز جهت شروع تسلیم چقدر است.

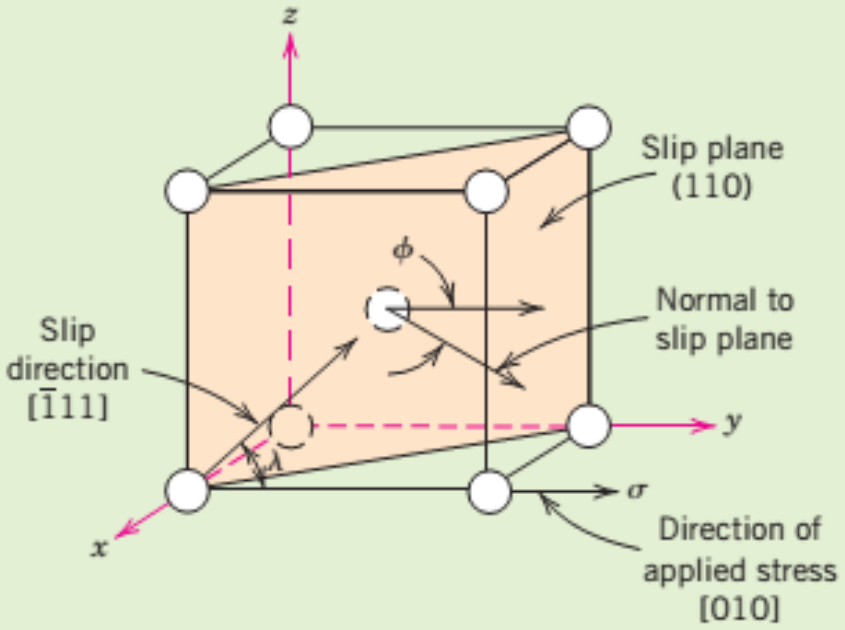
حل: برای ساختارهای مکعبی، زاویه بین جهت۱ $[u_1\ v_1\ w_1]$ و جهت ۲ $[u_2\ v_2\ w_2]$ از رابطه زیر بدست می آید:

$$\theta = \cos^{-1}\left[\frac{u_1u_2 + v_1v_2 + w_1w_2}{\sqrt{(u_1^2 + v_1^2 + w_1^2)(u_2^2 + v_2^2 + w_2^2)}}\right]$$

For the determination of the value of ϕ, let $[u_1v_1w_1] = [110]$ and $[u_2v_2w_2] = [010]$ such that

$$\phi = \cos^{-1}\left\{\frac{(1)(0) + (1)(1) + (0)(0)}{\sqrt{[(1)^2 + (1)^2 + (0)^2][(0)^2 + (1)^2 + (0)^2]}}\right\}$$

$$= \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 45°$$



$$\lambda = \cos^{-1}\left[\frac{(-1)(0) + (1)(1) + (1)(0)}{\sqrt{[(-1)^2 + (1)^2 + (1)^2][(0)^2 + (1)^2 + (0)^2]}}\right]$$
$$= \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 54.7°$$

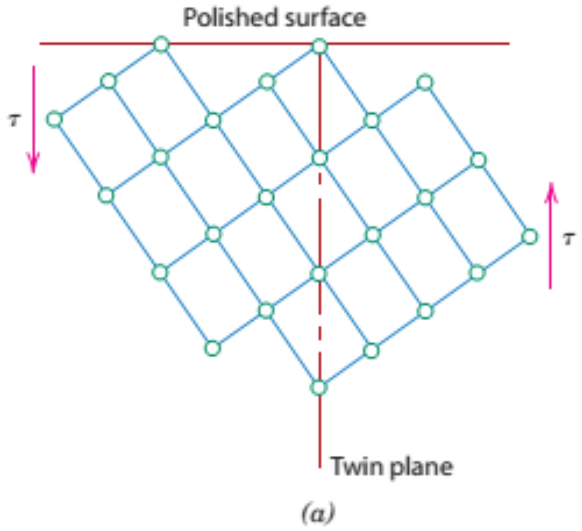
$$\tau_R = \sigma \cos\phi \cos\lambda = (52\ \text{MPa})(\cos 45°)(\cos 54.7°)$$
$$= (52\ \text{MPa})\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$$
$$= 21.3\ \text{MPa}\ (3060\ \text{psi})$$

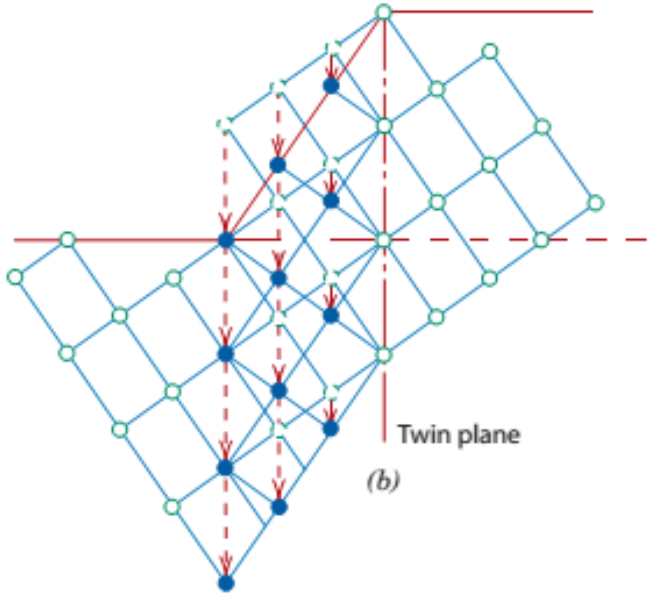
ب)

$$\sigma_y = \frac{30\ \text{MPa}}{(\cos 45°)(\cos 54.7°)} = 73.4\ \text{MPa}\ (10{,}600\ \text{psi})$$

تغییرشکل توسط دوقلویی

- علاوه بر لغزش، در برخی فلزات تغییرشکل پلاستیک می تواند توسط دوقلویی رخ دهد.
- در این مکانیزم، نیروی برشی اتمهای روی یک صفحه (مرز دوقلویی) را به صفحه قرینه (مرز دیگر دوقلویی) منتقل می کند.





مقایسه دو مکانیزم دوقلویی و لغزش

1. لغزش با حرکت خطوط نزدیک به هم انجام می شود.
2. دوقلویی با حرکت دسته جمعی اتمها ایجاد می شود و منطقه تغییرشکل کاملا مشخص است.
3. دوقلویی با کسر کوچکی از حجم ماده تشکیل می شود و تغییرشکل آن کم است.
4. ایجاد دوقلویی ممکن است باعث شود که سیستمهای لغزشی در شبکه بلوری ایجاد شود که لغزش در آنها راحتتر است.
5. ساختارهای HCP آمادگی بیشتری برای تشکیل دوقلویی دارند چون سیستمهای لغزش آن کمتر است.
6. پدیده دوقلویی در ساختار HCP در دمای معمولی رخ میدهد در حالیکه در ساختارهای FCC و BCCدر دماهای پایین رخ میدهد.
7. برخی فلزات با ساختار BCC با اعمال کرنش با نرخ بالا دوقلویی ایجاد می کنند.
8. فلزات با ساختار FCC در دماهای خیلی پایین و نرخ کرنش بالا دوقلویی ایجاد می کنند.

مقایسه دو مکانیزم دوقلویی و لغزش

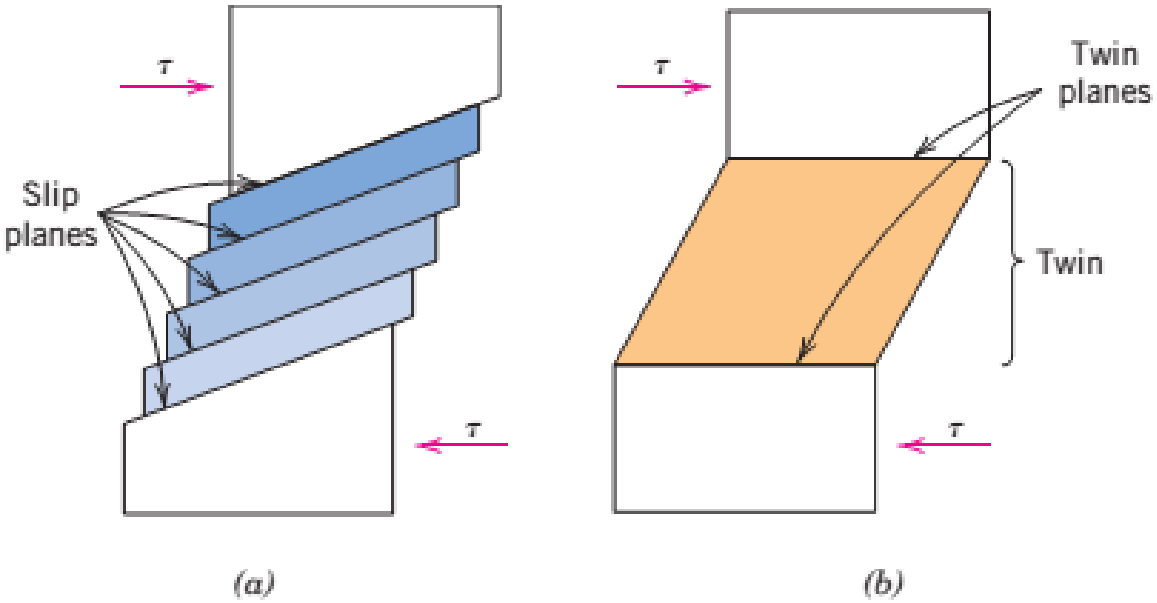


Figure 7.13 For a single crystal subjected to a shear stress τ, (*a*) deformation by slip; (*b*) deformation by twinning.

مکانیزم تغییر شکل پلاستیک در بسبلورها

1. بسبلور متشکل از دانه و مرزدانه است. در نتیجه تغییرشکل پلاستیک در بسبلورها متاثر از این دوعامل است.
2. در بسبلورها، در هر دانه تغییر شکل پلاستیک برروی جهات و صفحات خاص انجام می شود.
3. در بسبلورها، مرزدانه ها حرکت نابجایی ها را محدود می کند.
4. میزان تغییرشکل پلاستیک در داخل دانه ها نه تنها متاثر از لغزش است، بلکه متاثر از قیودی است که از طرف مرزدانه ها اعمال می شود. در نتیجه اختلاف قابل توجهی بین میزان تغییرشکل در نواحی مجاور مرزدانه ها وجود دارد.
5. با کاهش اندازه دانه تغییرشکل پلاستیک همگن تر می شود.
6. به علت وجود مرزدانه ها و اعمال قید بر لغزش دانه ها، همزمان امکان لغزش بر روی چند سیستم وجود دارد.

چون معمولا سیستم های لغزش در نزدیک مرزدانه ها شروع به لغزش می کنند سختی مرزدانه ها بیشتر از داخل دانه است.

شرایط ایجاد تغییرشکل پلاستیک در بسبلورها

1. حداقل ۵ سیستم لغزش مستقل نیاز است که تغییرشکل پلاستیک در بسبلورها رخ دهد.
2. بلورهایی که دارای ۵ سیستم لغزش مستقل نیستند به صورت بسبلور نرم نیستند و ممکن است از طریق تشکیل دوقلویی کمی تغییر شکل دهد.
3. فلزات با ساختار FCC و BCC دارای ۵ سیستم لغزش مستقل هستند ولی HCP اینگونه نیست.
4. شرط ۵ سیستم لغزش، شرط لازم برای تغییرشکل پلاستیک است ولی شرط کافی نیست و قابلیت لغزش سیستم های لغزش نیز موثر است.
5. قابلیت لغزش به راحتی حرکت نابجایی ها و عبور آنها از هم می باشد (لغزش متقاطع)
6. در دمای بیشتر از نصف دمای ذوب تغییرشکل توسط لغزش به امتداد مرزدانه ها کشیده می شود.
7. با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، لغزش مرزدانه ها بیشتر می شود (خزش).
8. محدود شدن تغییرشکل پلاستیک به مرزدانه ها در دماهای بالا به علت وجود ناخالصی ها در مرزدانه و کاهش انعطاف پذیری باعث شکست قطعه در دمای بالا می شود.
9. دمایی که بالاتر از آن مرزدانه لغزش می کند و مرز از داخل دانه ضعیف تر است را دمای انسجامی (Equicohesive Temperature) گویند.

در نتیجه در دماهای بالاتر از دمای انسجامی دانه های درشت مستحکم ترند (کاهش مرزدانه) و در دماهای زیر آن دانه های ریز مستحکم ترند (افزایش مرزدانه)

تغییرات ریزساختاری در حین تغییرشکل پلاستیک بسبلورها

1. تغییرشکل پلاستیک، باعث افزایش چگالی نابجایی ها می شود.
2. در مراحل اولیه تغییرشکل، لغزش بر روی صفحات اولیه انجام می شود و نابجایی ها در کنار هم ردیف های هم سطحی ایجاد می کنند.
3. با پیشرفت تغییرشکل، مکانیزمهای تولید نابجایی شروع به کار می کنند.
4. ساختار تغییرشکل یافته به صورت یک شبکه گره دار خود را نشان می دهد.
5. جمع شدن نابجایی ها در کنار یکدیگر باعث ایجاد سلول های فرعی شده که در جدار آنها نابجایی ها با چگالی زیاد جمع شده اند.
6. بیشتر انرژی اعمال شده برای تغییرشکل پلاستیک به حرارت تبدیل می شود و در حدود ۱ درصد آن به صورت انرژی (انرژِ نابجایی ها) ذخیره می شود.

خطوط لغزش روی سطح نمونه مس بسبلور

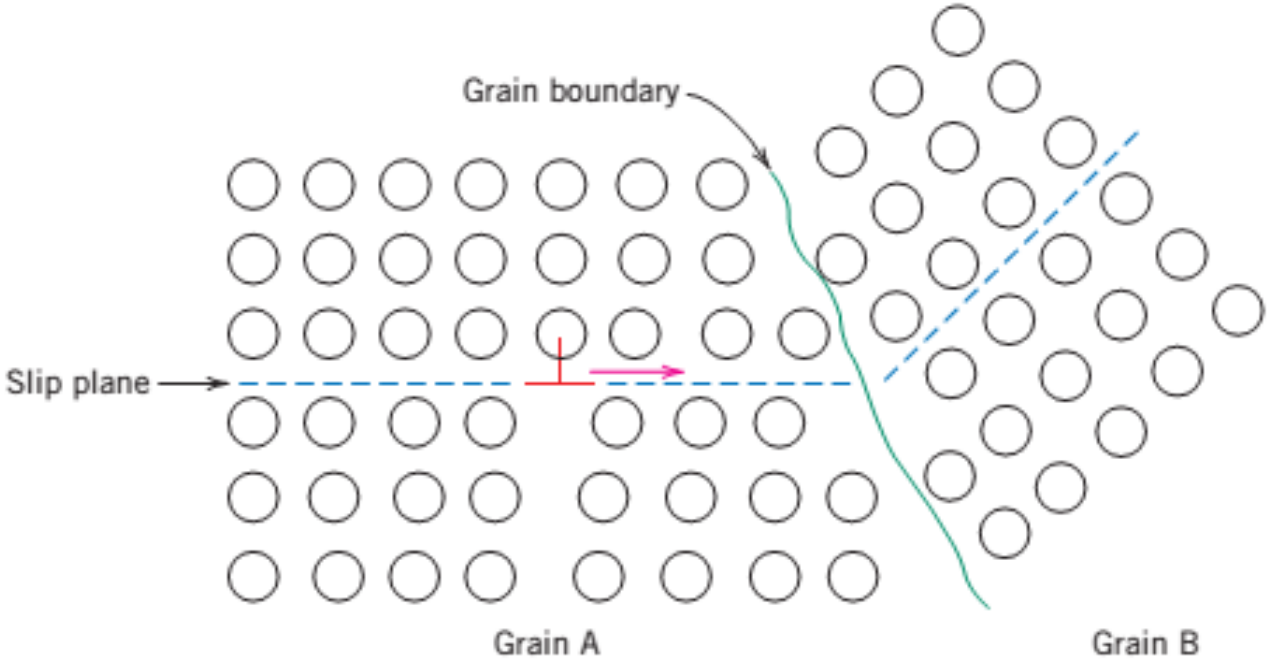
ساختار ماده بسبلور a)قبل از تغییرشکل پلاستیک b) بعد از تغییرشکل پلاستیک

مکانیزمهای استحکام دهی در فلزات

1. استحکام دهی با کاهش اندازه دانه
2. استحکام دهی محلول جامد
3. کرنش سختی و کارسرد
4. استحکام دهی با پراکنده کردن فاز ثانویه (پراکنده سختی)
5. استحکام دهی از طریق رسوب سختی
6. استحکام دهی از طریق ایجاد عیوب جای نقطه ای

استحکام دهی توسط کاهش اندازه دانه

- در طول تغییر شکل پلاستیک، لغزش یا حرکت نابجایی ها باید در مرزدانه از دانه A به دانه B اتفاق بیافتد.



مرزدانه به دو دلیل زیر به عنوان مانع بر سر راه نابجایی عمل می کند:

۱- از آنجایی که دو دانه جهت متفاوتی دارند، نابجایی ها در عبور به دانه B مجبورند تغییر مسیر دهند. با افزایش زاویه عدم تطابق دو دانه این کار مشکلتر می شود.

۲- آشفتگی اتمی در مرزدانه منجر به ناپیوستگی صفحات لغزش از یک دانه به دانه دیگر می شود.

- براساس رابطه Hall-Petch با کاهش اندازه دانه، استحکام تسلیم ماده افزایش می یابد:

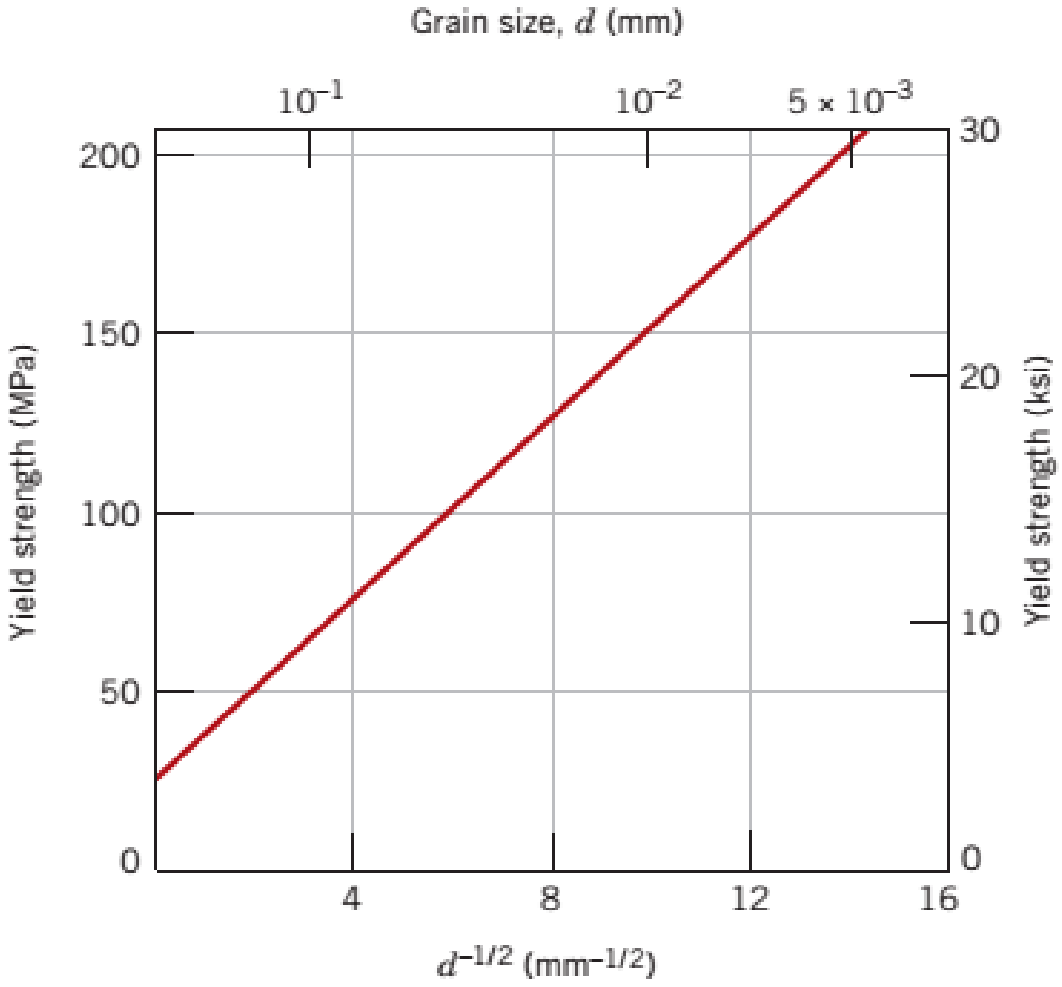
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$

d: قطر متوسط دانه

σ_0 و k_y: ثوابت ماده هستند که بستگی به جنس دارند.

نکته مهم: رابطه فوق برای دانه های خیلی درشت و دانه های خیلی ریز صادق نیست.

تاثیر اندازه دانه روی استحکام تسلیم برنج

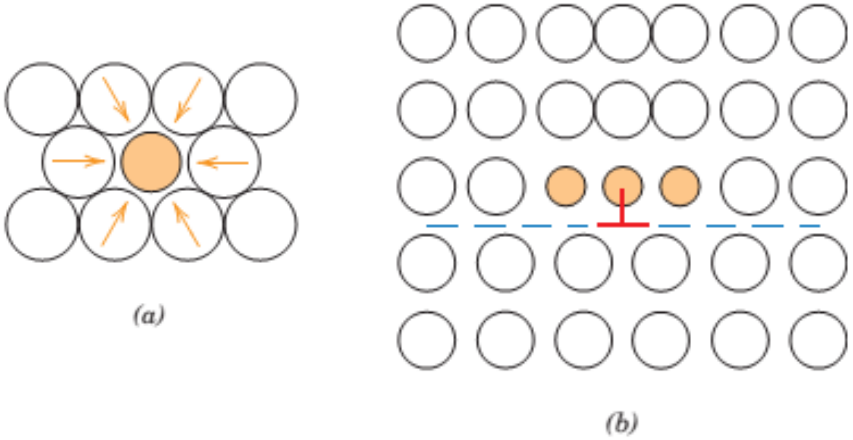


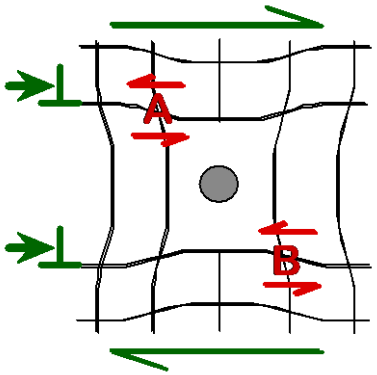
استحکام دهی محلول جامد

- در این روش که به آلیاژسازی معروف است اتمهایی از جنس دیگری به ماده اضافه می شود که اتمهای ناخالص نام دارند.
- افزایش غلظت اتمهای ناخالص باعث افزایش استحکام ماده می شود.
- علت آن این است که اتمهای ناخالص که وارد ساختار شبکه شده اند به اتمهای مجاور خود کرنش اعمال می کنند. کرنش شبکه باعث برهمکنش بین نابجایی ها و اتم ناخالص شده و از حرکت نابجایی ها ممانعت می کند.

اعمال کرنش فشاری به اتمهای مجاور توسط اتم ناخالص

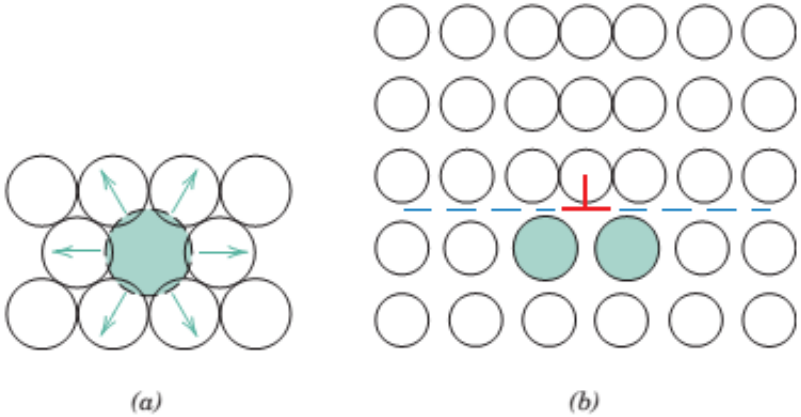
۱. اتم ناخالص کوچکتر باشد:

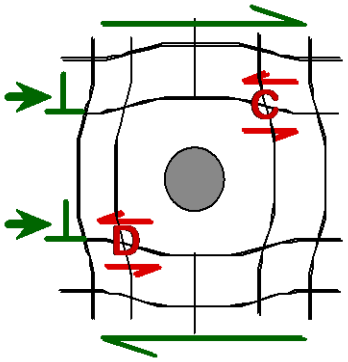




اتم ناخالص باعث تولید تنش های برشی در نقاط A و B می شود که مخالف حرکت نابجایی به سمت راست است.

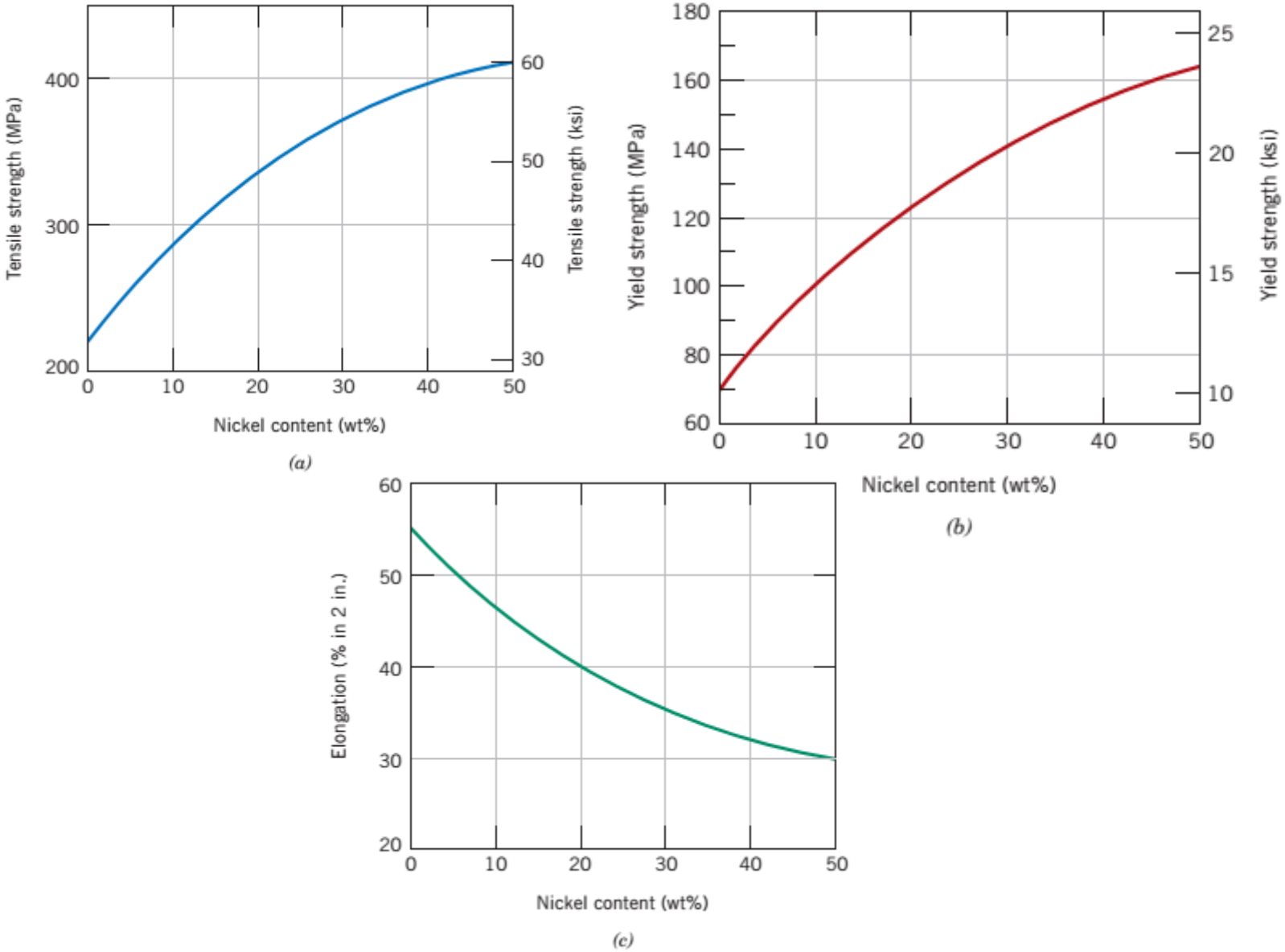
۲. اتم ناخالص بزرگتر باشد:





اتم ناخالص باعث تولید تنش های برشی در نقاط C و D می شود که مخالف حرکت نابجایی به سمت راست است.

در شکل زیر تغییرات درصد نیکل در مس باعث تغییر در استحکام کششی، تسلیم و چکش خواری آن شده است.



کار سختی (کرنش سختی) و کارسرد

- کرنش سختی (strain hardening) پدیده ای است که بوسیله آن یک فلز چکش خوار هنگام تغییرشکل پلاستیک سخت تر و محکم تر می شود. به آن کارسختی (work hardening)نیز می گویند.
- افزایش استحکام به خاطر افزایش چگالی نابجایی ها و در نتیجه مشکل شدن حرکت آنها به خاطر برخورد با یکدیگر است.
- چون این کار در دمای پایین (زیر دمای تبلور مجدد) رخ می دهد به آن کار سرد نیز می گویند. درصد کار سرد از رابطه زیر بدست می آید:

$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

A_0 سطح مقطع قبل از تغییرشکل

A_d سطح مقطع بعد از تغییرشکل

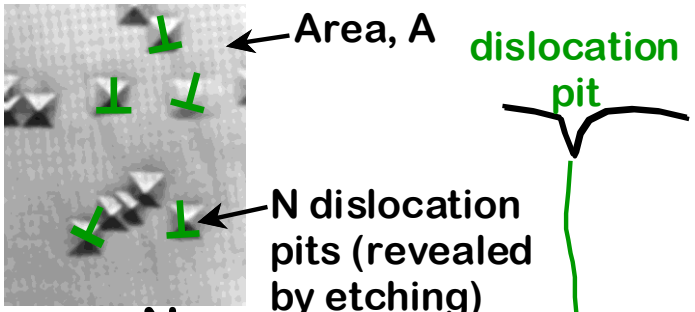
نتایج کار سختی

- چگالی نابجایی (ρ_d) افزایش می یابد تا...

نمونه هایی که با دقت تهیه شده باشند: $\rho_d \sim 10^3$ mm/mm^3

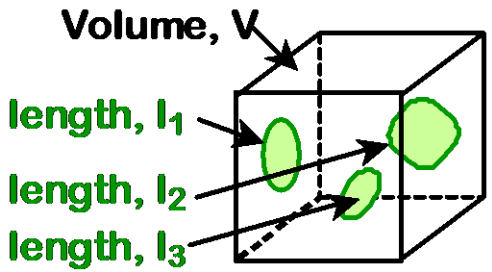
نمونه هایی که تحت تغییرشکل سنگین تهیه شده اند: $\rho_d \sim 10^{10}$ mm/mm^3

- راههای اندازه گیری چگالی نابجایی:



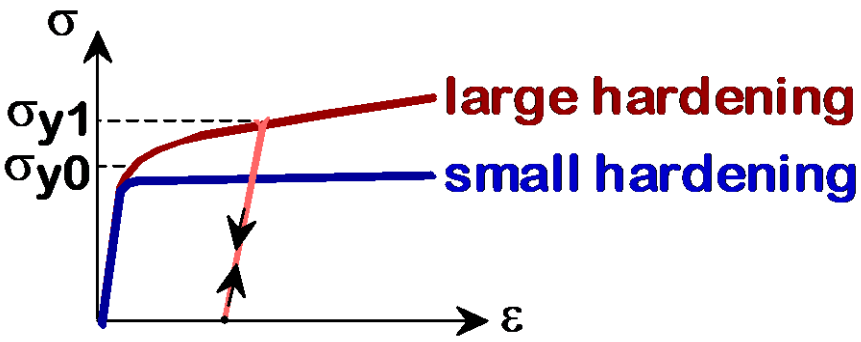
$$\rho_d = \frac{N}{A}$$

یا



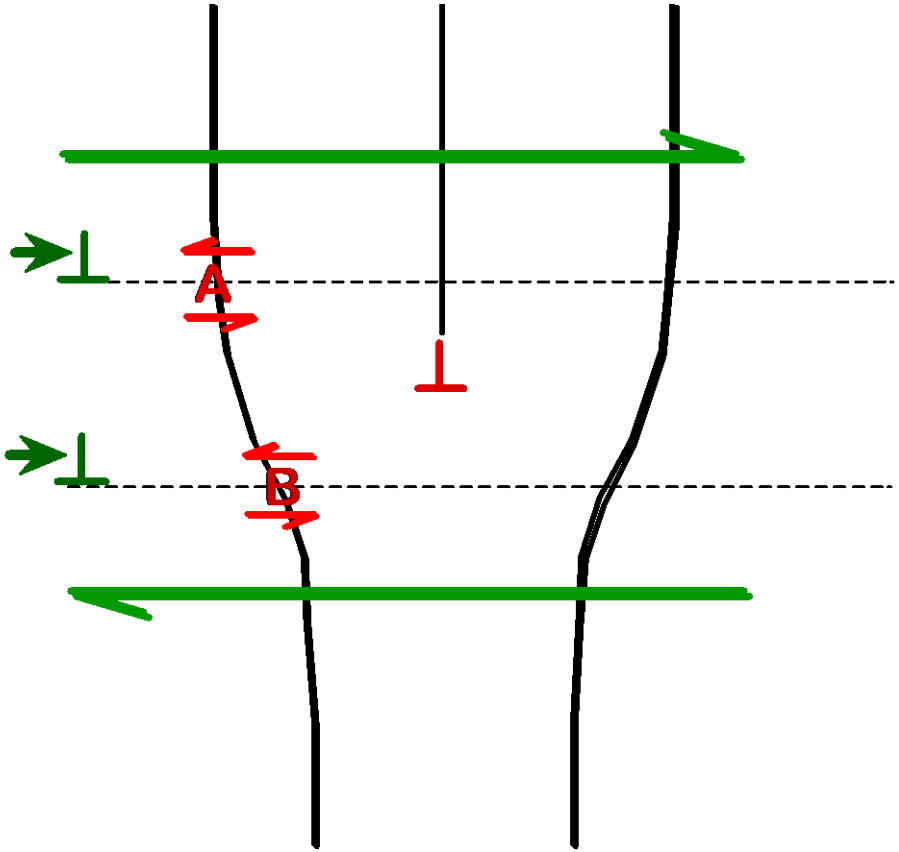
$$\rho_d = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{V}$$

- تنش تسلیم با افزایش ρ_d افزایش می یابد:



گیرافتادن نابجایی

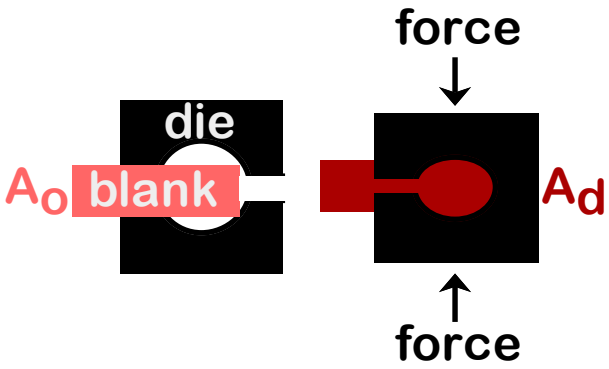
- نابجایی تولید تنش می کند.
- این باعث گیر انداختن نابجایی می شود.



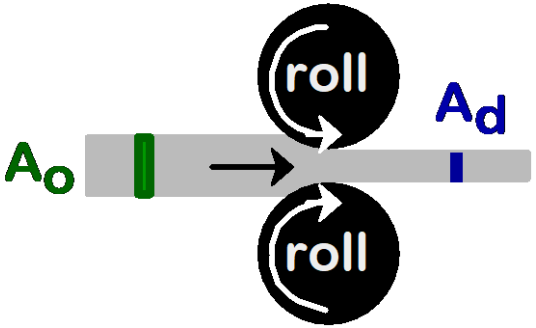
نابجایی قرمز رنگ باعث ایجاد تنش های برشی در نقاط C و D می شود که مخالف حرکت نابجایی سبز نگ از سمت چپ راست است.

ایجاد کارسختی توسط عملیات شکل دهی

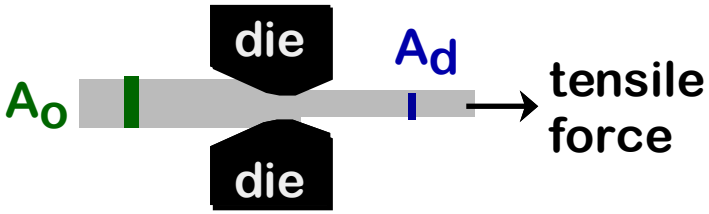
- آهنگری



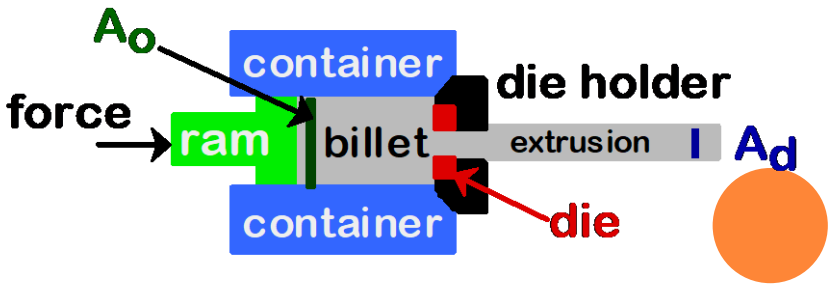
- نورد



- کشش

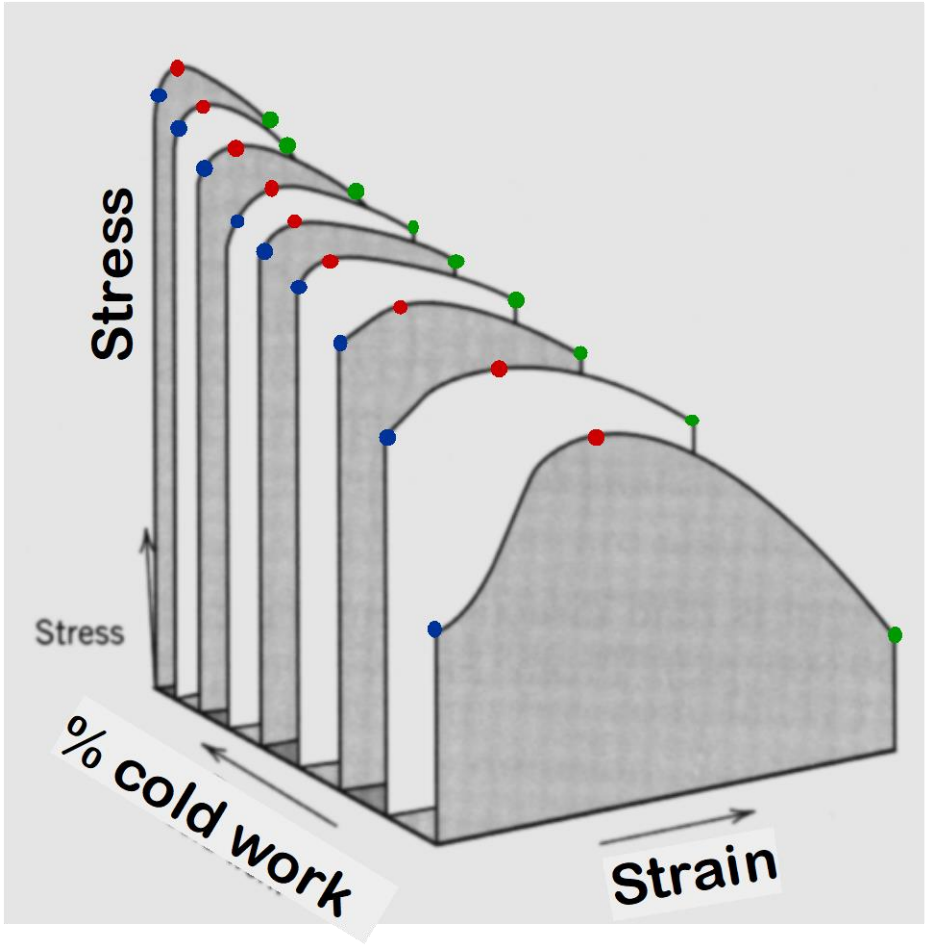


- اکستروژن

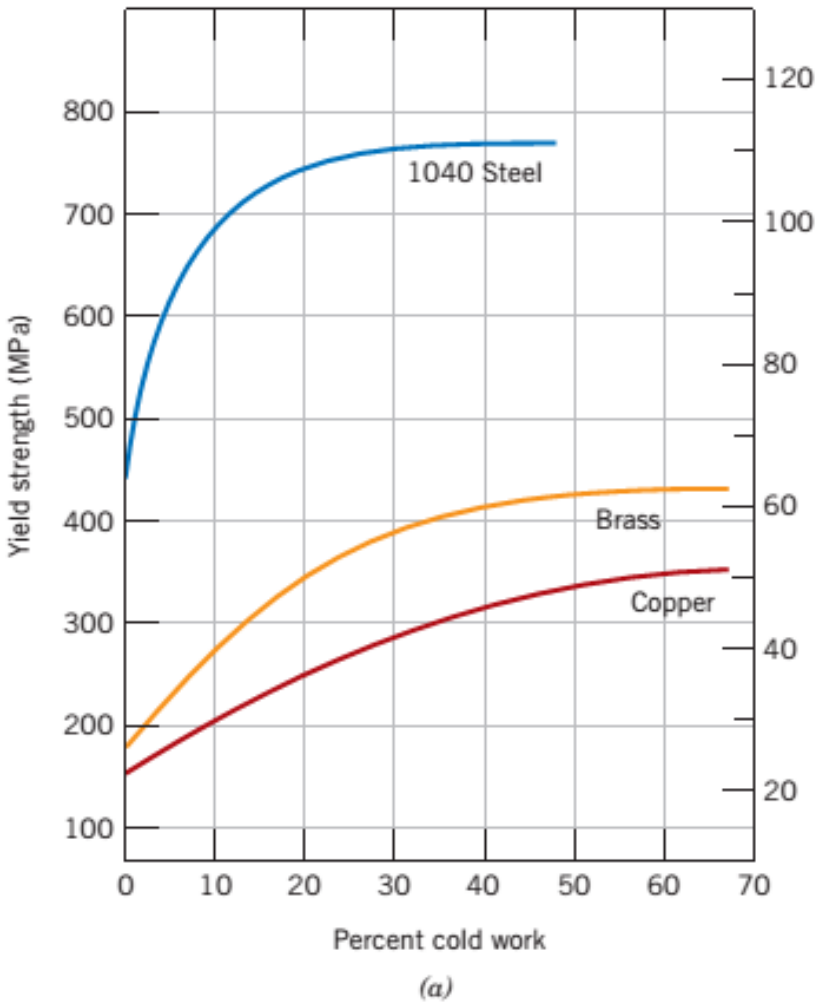


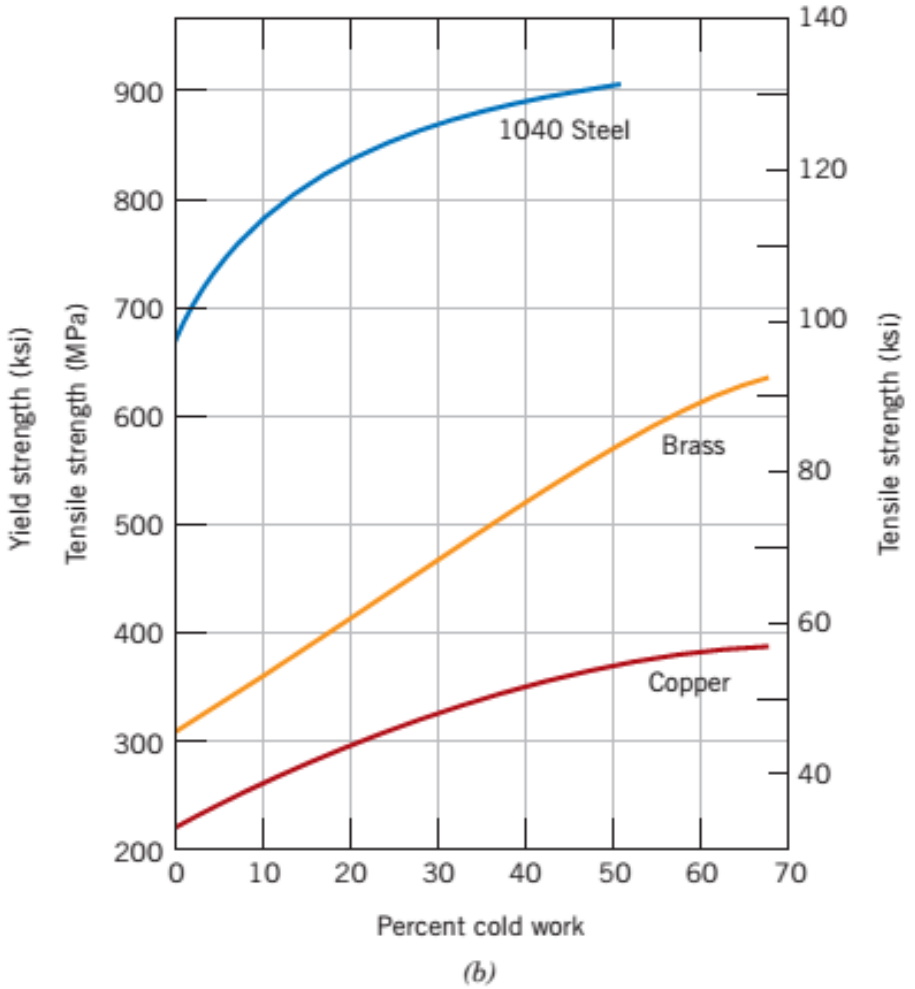
تاثیر کرنش سختی بر استحکام و انعطاف پذیری

- استحکام تسلیم افزایش می یابد.
- استحکام کششی افزایش می یابد.
- انعطاف پذیری کاهش می یابد.

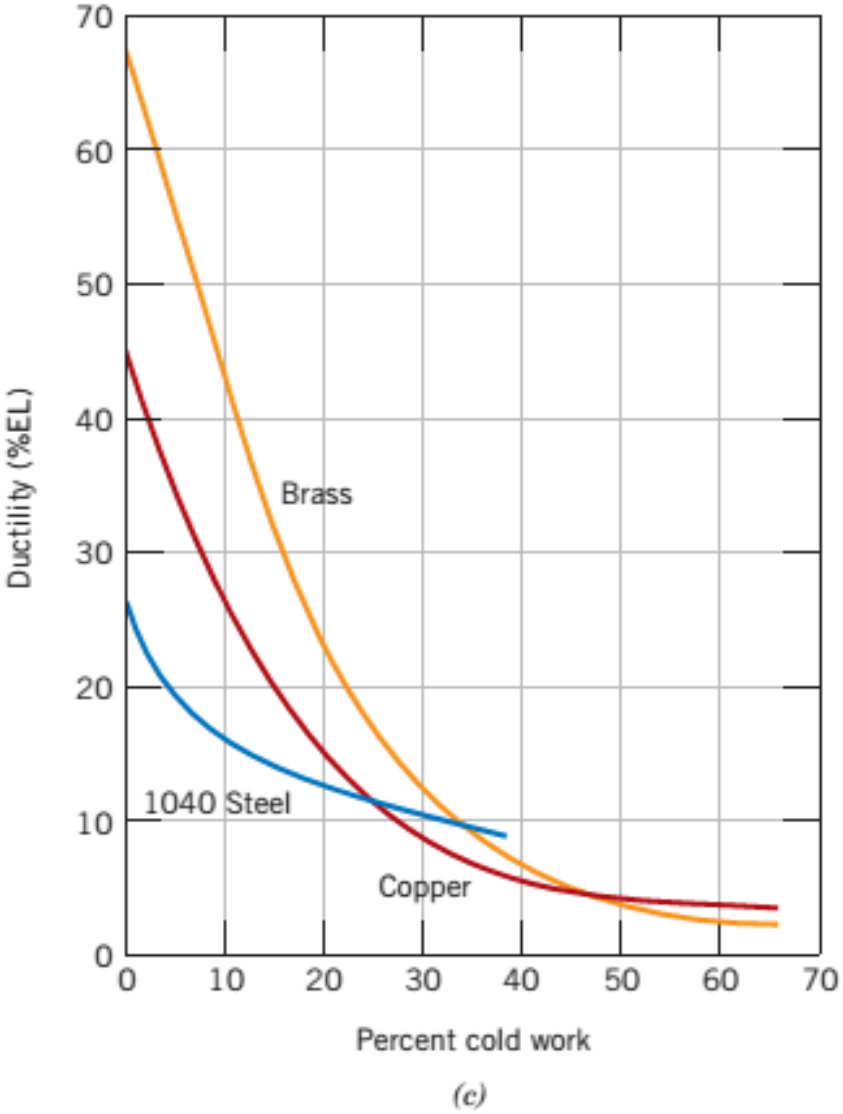


تاثیر کار سختی (کار سرد) روی استحکام تسلیم و کششی برنز، مس و فولاد





تاثیر کارسختی سختی (کار سرد) روی چکش خواری برنز، مس و فولاد

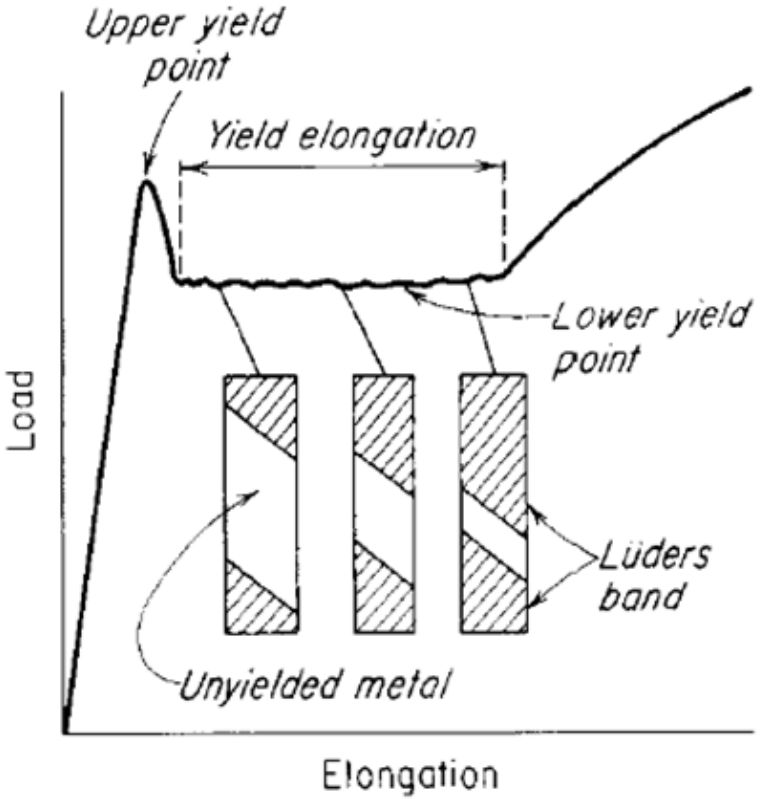


مثال) میزان کارسرد انجام شده روی میله استوانه ای مسی که از قطر 15.2 mm به 12.2 میلیمتر تغییر طول داده است چقدر است.

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

پدیده نقطه تسلیم

- پدیده ایست که در آزمون کشش برخی آلیاژها ایجاد می شود، که در آن منحنی تنش-کرنش به صورت موضعی از ناحیه تغییرشکل الاستیک وارد منطقه تغییرشکل پلاستیک می شود. در نمونه تحت آزمایش باندهایی دیده می شود که به آنها باندهای لودرز گویند. با افزایش تنش و گذرا از منطقه تغییرشکل ناهمگن این باندها ناپدید می شوند.



موادی که پدیده نقطه تسلیم دارند:

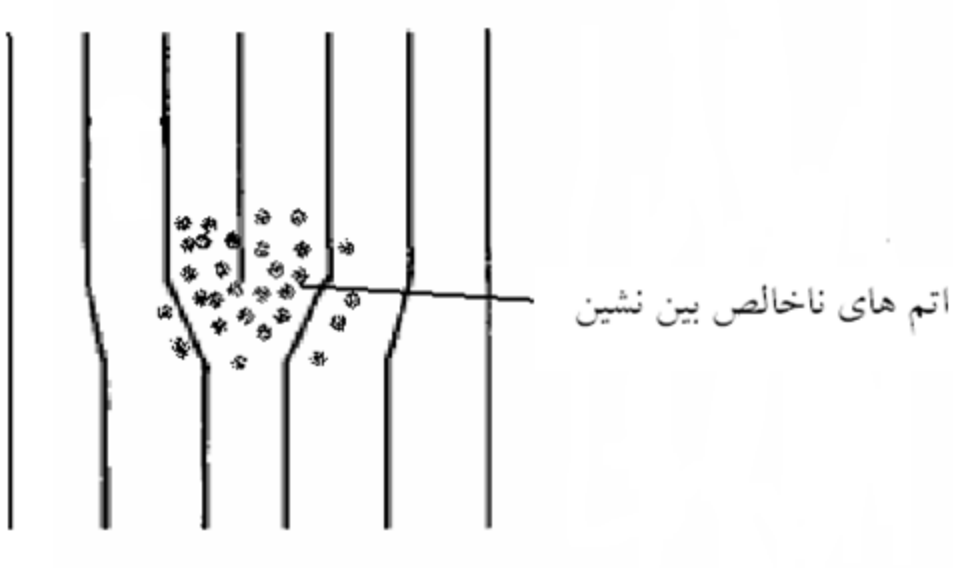
1. در فلزات با شبکه BCC
2. در فلزاتی که دارای اتمهای کوچک بین نشین مانند کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن هستند.
3. در فلزات با شبکه FCCکه دارای اتمهای بین نشین هستند.
4. در بلورهای خالص نیز این پدیده مشاهده شده است.

علل ایجاد پدیده نقطه تسلیم

1. وجود اتمهای بین نشین در ریشه نابجایی ها
2. تفاوت در سرعت و چگالی نابجایی ها در حین تغییرشکل پلاستیک در بلورهای خالص

وجود اتمهای بین نشین در ریشه نابجایی ها

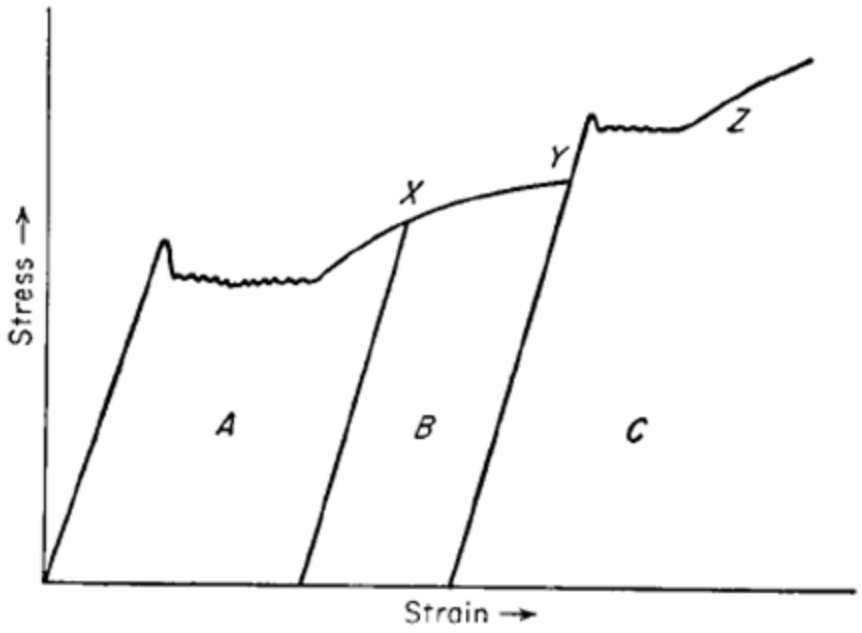
- در ابتدای تسلیم نابجایی ها در اثر تغییرشکل پلاستیک حرکت می کنند تا اینکه با خود نابجایی ها، اتمهای محلول و ذرات فاز ثانویه برخورد می کنند. در این حالت اتمهای با ابعاد کوچک مثل هیدروژن و نیتروژن در ریشه نابجایی نفوذ کرده و مانع حرکت آن می شود تا اینکه با افزایش نیرو نابجایی از قید آنها رها می شود. دندانه دار شدن منحنی ناشی از گیرافتادن و رهاشدن نابجایی از اتمهای بین نشین است.



تفاوت در سرعت و چگالی نابجایی ها در حین تغییرشکل پلاستیک در بلورهای خالص

- در ابتدای تغییرشکل پلاستیک چگالی نابجایی ها و در نتیجه سرعت حرکت آنها پایین است و درنتیجه برای ایجاد تغییرشکل پلاستیک به نیروی بیشتری نیاز است. با افزایش تنش چگالی نابجایی ها و سرعت آنها افزایش یافته و درنتیجه تنش افت می کند. در نهایت با افزایش بیشتر چگالی نابجایی ها کارسختی رخ داده و درنتیجه تنش افزایش می یابد.

پدیده پیرسازی کرنشی (STRAIN AGING) در فولاد کم کربن



ناحیه A: در مرحله اول با توجه به اتمهای بین نشین کربن و نیتروژن پدیده نقطه تسلیم مشاهده می شود.

ناحیهB: با حذف بار از نقطه x و بلافاصله بارگذاری مجدد دیگر پدیده تسلیم مشاهده نمی شود زیرا نابجایی از قید اتمهای بین نشین رها شده است.

ناحیه C: با باربرداری از نقطه Y و سپس بارگذاری مجدد در زمانهای بعدی مجددا پدیده نقطه تسلیم با تنش تسلیم بالاتر ایجاد می شود زیرا پدیده پیرسازی و نفوذ اتمهای بین نشین صورت گرفته است.

- در اثر پدیده پیرسازی کرنشی تنش تسلیم افزایش می یابد و انعطاف پذیری کاهش می یابد و ماده به نرخ کرنش حساس می شود و در سطح ورق های تحت کشش عمیق تحت تنش تغییرشکل های ناهمگن ایجاد می شود.

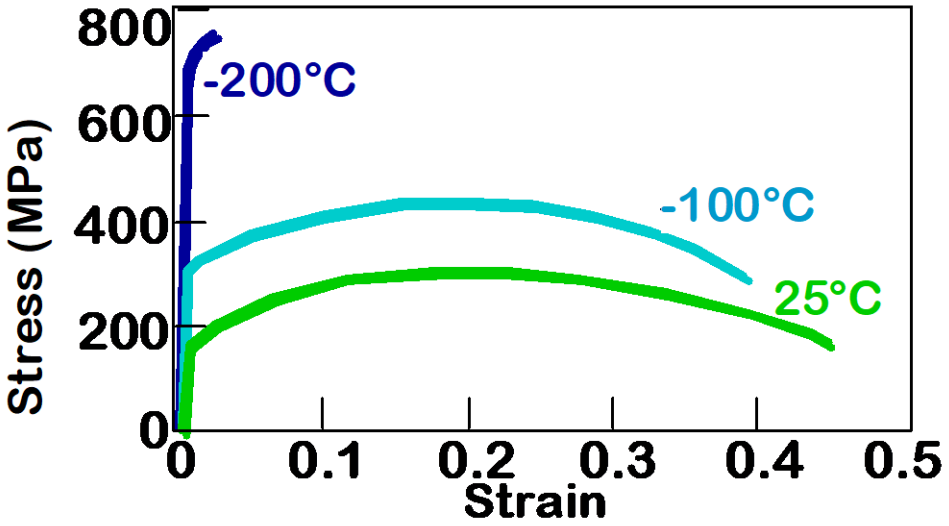
راههای مقابله با معایب پدیده پیرسازی کرنشی

1. کاهش درصد کربن و نیتروژن در فولاد
2. اعمال کرنش تا نقطه تسلیم بعد از ایجادشدن پدیده نقطه تسلیم (مثلا نورد ورق) و سپس انجام عملیات کشش عمیق بدون وقفه تا اینکه از نفوذ مجدد اتمهای بین نشین به ریشه نابجایی ها جلوگیری شود.

بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه

- همانطور که قبلا گفته شد با انجام تغییرشکل پلاستیک ساختار ماده دچار تغییر و تحولات شده و مقداری انرژی در ماده ذخیره می شود.
- توسط راهکارهایی مانند بازیابی و تبلور مجدد می توان بخشی و یا کل ساختار و خواص ماده قبل از تغییرشکل را بازیابی کرد.
- بازیابی و تبلور مجدد در دمایی بالاتر از حدود نصف دمای ذوب رخ میدهد.

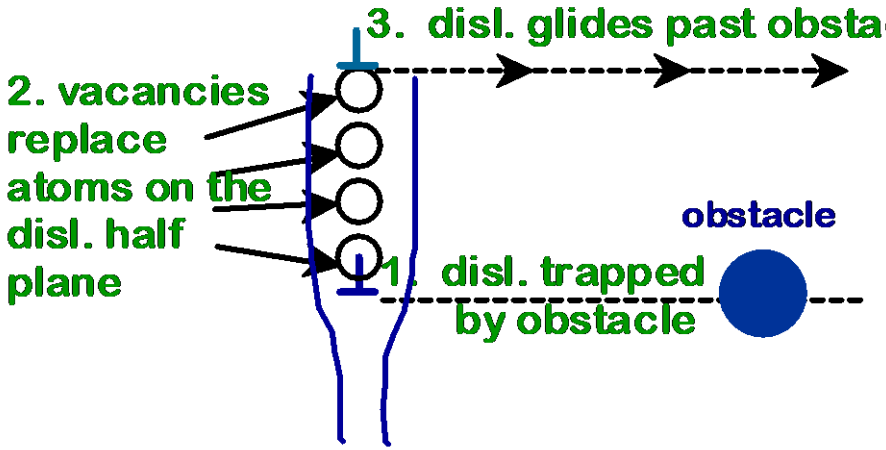
رفتار تنش-کرنش در دماهای مختلف



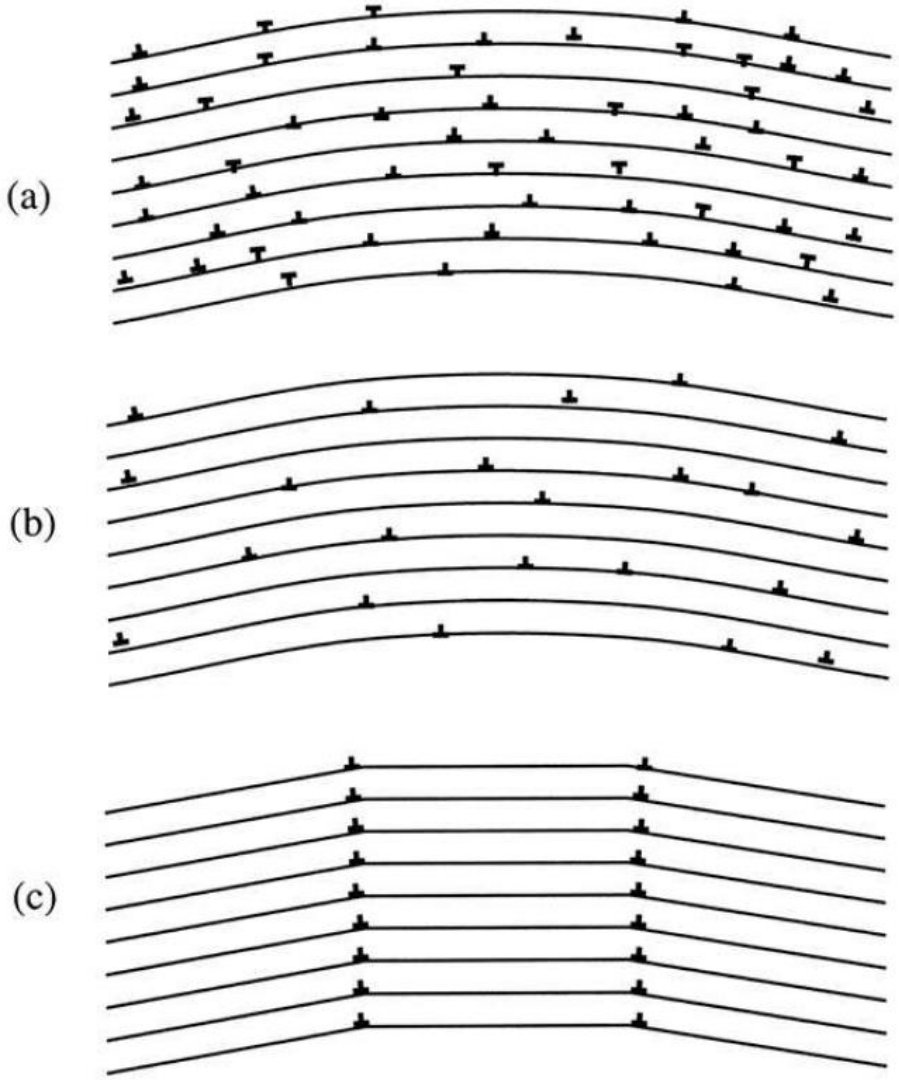
- نتایج برای آهن بسبلور

- با افزایش دما استحکام نهایی و تسلیم کاهش یافته و انعطاف پذیری افزایش می یابد.

- چرا؟ جاهای خالی به عبور نابجایی ها از موانع کمک می کنند.



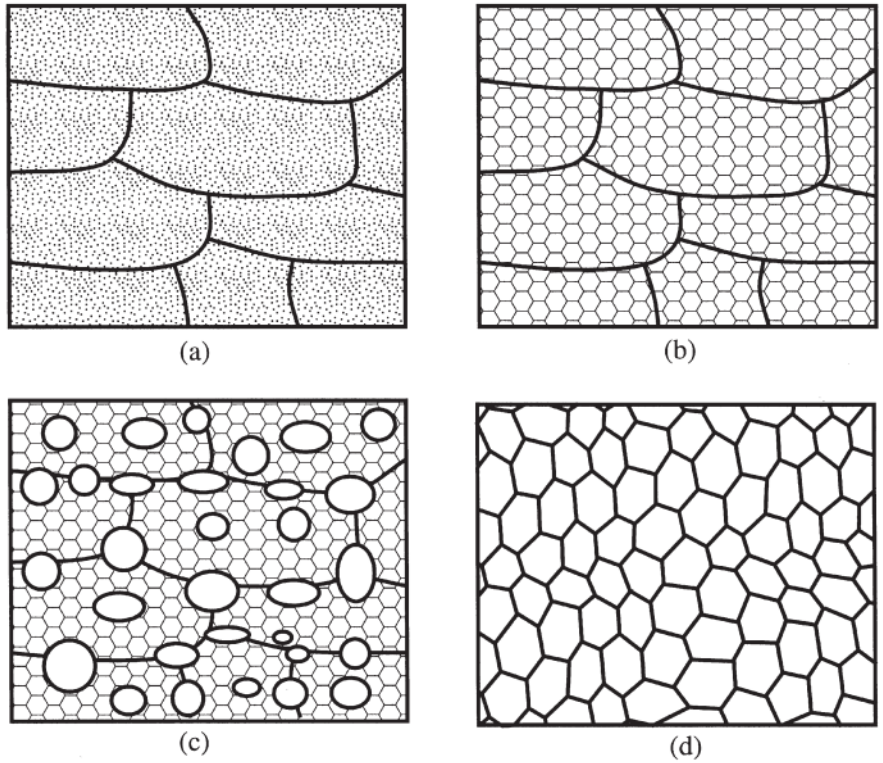
بازیابی (RECOVERY)



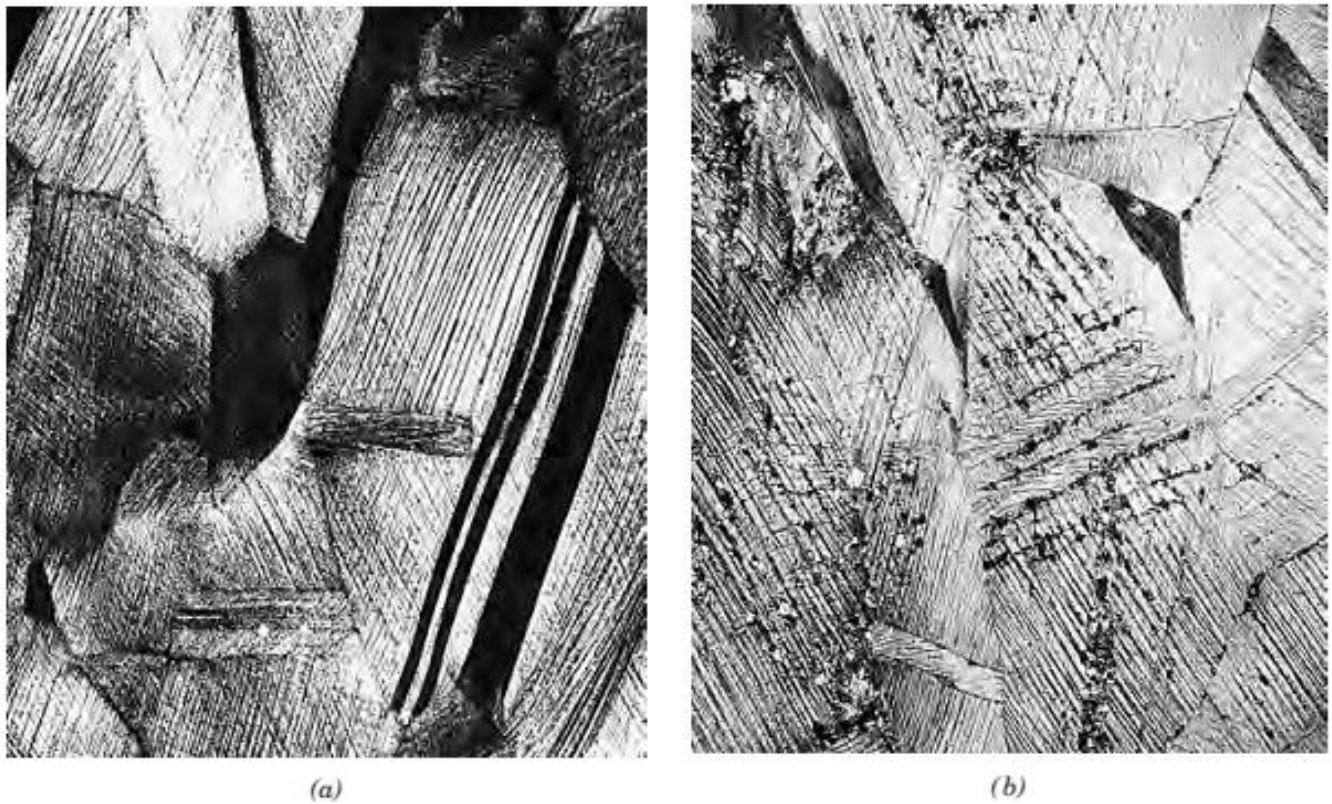
- در بازیابی قسمتی از انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده توسط حرکت نابجایی ها آزاد می شود.
- در مرحله بازیابی چگالی نابجایی ها کاهش می یابد و پیکربندی جدیدی پیدا می کند (ساختار چند ضلعی). در شکل مقابل ساختار چندضلعی نمایش داده شده است.

تبلور مجدد (RECRYSTALLIZATION)

- مرحله تبلور مجدد پس از بازیابی رخ میدهد. در این مرحله کل انرژی کرنشی آزاد شده و ساختاری عاری از ناجایی خواهیم داشت. در این مرحله دانه های جدید بدون کرنش جوانه زده و رشد می کنند.
- در شکل زیر مراحل تبلور مجدد نشان داده شده است a) حالت تغییرشکل یافته b) بازیابی شده c) جوانه زنی دانه های جدید و بدون کرنش d) رشد دانه های جدید

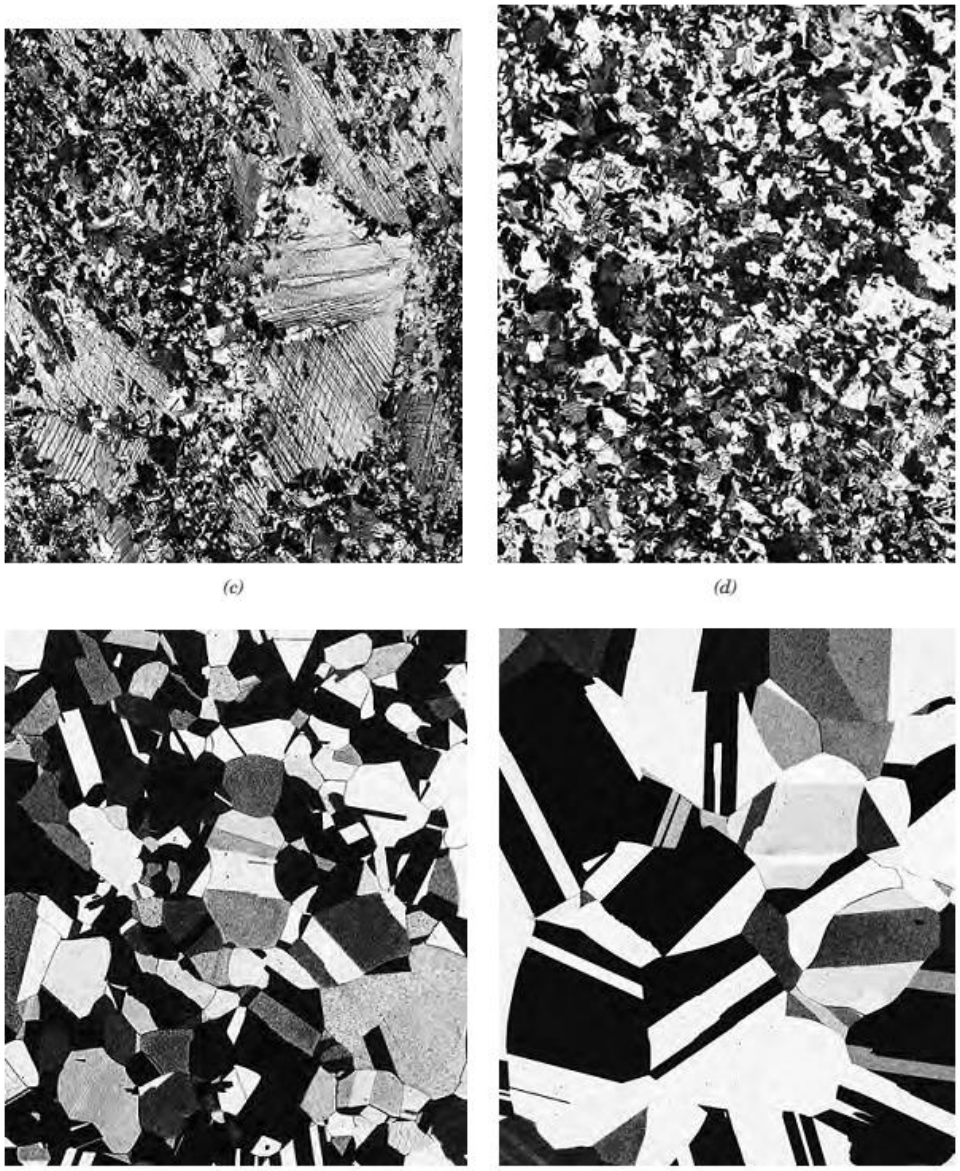


مراحل مختلف تبلور مجدد در آلیاژ برنج



a) ۳۵٪ کار سرد انجام شده b) شروع تبلورمجدد ۳ ثانیه بعد در دمای 580 °C

مراحل مختلف تبلور مجدد در آلیاژ برنج



C) جوانه زنی دانه های جدید (۴ ثانیه بعد در دمای $580\ ^{\circ}C$

d) تبلورمجدد کامل (۸ ثانیه بعد در $580\ ^{\circ}C$)

e) رشد دانه ۱۵ دقیقه بعد در $580\ ^{\circ}C$

f) رشد دانه ۱۰ دقیقه بعد در $700\ ^{\circ}C$

عوامل موثر بر تبلور مجدد

۱- میزان تغییر شکل یا کرنش انجام گرفته اولیه. (مقدار حداقلی برای شروع تبلور مجدد لازم است.)

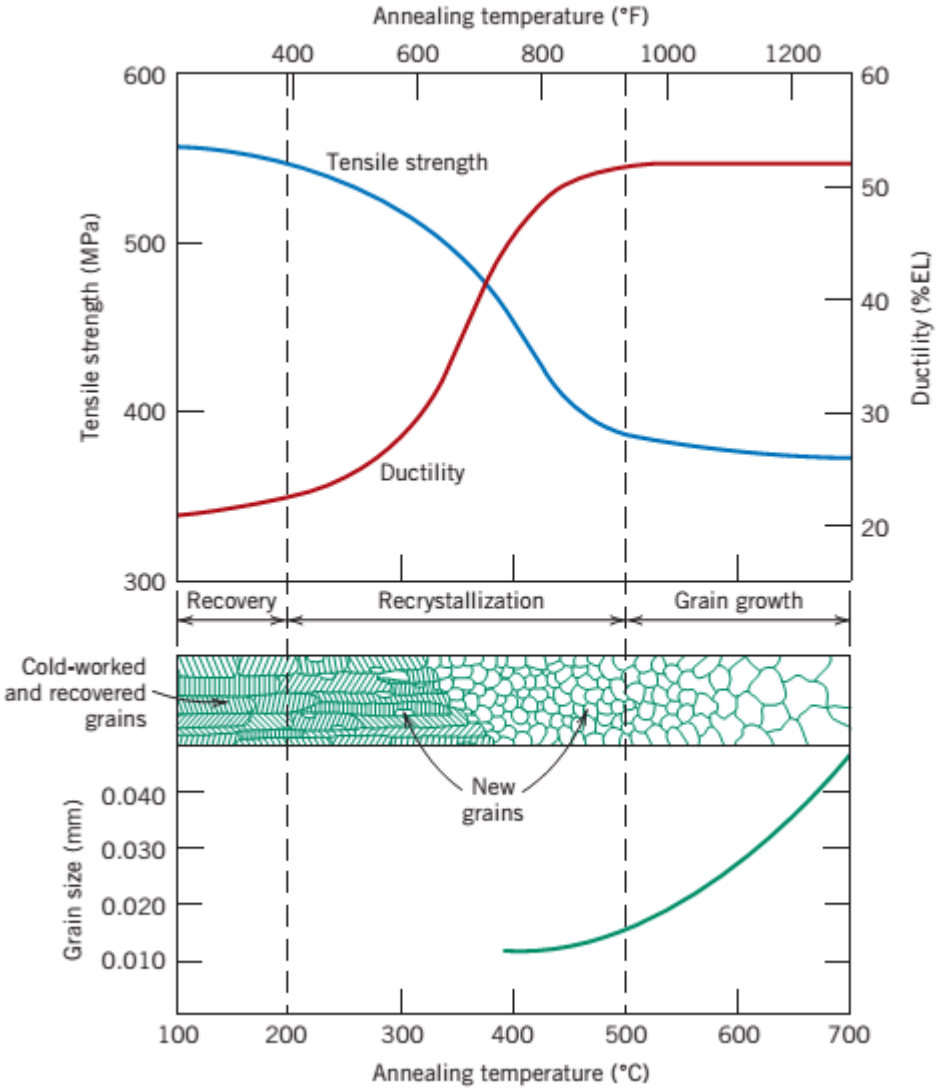
۲- درجه حرارت. (هرچه میزان تغییرشکل بیشتر و هر چه میزان خلوص بیشتر باشد، دمای کمتری لازم است .)

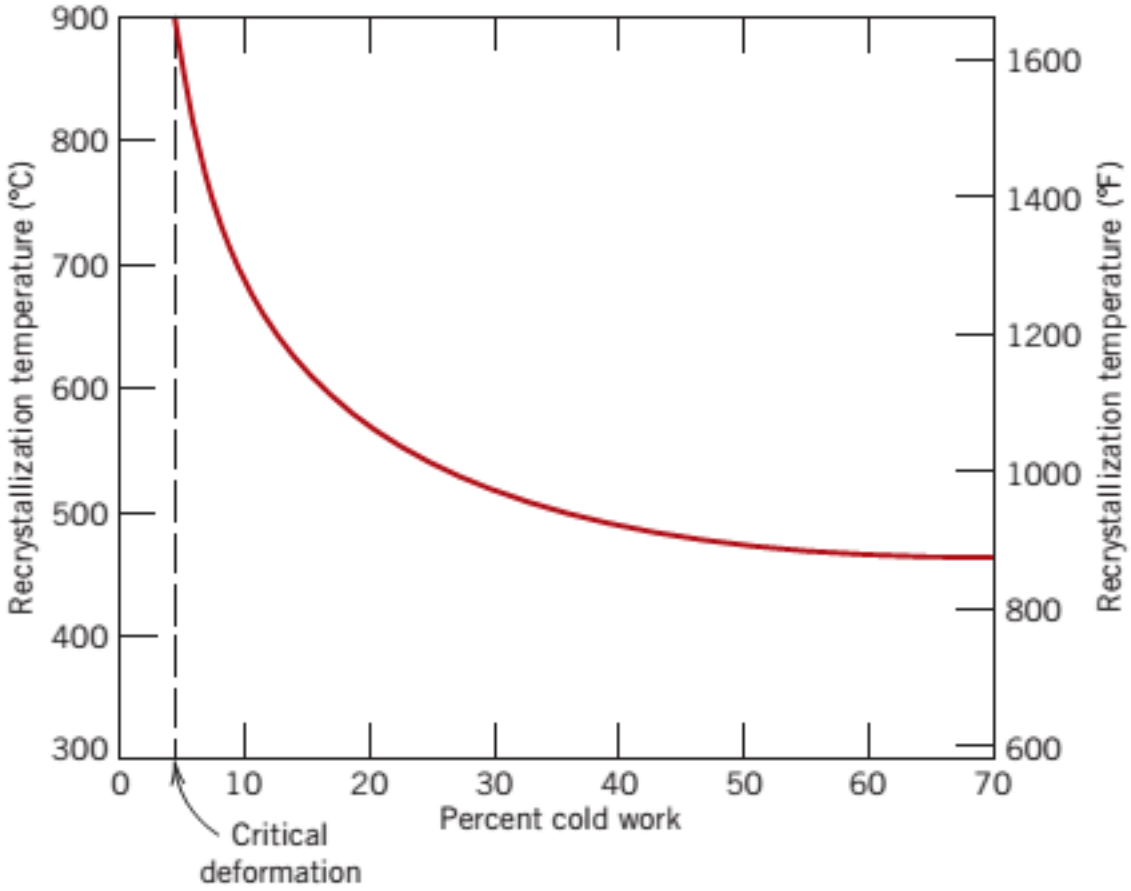
۳- مدت زمان نگهداشتن در دمای تبلور مجدد.(هر چه کار انجام گرفته بیشتر باشد زمان کمتری لازم است.)

۴- اندازه دانه های اولیه. (هر چه میزان دانه اولیه کوچکتر باشد میزان تغییر شکل مورد نیاز برای یک دمای تبلور مجدد معین کوچکتر است.)

۵- میزان بازیابی قبل از شروع تبلور مجدد.

تاثیر دمای آنیلینگ روی استحکام کششی، چکش خواری و اندازه دانه آلیاژ برنج





تغییییر دمای تبلور مجدد با درصد کار سرد برای آهن. بر اساس شکل با افزایش کار سرد دمای تبلور مجدد کاهش می یابد.

دمای تبلور مجدد و ذوب برای فلزات و آلیاژهای مختلف

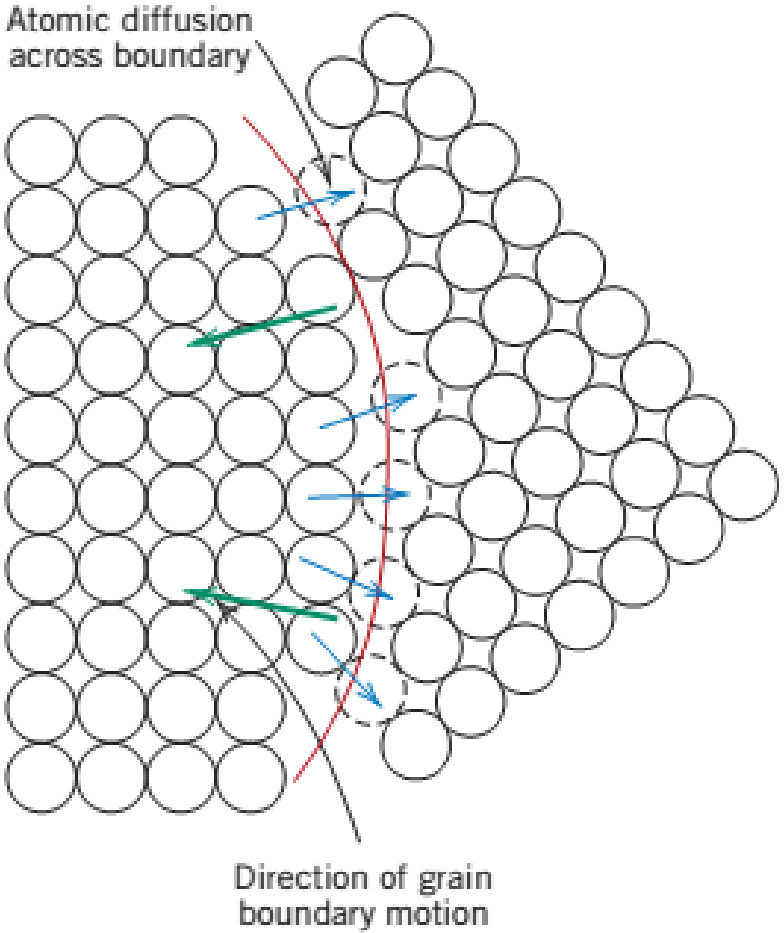
Table 7.2 **Recrystallization and Melting Temperatures for Various Metals and Alloys**

	Recrystallization Temperature		*Melting Temperature*	
Metal	***°C***	***°F***	***°C***	***°F***
Lead	−4	25	327	620
Tin	−4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu–40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

رشد دانه

- بعد از کامل شدن تبلورمجدد، اگر فلز در دمای بالا باقی بماند، دانه های عاری از کرنش به رشد خود ادامه می دهند. به این پدیده رشد دانه گویند.
- با افزایش دانه، انرژی مرزدانه کاهش می یابد. این کاهش انرژی نیرومحرکه رشد دانه است.
- همه دانه رشد پیدا نمی کنند، بلکه دانه های بزرگتر رشد پیدا کرده و در عوض دانه های کوچکتر، کوچکتر می شوند.
- در رشد دانه اتمها از یک دانه به دانه مجاور نفوذ می کنند. جهت حرکت مرزدانه خلاف جهت نفوذ اتمها است.

رشد دانه


Atomic diffusion
across boundary
Direction of grain
boundary motion

- برای بسیاری از فلزات بسبلور، قطر دانه (d) با زمان (t) طبق رابطه زیر تغییر می کند.

$$d^n - d_0^n = Kt$$

d_0 : قطر دانه در زمان t=0

K, n : ثوابت وابسته به زمان

مقدار n بزرگتر و یا مساوی با ۲ است.

نمودار وابستگی اندازه دانه آلیاژ برنج به زمان و دما