دانشگاه صنعتی شاهرود

جلسه چهارم:
نابجایی ها و مکانیزم های استحکان دهی

نابجایی ها و کلاس های مواد

•فلزات: حرکت نابجایی ها سریعتر

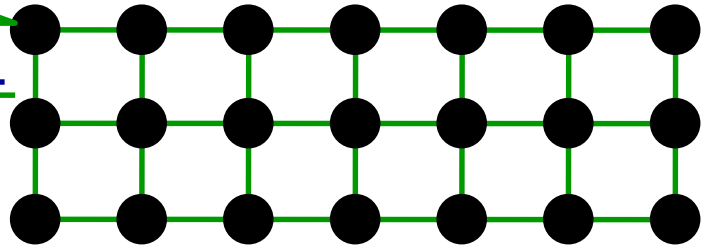
-پیوند غیر جهتی

- جهت های فشرده برای لغزش.

•سرامیک های کووالانسی

• (سیلیسیم و الماس) حرکت سخت نابجایی ها

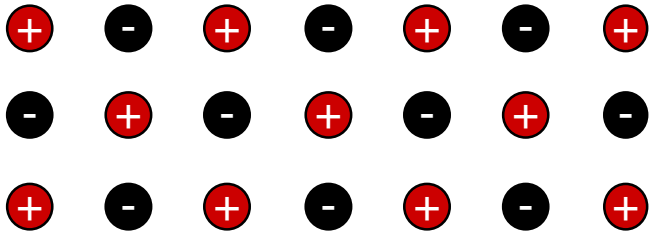
• پیوند جهت دار



سرا میک های یونی:(NaCl)

• حرکت سخت نابجایی ها

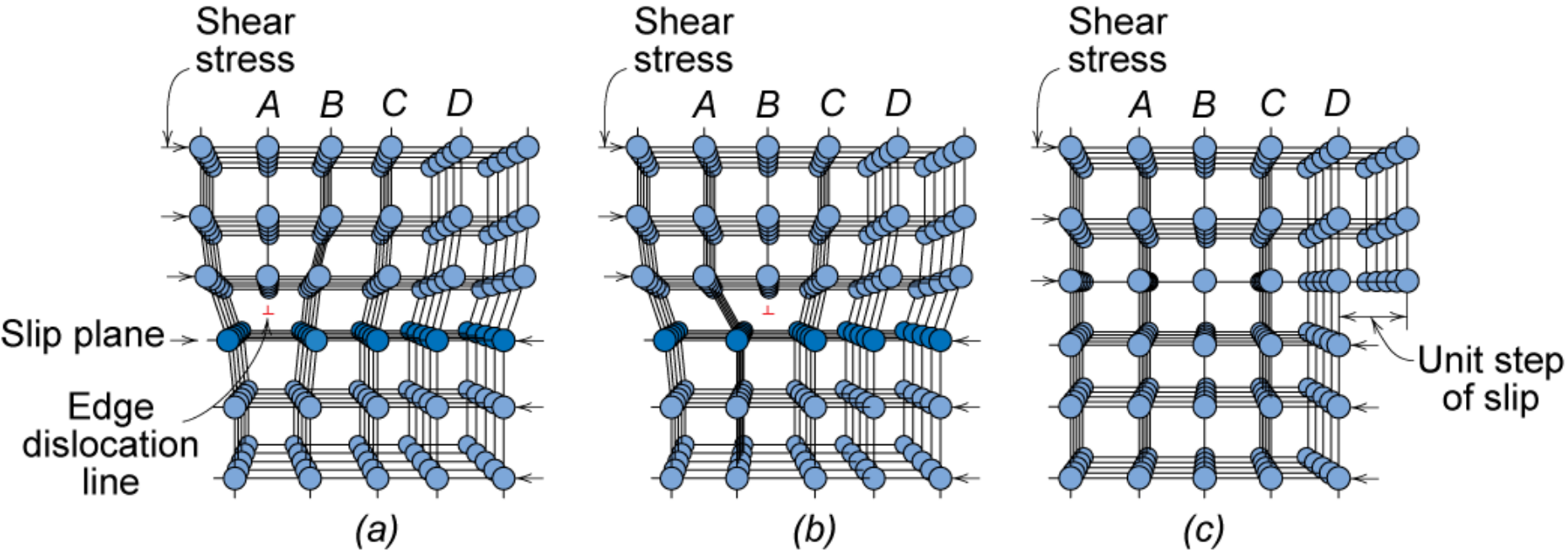
•این نیاز وجود دارد که دو تا یون مثبت و دو تا یون منفی از هم دور شوند.



حرکت نابجایی

نابجایی ها و تغییر شکل پلاستیک

- تغییر شکل پلاستیک به وسیله تغییر شکل لغزش انجام می شود جایی صفحه اتم ها ی اضافی به وسیله حرکت نابجایی ها می لغزد.



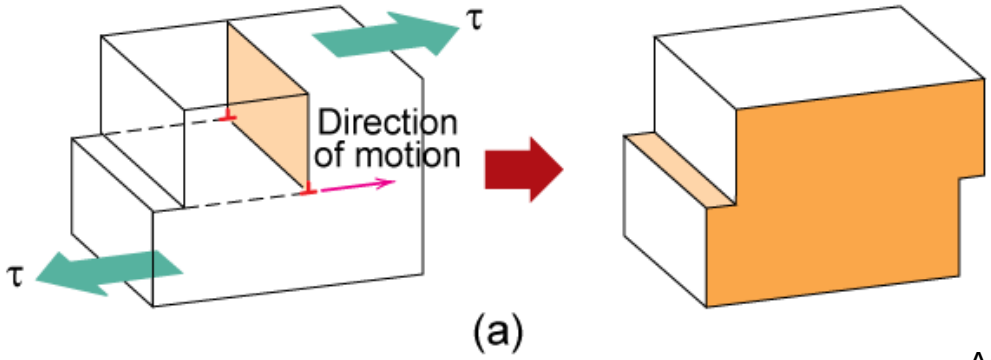
- اگر نابجایی ها حرکت نکند، تغییر شکلی رخ نمی دهد!

Adapted from Fig. 7.1, *Callister 7e.*

حرکت نابجایی

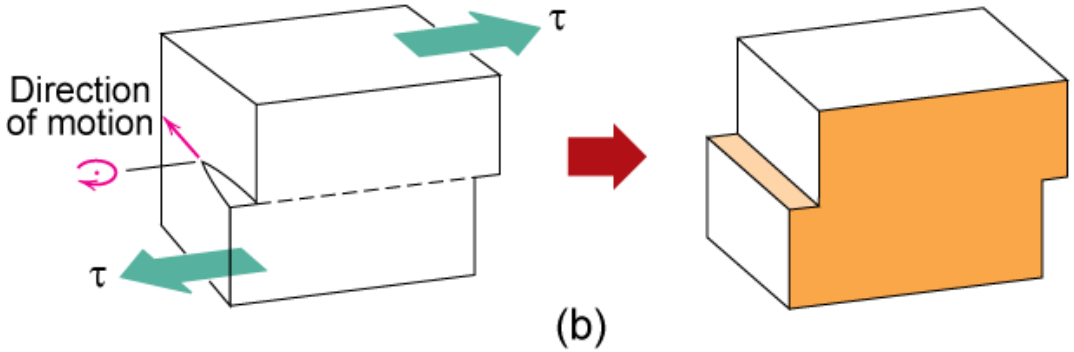
- نابجایی ها لبه ای حرکت می کنند در جهت لغزشی که عمود بر خط نابجایی ها است.
- جهت لغزشی مشابه بردار برگر هست.

نابجایی لبه ای



Adapted from Fig. 7.2, *Callister 7e.*

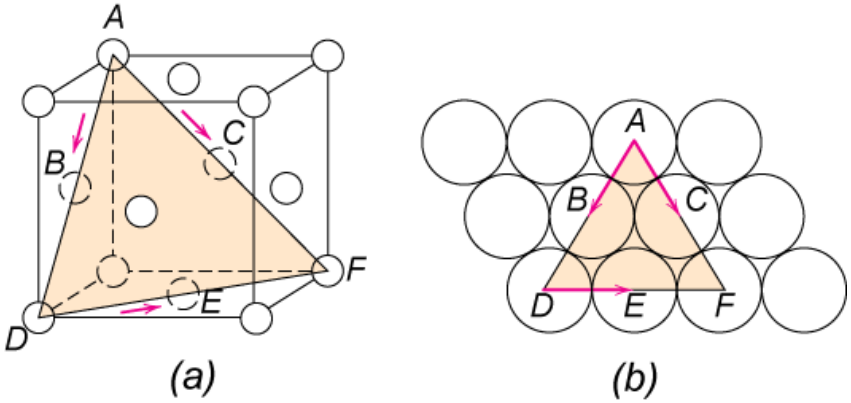
نابجایی پیچشی



مکانیسم های تغییر شکل

سیستم لغزشی

- صفحه لغزش- صفحه ای که راحت ترین قابلیت لغزش دارد
  - فضاهای گسترده بین صفحه ای- بیشترین دانسیته صفحه ای
  - جهت لغزش- جهت حرکت- بیشترین دانسیته خطی



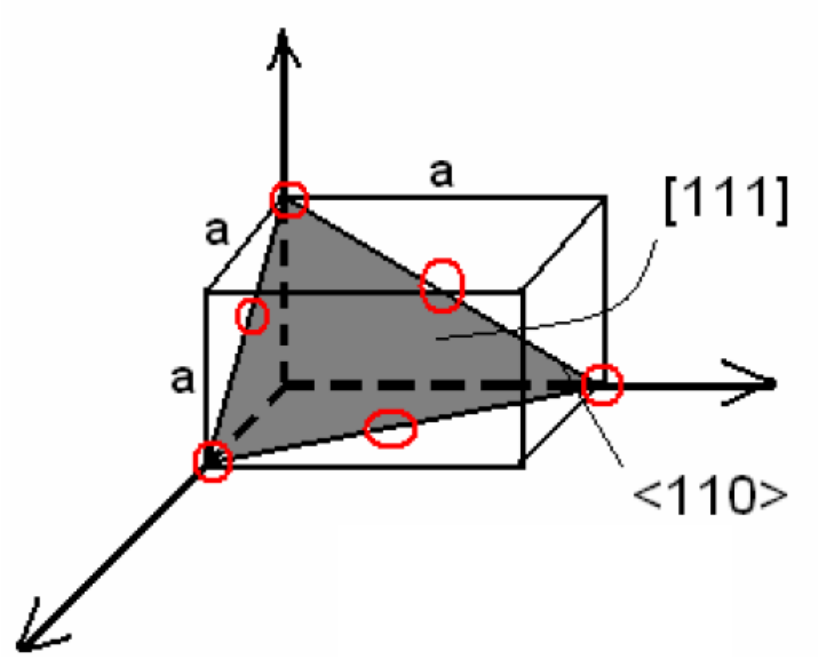
Adapted from Fig. 7.6, *Callister 7e.*

- لغزش FCC در صفحات فشرده {111} در جهات فشرده <110>رخ می دهد که به طور کلی ۱۲ سیستم لغزشی درFCC وجو د دارد
- در BCC و HCP سیستم های لغزشی دیگر رخ می دهد

سیستمهای لغزش برای ساختار های مختلف:

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

فلزات با ساختار FCC و BCC تعداد سیستمهای لغزش بیتری دارند و بنابراین انعطاف پذیری بیشتری نسبت به فلزات با ساختار HCP دارند.



$$\{111\}\langle 110\rangle$$

$$4 \times 3 = 12$$

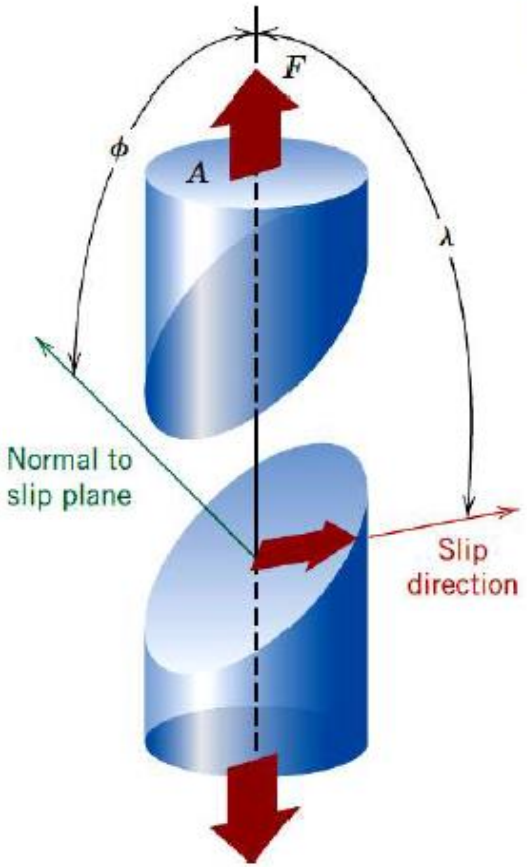
لغزش تک کریستال:

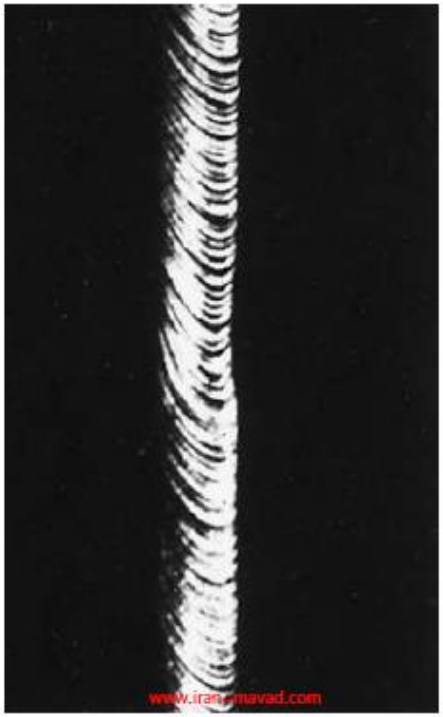
دیدیم تغییر شکل پلاستیک معلول حرکت نابجاییها در اثر اعمال تنش برشی است. حتی در حالت تنش محوری خالص نیز مولفه های تنش برشی حضور دارند.

تک بلور تعداد سیستمهای مختلف لغزش دارد ولی میزان تنش برشی برای هر یک متفاوت است.

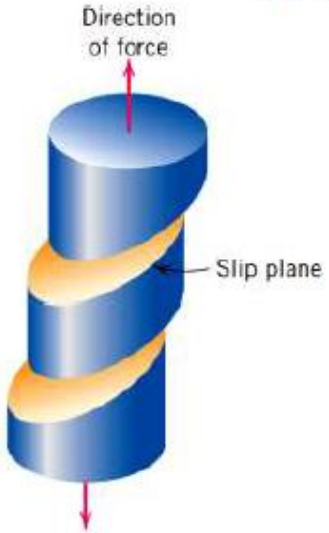
$$\tau_R = \sigma \cos\phi \cos\lambda$$

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





اگر میزان تنش برشی ماکزیمم از تنش برشی بحرانی لغزش برای یک سیستم مشخص بالاتر رود لغزش در آن سیستم روی خواهد داد.



تنش و حرکت نابجایی

کریستال ها درنتیجه یک تنش برشی بحرانی T_R لغزش می کند

کشش اعمالی میتواند چنین تنشی ایجاد کند

تنش اعمالی

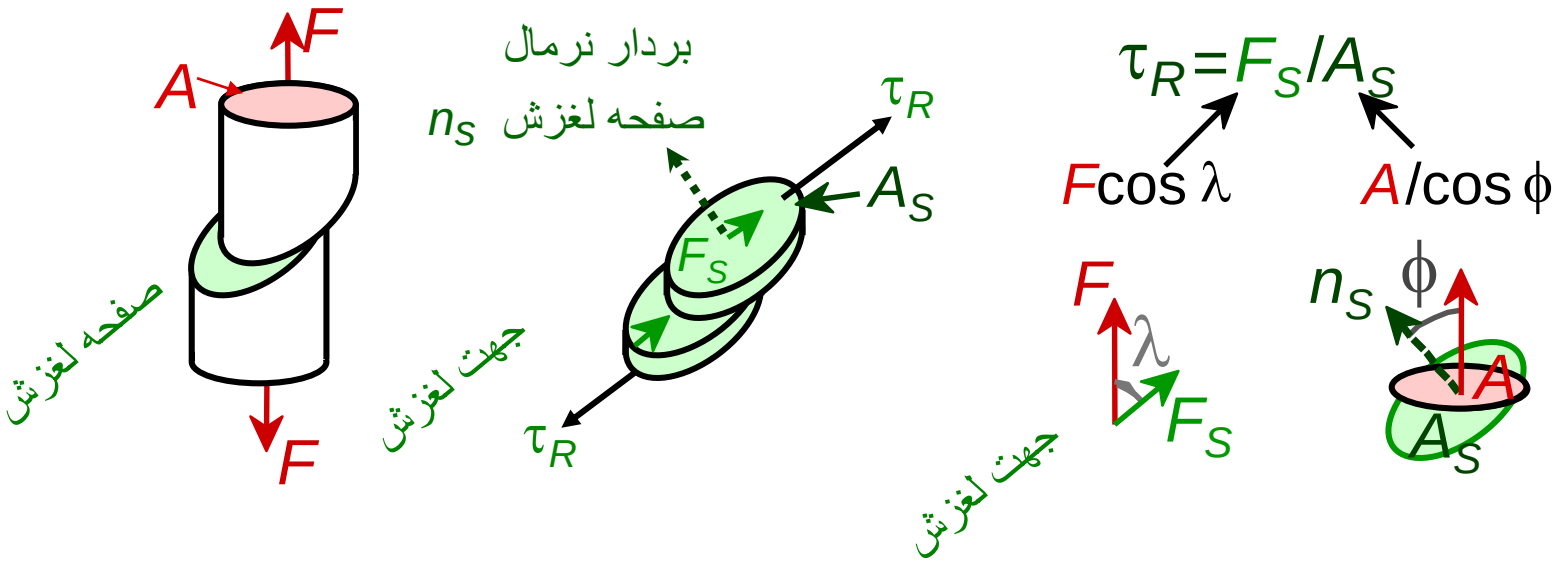
تنش: $\sigma = F/A$

برش بحرانی

stress: $\tau_R = F_S/A_S$

روابط بین

σ و τ_R



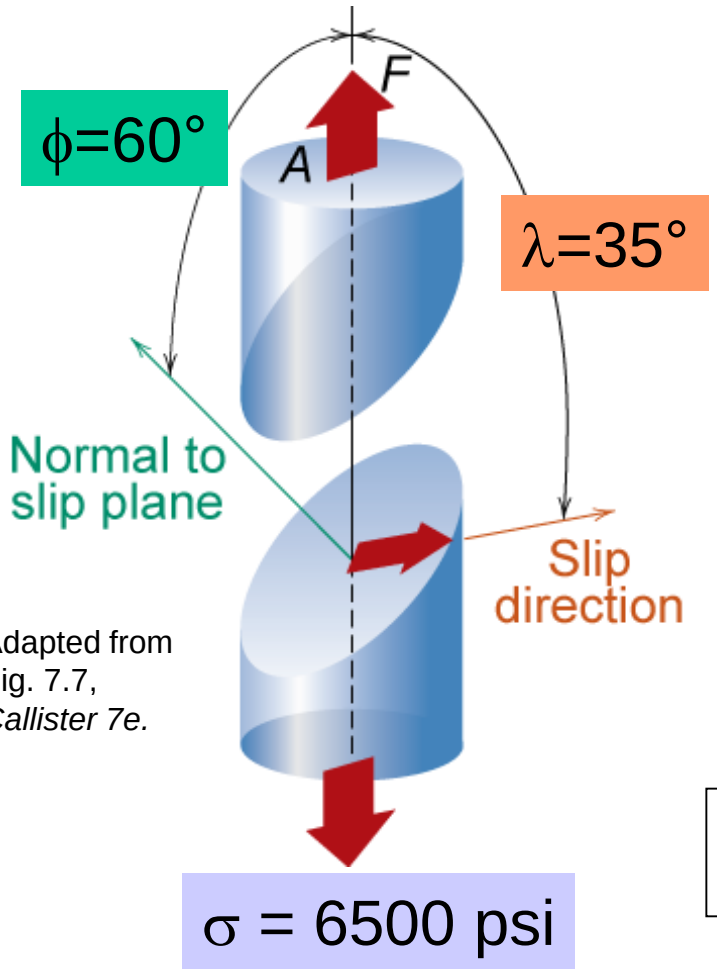
$$\tau_R = \sigma \cos\lambda \cos\phi$$

مثال: تغییر شکل تک کریستال

-آیا تک کریستال ها به تسلیم می رسند؟

-اگر نه ، چه تنشی مورد نیاز هست؟

$\tau_{crss} = 3000$ psi



Adapted from Fig. 7.7, *Callister 7e.*

$$\tau = \sigma \cos\lambda \cos\phi$$

$$\sigma = 6500 \text{ psi}$$

$$\tau = (6500 \text{ psi})(\cos 35^\circ)(\cos 60^\circ)$$

$$= (6500 \text{ psi})(0.41)$$

$$\tau = 2662 \text{ psi} < \tau_{crss} = 3000 \text{ psi}$$

بنابراین تنش اعمالی کمتر از تنش برشی بحرانی هست بنابراین تک کریستال ها به تسلیم نمی رسند

مثال: تغییر شکل تک کریستال ها

چه تنشی لازم هست؟

$$\tau_{crss} = 3000\ \text{psi} = \sigma_y \cos\lambda \cos\phi = \sigma_y (0.41)$$

$$\therefore \sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{\cos\lambda \cos\phi} = \frac{3000\ \text{psi}}{0.41} = \underline{\underline{7325\ \text{psi}}}$$

بنابراین برای اینکه تغییر شکل رخ دهد باید تنش اعمالی بزرگتر یا برابر تنش تسلیم باشد

$$\sigma \geq \sigma_y = 7325\ \text{psi}$$

حرکت لغزشی در پلی کریستال ها

-لغزش در مرز دانه های قویتر قفل می شود.

-صفحات و جهات لغزشی (λ, ϕ) از یک کریستال به دیگری تغییر می کند

- τ_R از یک کریستال به کریستال دیگر تغییر می کند.

- کریستال های با بیشترین τ_R ابتدا تسلیم می شود.

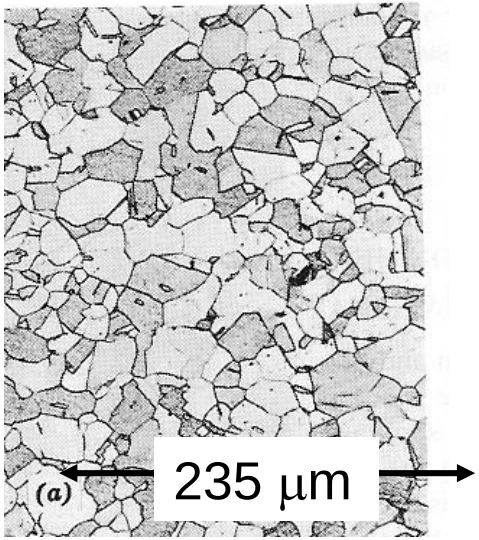
-کریستال های دیگر بعدا تسلیم می شوند.

Adapted from Fig. 7.10, *Callister 7e.* (Fig. 7.10 is courtesy of C. Brady, National Bureau of Standards [now the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD].)

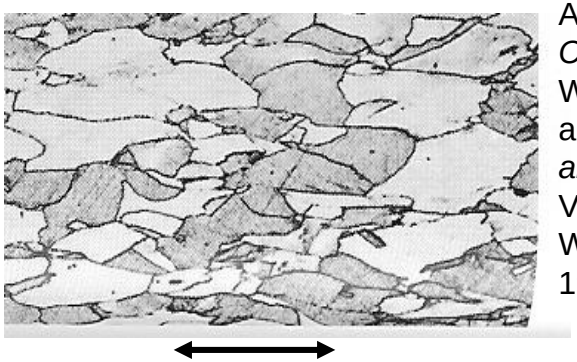
آنیزوتروپی در σ_y

•یک فلز پلی کریستالی به وسیله نورد می تواند ایجادشود

-قبل نورد



- بعد از نورد



جهت نورد

Adapted from Fig. 7.11, *Callister 7e.* (Fig. 7.11 is from W.G. Moffatt, G.W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 140, John Wiley and Sons, New York, 1964.)

-ایزوتروپ

-دانه ها تقریبا به صورت کروی و جهاتشان تصادفی هست

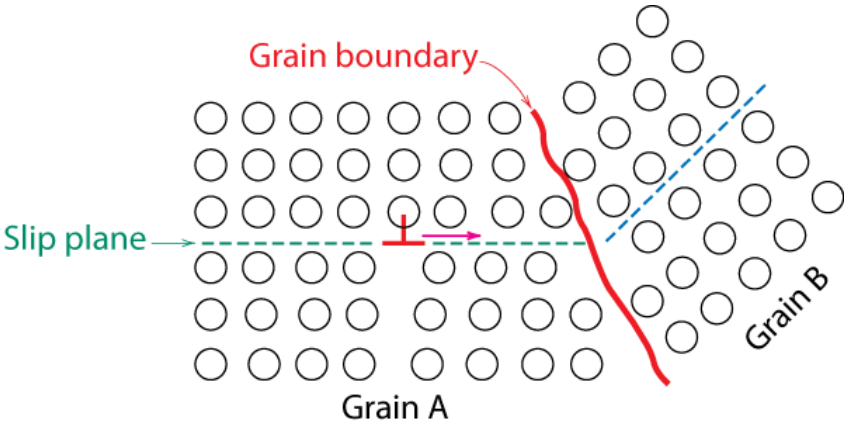
-آنیزوتوپ

نورد روی جهات وشکل دانه اثر می گذارد

۴استراتژی هایی برای استحکام دهی :
۱ـ کاهش اندازه دانه

- مرزهای دانه موانعی برای لغزش هستند
- موانع " استحکام" با افزایش زاویه عدم تطابق ، زیاد می شود.
- اندارزه دانه کوچکتر مانع بیشتری برای لغزش ایجاد می کند.
- معادله Hall-Petch

$$\sigma_{yield} = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$



Adapted from Fig. 7.14, *Callister 7e.*
(Fig. 7.14 is from *A Textbook of Materials Technology*, by Van Vlack, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

هر گاه یک نابجائی بر روی صفحه لغزش خود حرکت کرده و به مرز دانه بر خورد نماید ادامه حرکت آن (به دلیل مواجه شدن با منطقهٔ نامنظم اتمی) مشکل گشته و برای حرکت یک نابجائی دیگر(هم علامت با نابجائی قبلی) به طرف مرز دانه بر روی همان صفحه لغزش، نیاز به تنش بالاتری خواهد بود که این امر سبب وقوع پدیدهٔ کار سختی می گردد.

از آنجائی که انباشتگی نابجائیها در پشت مرز دانه، خود بعنوان مانعی در برابر حرکت سایر نابجائیها محسوب می شود بنابراین در حقیقت چنین مکانهائی (مرز دانه ها) را می توان بعنوان منابع تولید نابجائی در نظر گرفت. در این صورت (اگر منابع دیگری موجود نباشند) حداکثر طول لغزش نابجائی را می توان قطر دانه به شمار آورد. بر این اساس استحکام یک فلز با اندازه دانه های آن ارتباط معکوس خواهد داشت چرا که با کاهش اندازه دانه، از فاصله لغزش نابجائیها کاسته شده و شرایط انباشتگی آنها در پشت مرز دانه مساعدتر می گردد. در حالت کلی چنانچه d اندازه دانه و σ استحکام فلز باشد، می توان نوشت:

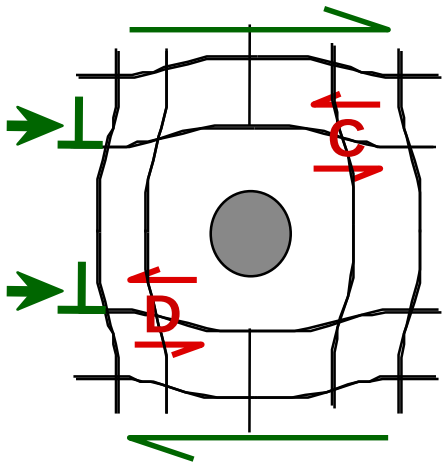
$$\sigma = \sigma_o + k.d^{-1/2}$$

که در آن k مقداری ثابت و σ_o تنش اصطکاکی شبکه است که به نیروی پیوندی بین اتمها بستگی دارد.

۴ استراتژی هایی برای استحکام دهی
۲- محلول جامد

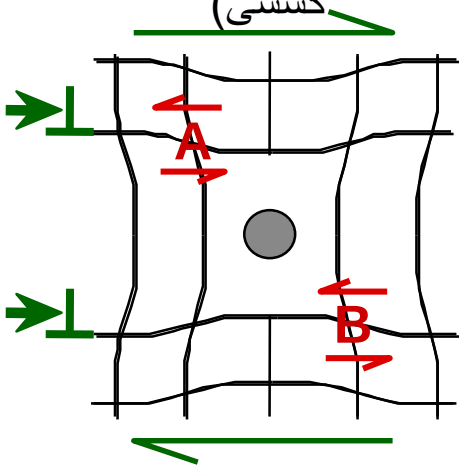
- اتم های ناخالصی در شبکه اعوجاج می کنند و تنش ایجاد می کنند
- تنش ها یک مانعی برای حرکت نابجایی ها ایجاد می کنند.

ناخالصی جانشینی بزرگتراز اتم ماده(تنش فشاری)



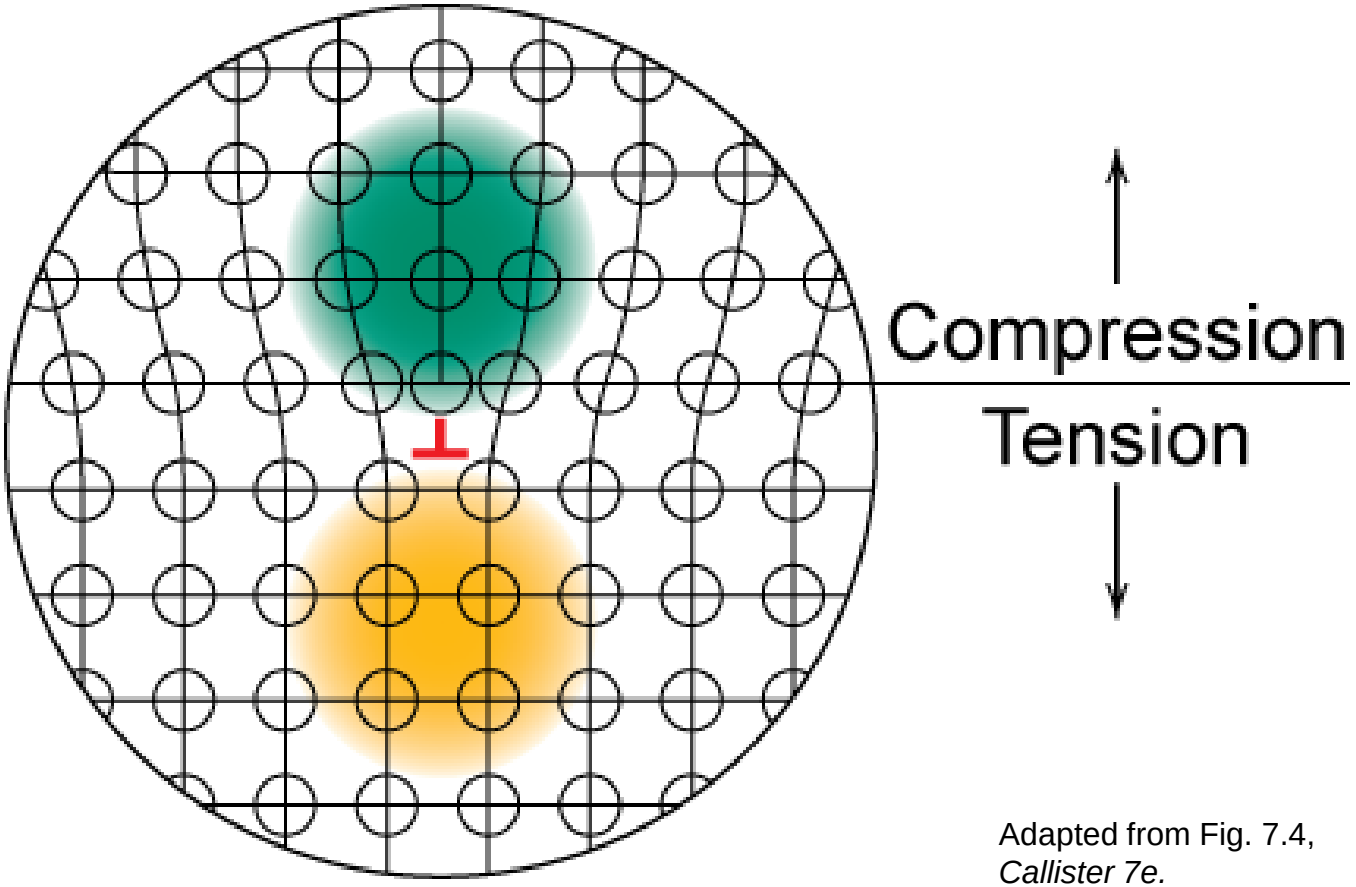
نا خالصی ها تنش های محلی در D و C ایجاد می کند که با حرکت نابجایی ها به راست مخالفت می کند.

ناخالصی جانشینی کوچکتر از اتم ماده تنش کششی)



نا خالصی ها تنش های محلی در A و B ایجاد می کند که با حرکت نابجایی ها به راست مخالفت می کند.

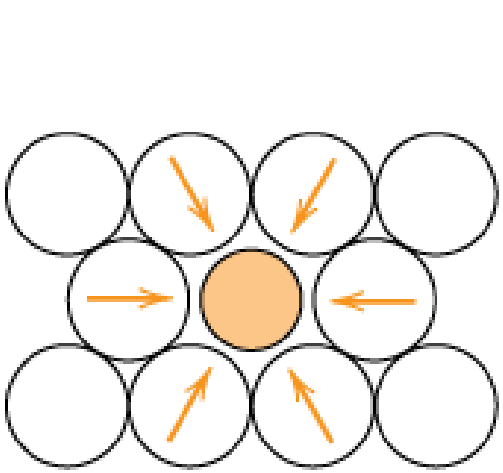
غلظت تنش در نابجایی ها

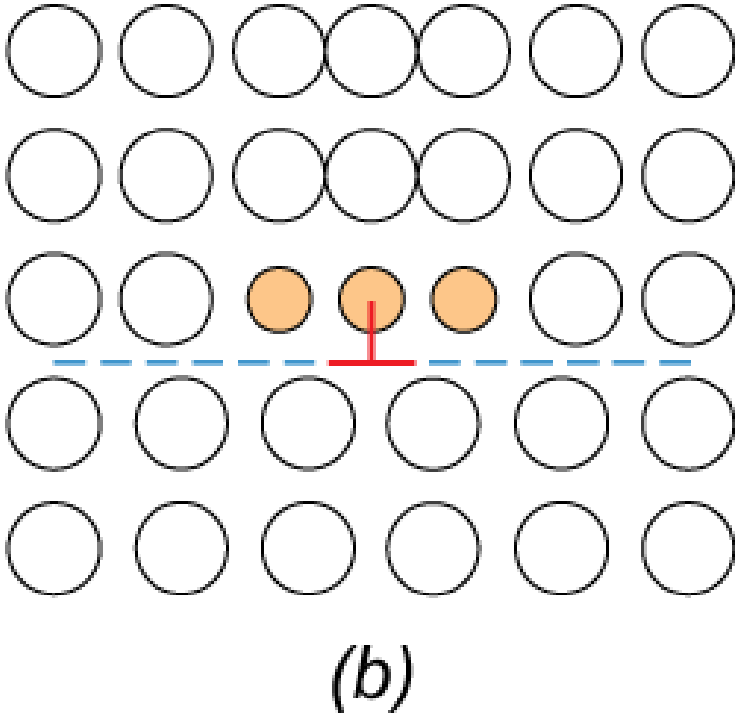


Adapted from Fig. 7.4,
Callister 7e.

استحکام دهی به وسیله آلیاژ سازی

- ناخالصی های کوچک تمایل دارند که در نابجایی ها تمرکز پیدا کنند.
- توانایی حرکت نابجایی ها را کاهش می دهد: استحکام افزایش می یابد.

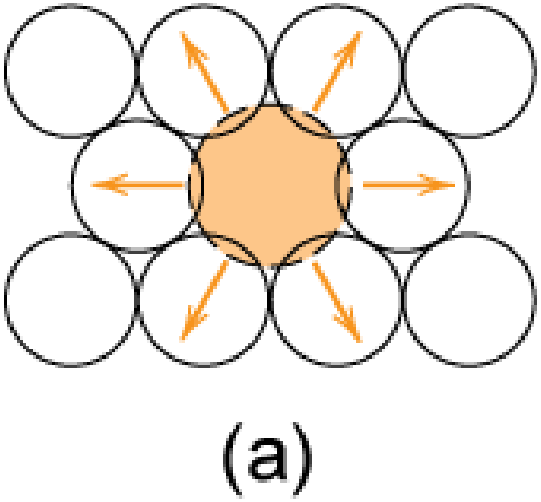


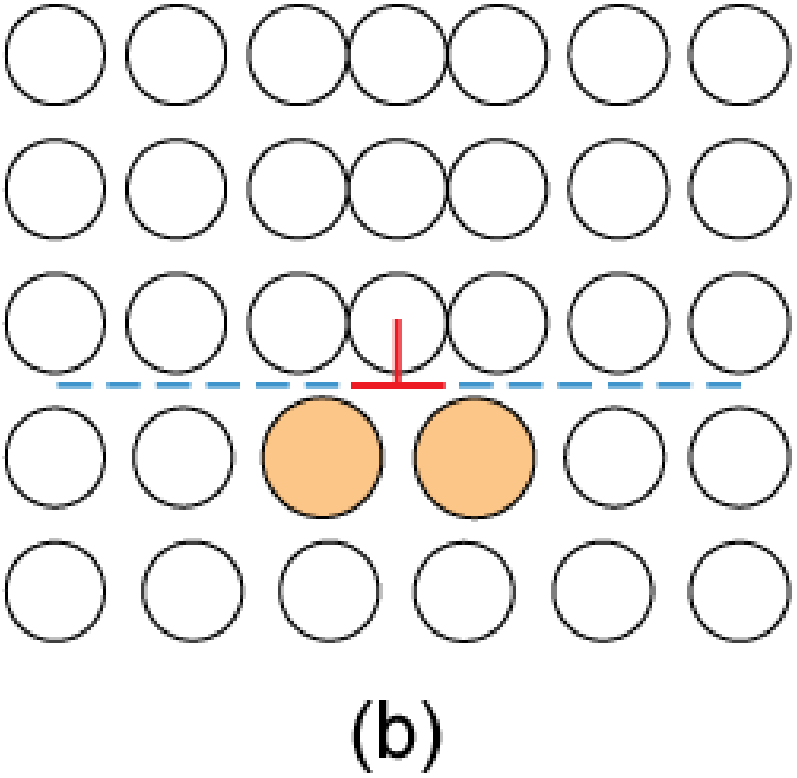


Adapted from Fig. 7.17, *Callister 7e.*

استحکام دهی به وسیله آلیاژ سازی

- ناخالصی های بزرگ در روی قسمت کم دانسیته نابجایی ها تمرکز می یابد

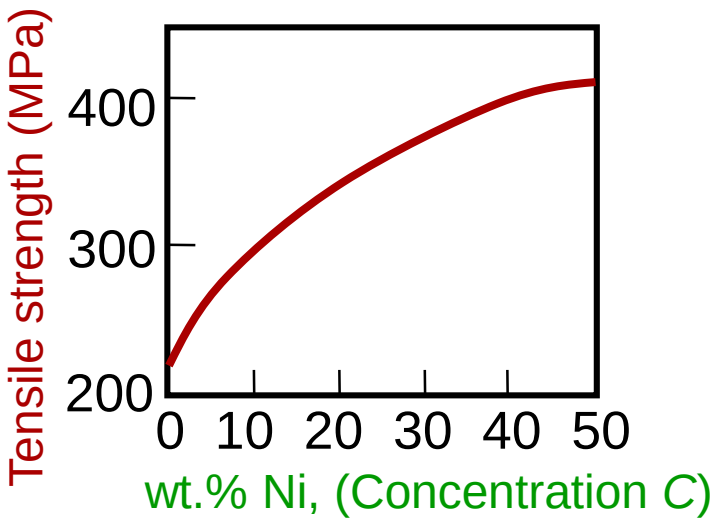


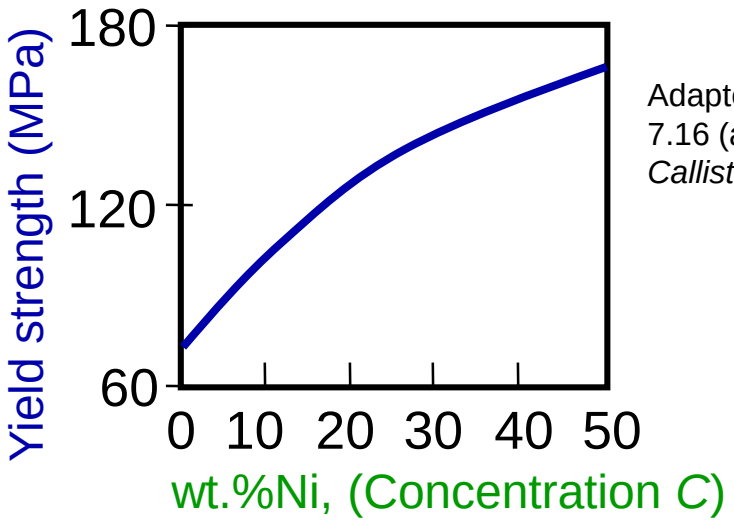


Adapted from Fig. 7.18, *Callister 7e.*

مثالی از محلول جامد
استحکام دهی در مس

. استحکام تسلیم و استحکام کششی با افزایش درصد وزنی Ni افزایش می یابد



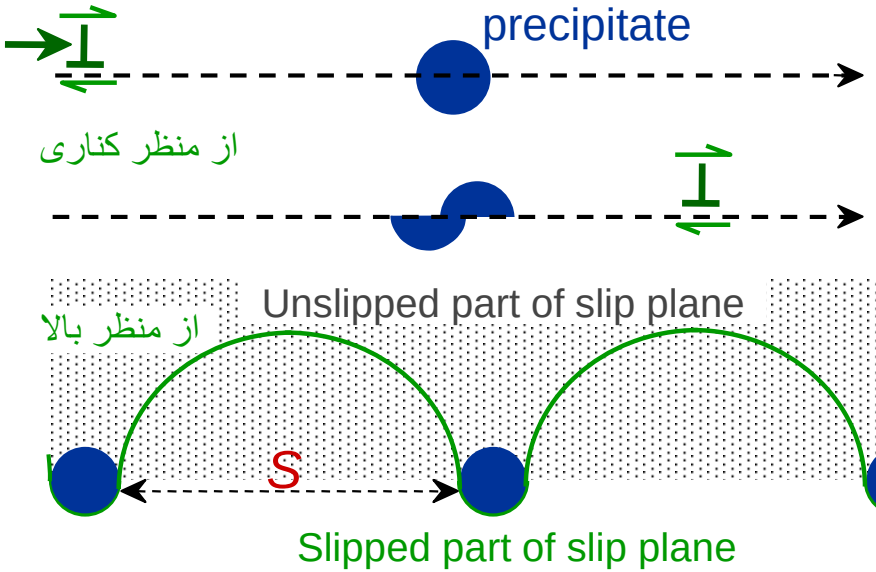


Adapted from Fig. 7.16 (a) and (b), *Callister 7e.*

- Empirical relation: $\sigma_y \sim C^{1/2}$
- Alloying increases σ_y and *TS*.

۳- استحکام دهی از رسوب

رسوب سختی ها موانع سختی برای برش می باشند
در انجام عملیات سخت کردن (افزایش استحکام) رسوبی ابتدا باید یک فاز محلول جامد فوق اشباع تولید کرد بدین منظور باید به آلیاژ آن حرارت داده شود تا به حالت مذاب در بیاید و سپس سریع سرد شود. از آنجا که محلول فوق اشباع ناپایدار است تمایل به تشکیل فاز دوم و رسیدن به حالت تعادلی را دارد که این امر باعث می‌شود عناصر موجود در زمینه از حد حلالیت خارج شود و با تجمع در کنار هم فاز ثانویه‌ای را ایجاد کنند که آن‌ها را رسوب گویند
مثال: سرامیک ها در فلزات .(SiC in Iron or Cu in Aluminum)



تنش های برشی بزرگ نیاز هست که نابجایی ها را از رسوب حرکت بدهد و بعد آن را برش دهد
.

نابجایی پیشرفت می کند اما رسوبات به عنوان مکان های قفل شوندگی در فضاها عمل می کند

در نتیجه $\sigma_y \sim \frac{1}{S}$

کاربردها:
استحکام دهی از رسوب ها

- ساختار داخلی بال در بویینگ ۷۶۷
Al 2224 Temper 351

Adapted from chapter-opening photograph, Chapter 11, *Callister 5e.* (courtesy of G.H. Narayanan and A.G. Miller, Boeing Commercial Airplane Company.)

- آلومینیم به وسیله رسوباتی که از آلیاژها ایجاد می شود استحکام می یابد.

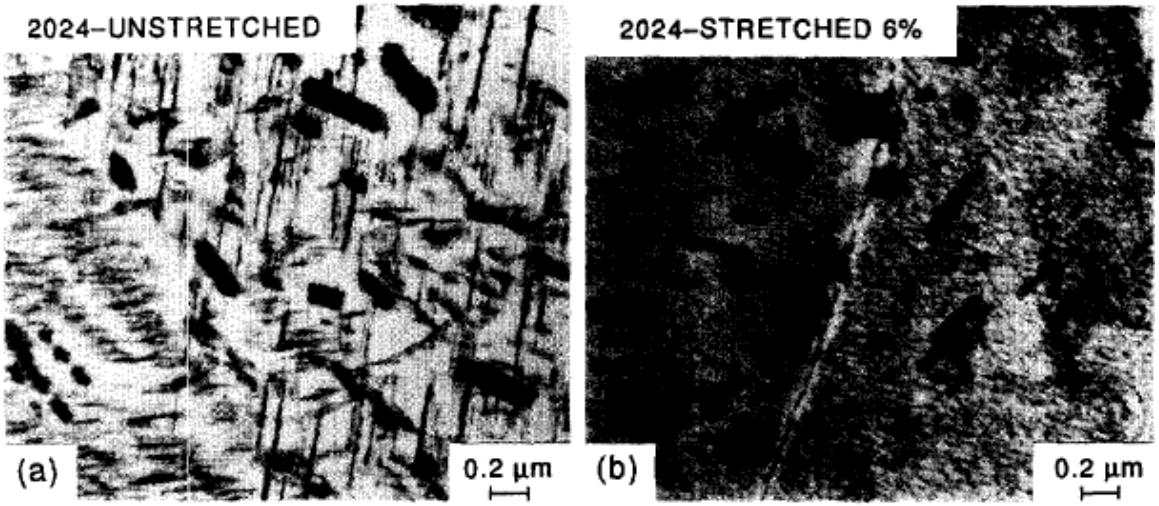
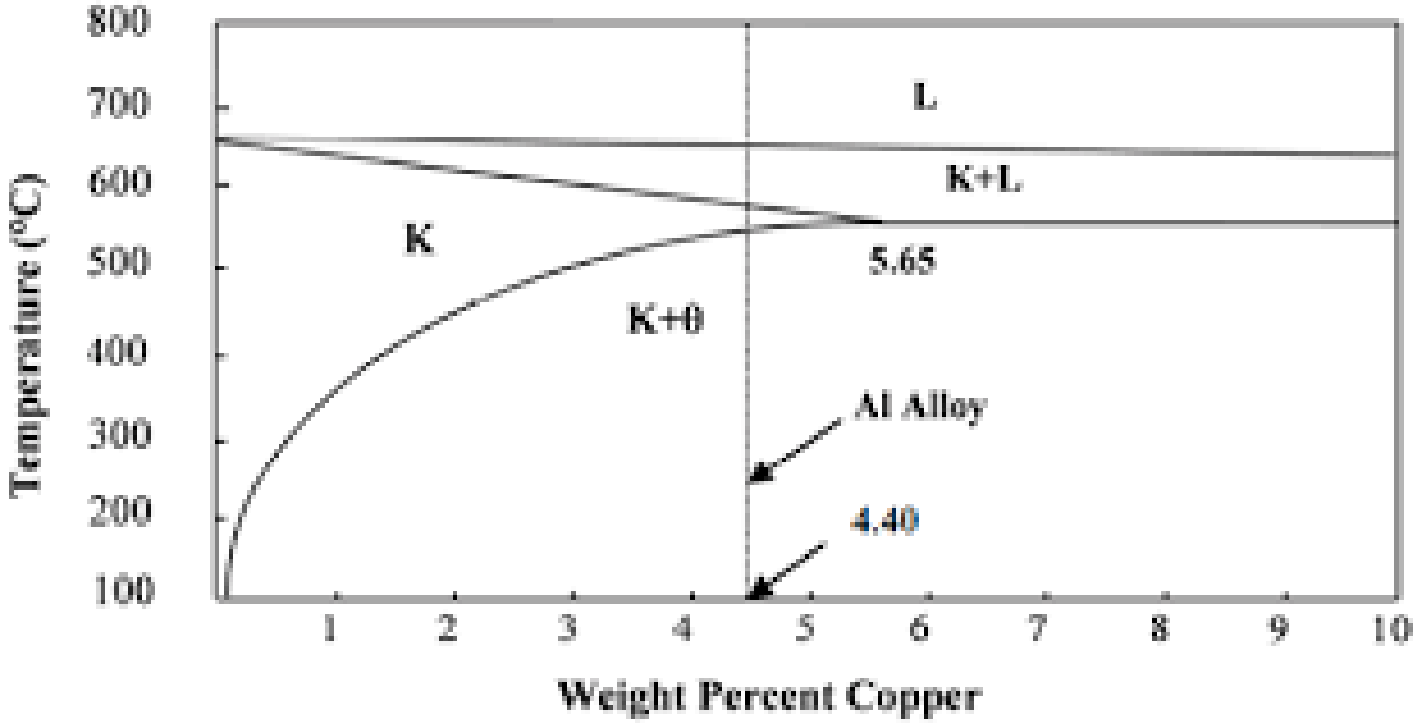


Fig. 6. Transmission electron micrographs (TEMs) showing the precipitate structure in 2024 aged for 12 h at 175°C. Courtesy of D.L. Roberson.



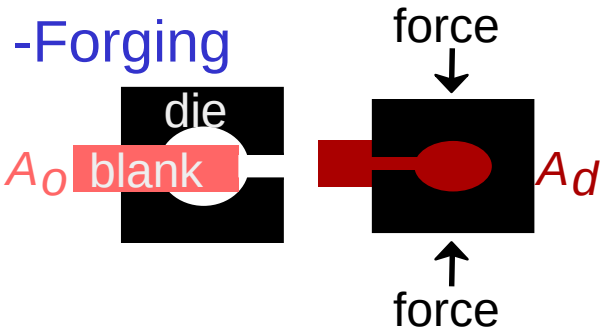
T351بیانگر تنش زدایی بوسیله کشش بعد از عملیات حرارتی T3 هست

T3

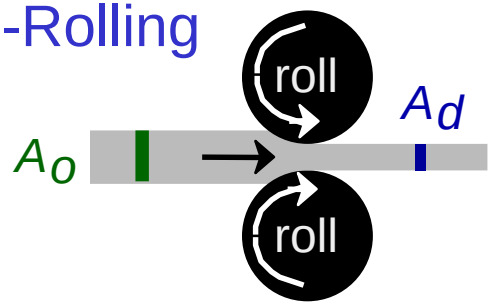
۱. عملیات حرارتی محلولی
۲. سرد کردن قطعه
۳. انجام کار سرد بر روی قطعه
۴. پیرسازی طبیعی تا رسیدن به شرایط پایدار

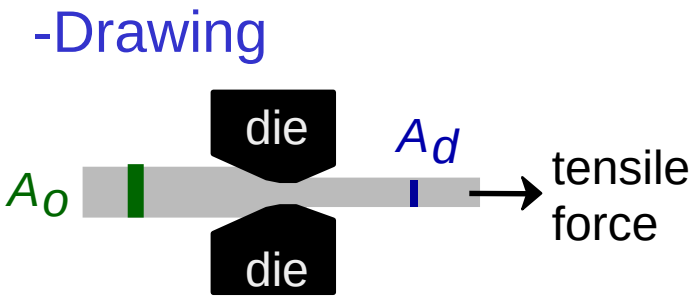
4 استراتژی هایی برای استحکام دهی :
۴ - کار سختی

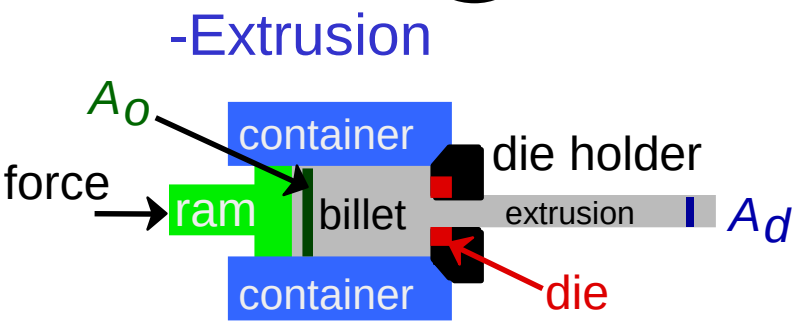
- تغییر شکل در دمای اتاق
- عملیات تغییر شکل رایج سطح مقطع تغییر می دهد.



Adapted from Fig. 11.8, *Callister 7e.*





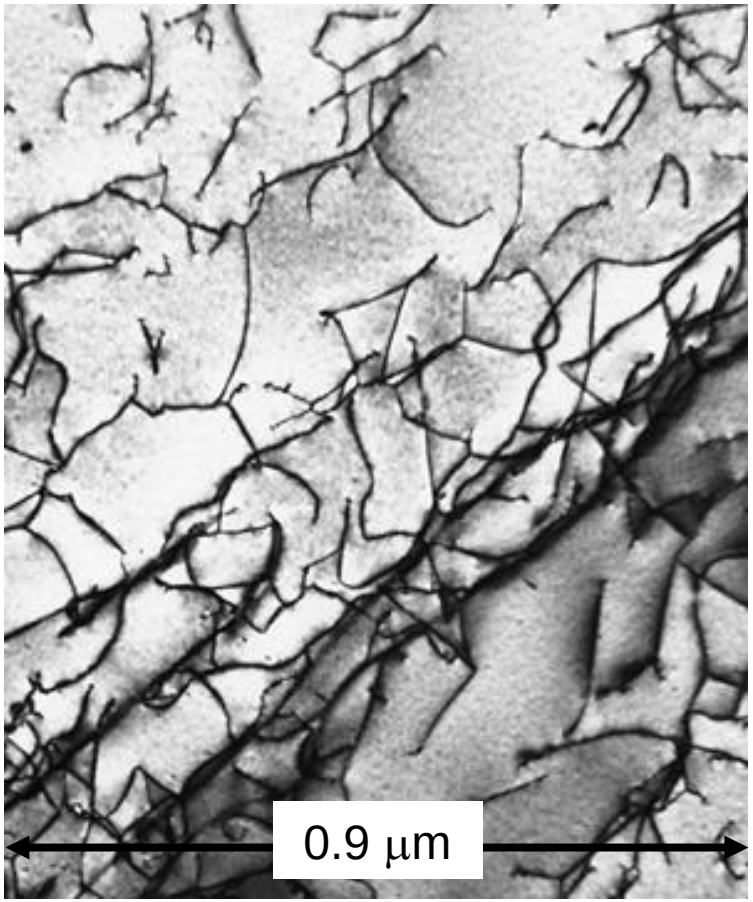


$$\%CW = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$

اگر اعمال نیروهای خارجی بر فلز بـه گونـه ای باشـد کـه بـیش از یـک سیسـتم لغزشی در آن فعال گردد، نابجائیهای متحرک با یکدیگر برخورد نموده و ادامهٔ حرکـت آنها با مشکل مواجه خواهد شد. در یک نمونه پلی کریستال، ایجـاد شـرایط لغـزش در برخی دانه ها و همچنین چرخش برخی از دانه ها سبب تسـریع فعـال شدن سایر سیستمهای لغزش و در نتیجه، تداخل شدید نابجائیها به یکدیگر می گردد. بنا بر این در خلال تغییر شکل، برخورد نابجائیها بطور فزاینده ای افزایش یافته که این امر منجر به افزایش تنش مورد نیاز برای ادامه حرکت آنها می گردد. پدیدهٔ فوق اساس کارسختی را تشکیل می دهد.

نابجایی ها در حین کار سرد

•آلیاژ تیتانیوم بعد از کار سرد:



Adapted from Fig. 4.6, *Callister 7e.* (Fig. 4.6 is courtesy of M.R. Plichta, Michigan Technological University.)

• در حین کار سرد نابجایی ها به یکدیگر گرفتار می شوند.
• حرکت نابجایی ها بسیار مشکل تر می شود

نتایج کار سرد

$$\text{دانسیته نابجایی ها} = \frac{\text{طول کلی نابجایی}}{\text{واحد حجم}}$$

- دانسیته در نمونه بدون کار سرد

$10^3\ mm^{-2}$

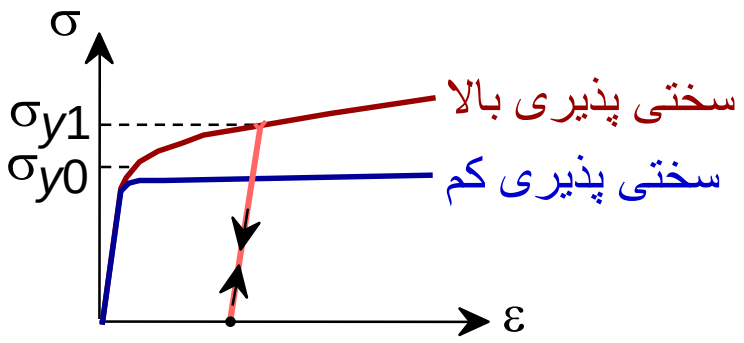
- تغییر شکل نمونه دانسیته را افزایش می دهد

10^9-$10^{10}\ mm^{-2}$

- عملیات حرارتی دانسیته نابجایی ها را کاهش می دهد

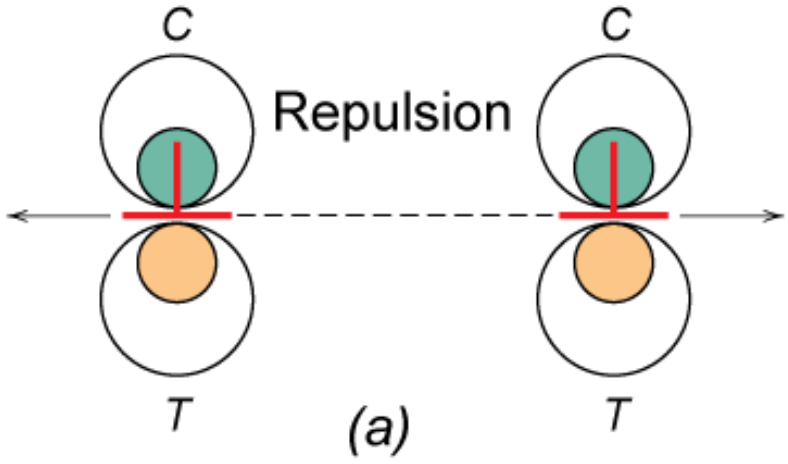
10^5-$10^6\ mm^{-2}$

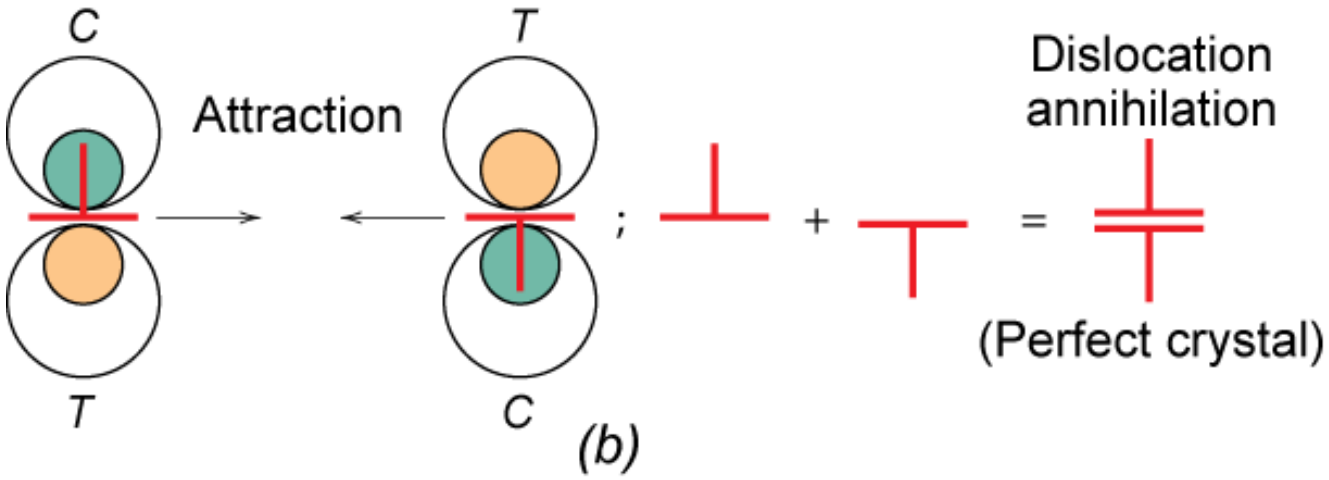
- همان گونه که دانسیته نابجایی ها افزایش می یابد تنش تسلیم افزایش می یابد

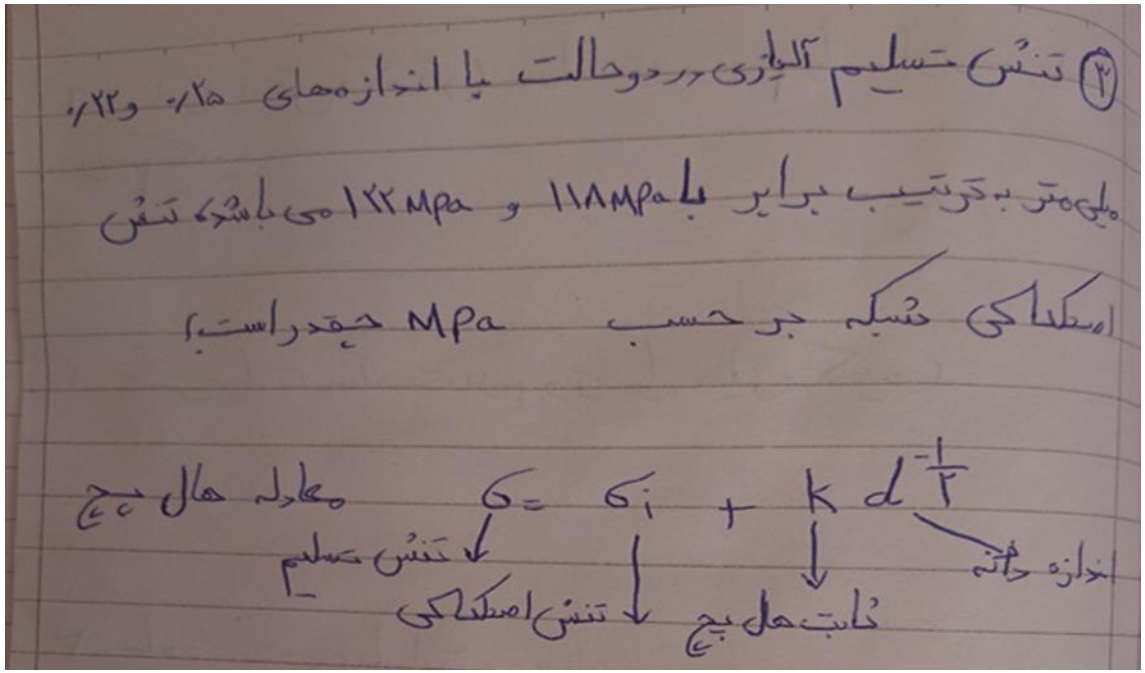


اثرات نابجایی ها به همدیگر

Adapted from Fig. 7.5, *Callister 7e.*






۴) تنش تسلیم آلیاژی در دو حالت با اندازه‌های ۰/۲۵ و ۰/۲۲
میلی‌متر به ترتیب برابر با ۱۱۸MPa و ۱۲۲MPa می‌باشد، تنش
اصطکاکی شبکه در حدود MPa چقدر است؟
معادله هال پچ
$\sigma = \sigma_i + k d^{-\frac{1}{2}}$
تنش تسلیم
تنش اصطکاکی
ثابت هال پچ
اندازه دانه