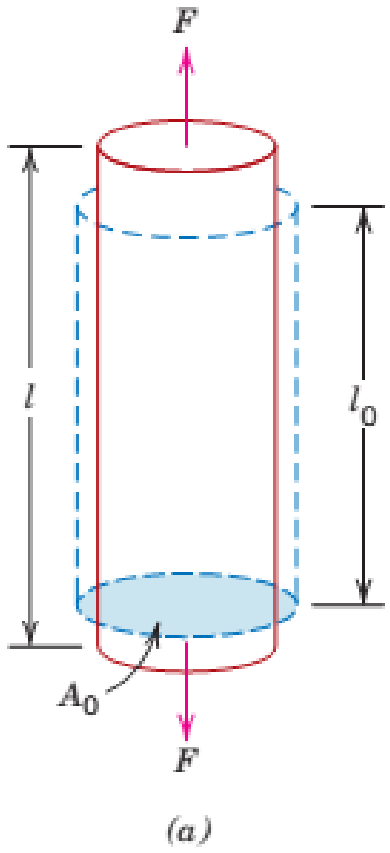
خواص مکانیکی فلزات

Mechanical properties of Metals

مفهوم تنش-کرنش و آزمون کشش



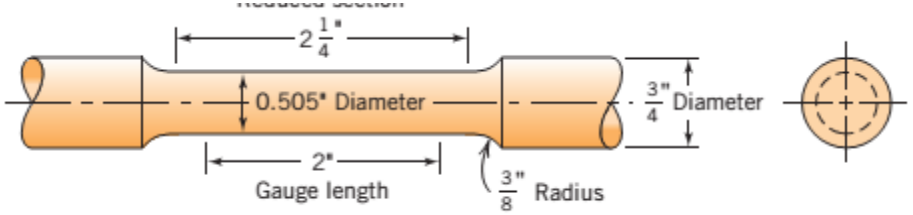
تنش مهندسی

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

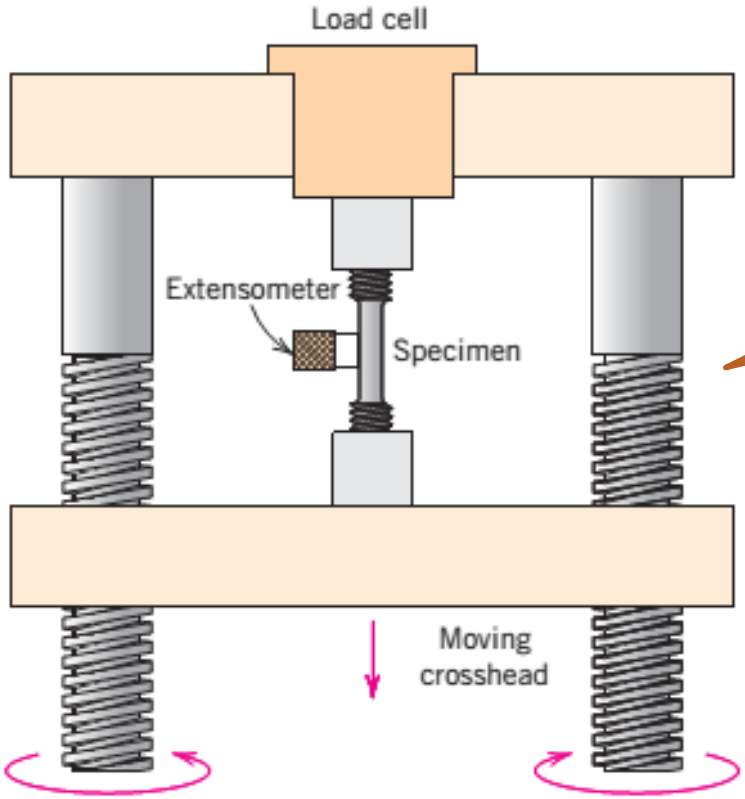
کرنش مهندسی

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

آزمون کشش

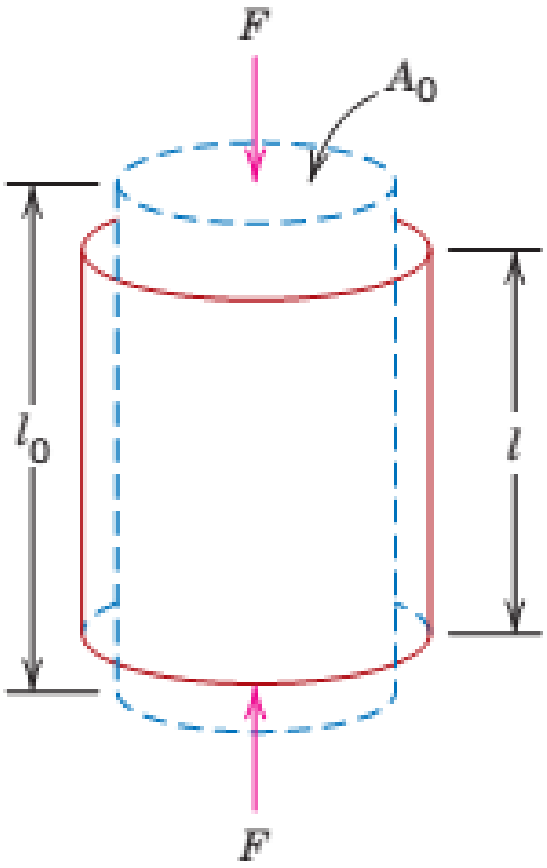


نمونه آزمون کشش

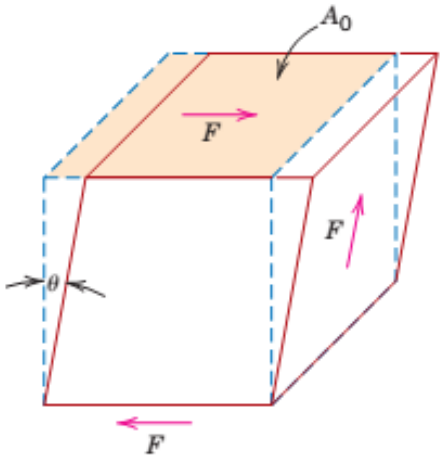


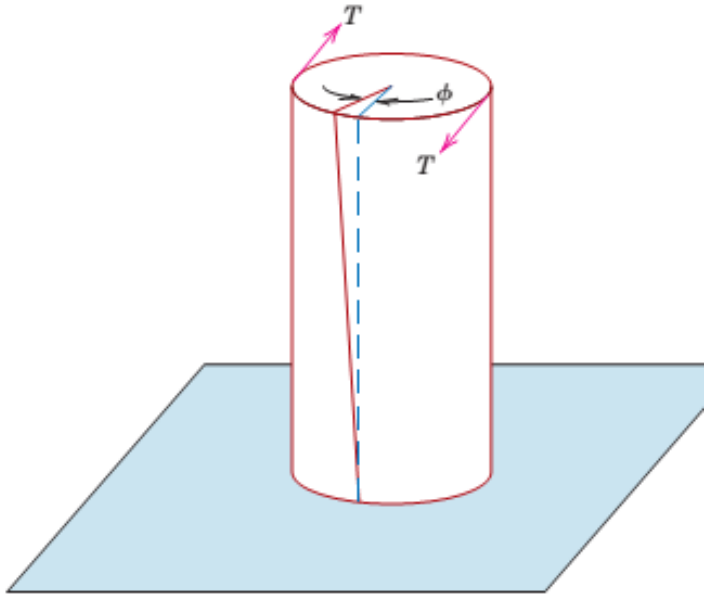
نمای شماتیک دستگاه آزمون کشش

آزمون فشار



آزمون پیچش و تنش برشی

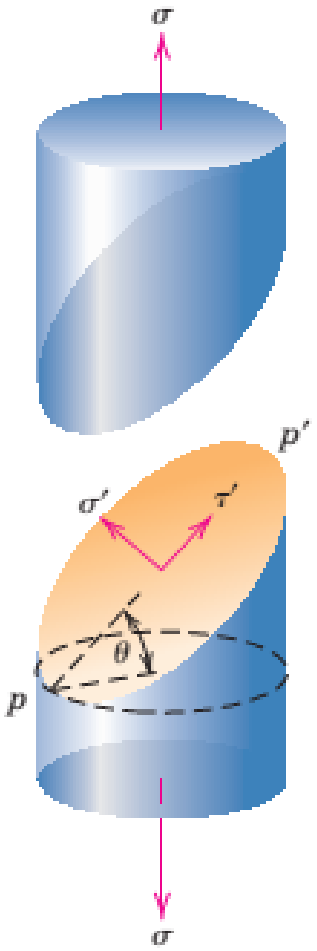




تنش برشی

$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

ملاحظات هندسی حالت تنش

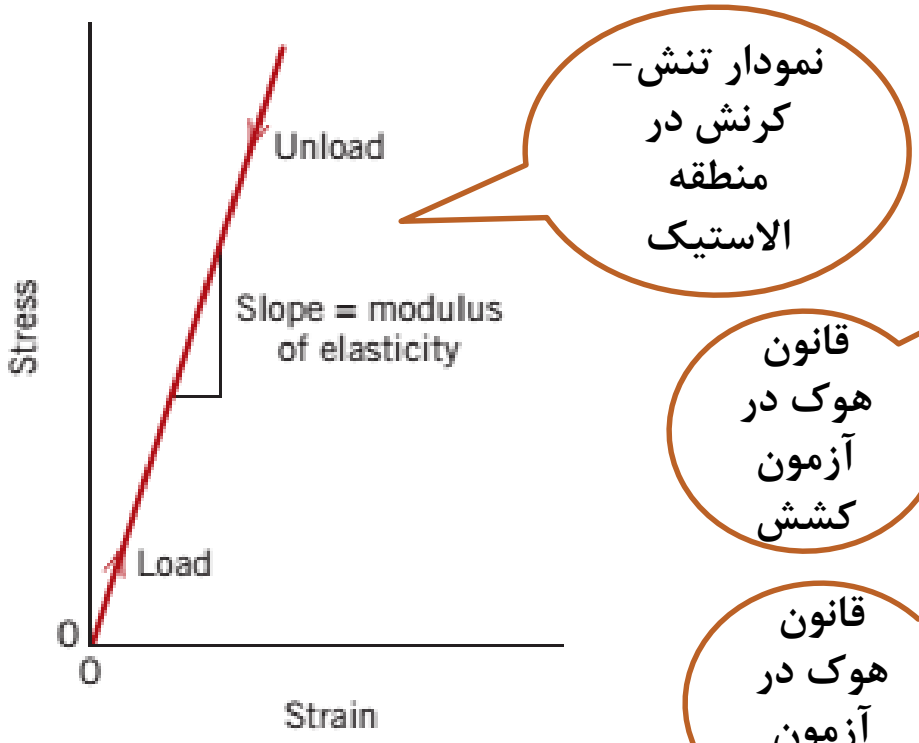


$$\sigma' = \sigma \cos^2 \theta = \sigma\left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2}\right)$$

$$\tau' = \sigma \sin \theta \cos \theta = \sigma\left(\frac{\sin 2\theta}{2}\right)$$

تغییرشکل الاستیک (ELASTIC DEFORMATION)

- تغییر شکلی که در آن تنش و کرنش با هم متناسب هستند را تغییر شکل الاستیک گویند. برای بیشتر فلزات این رابطه خطی است و شیب خط در آزمون کشش را مدول الاستیک (E) و در آزمون پیچش را مدول برشی (G)گویند.



نمودار تنش- کرنش در منطقه الاستیک

$$\sigma = E\varepsilon$$

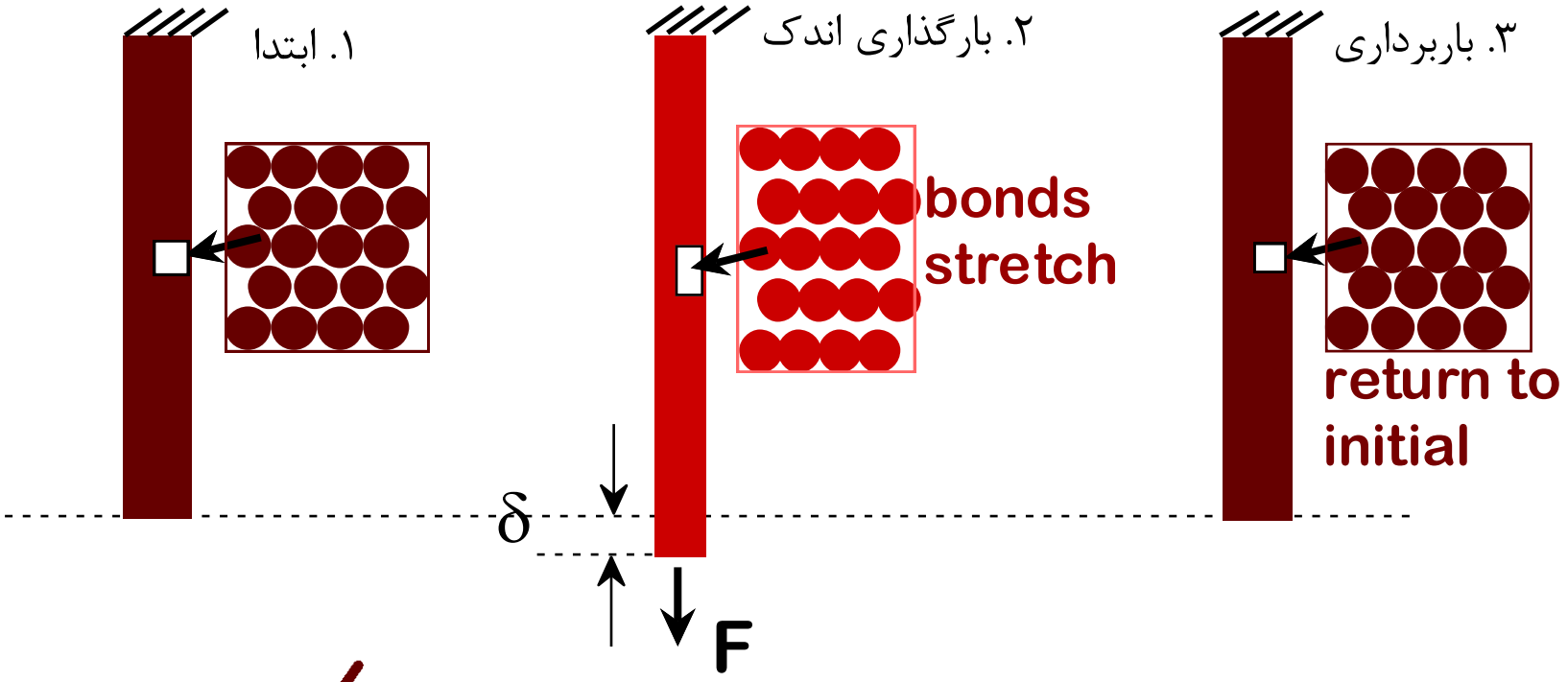
قانون هوک در آزمون کشش

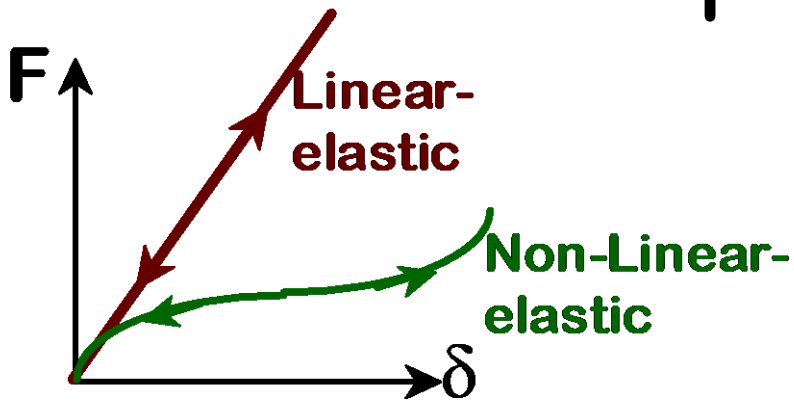
$$\tau = G\gamma$$

قانون هوک در آزمون پیچش

کرنش برشی

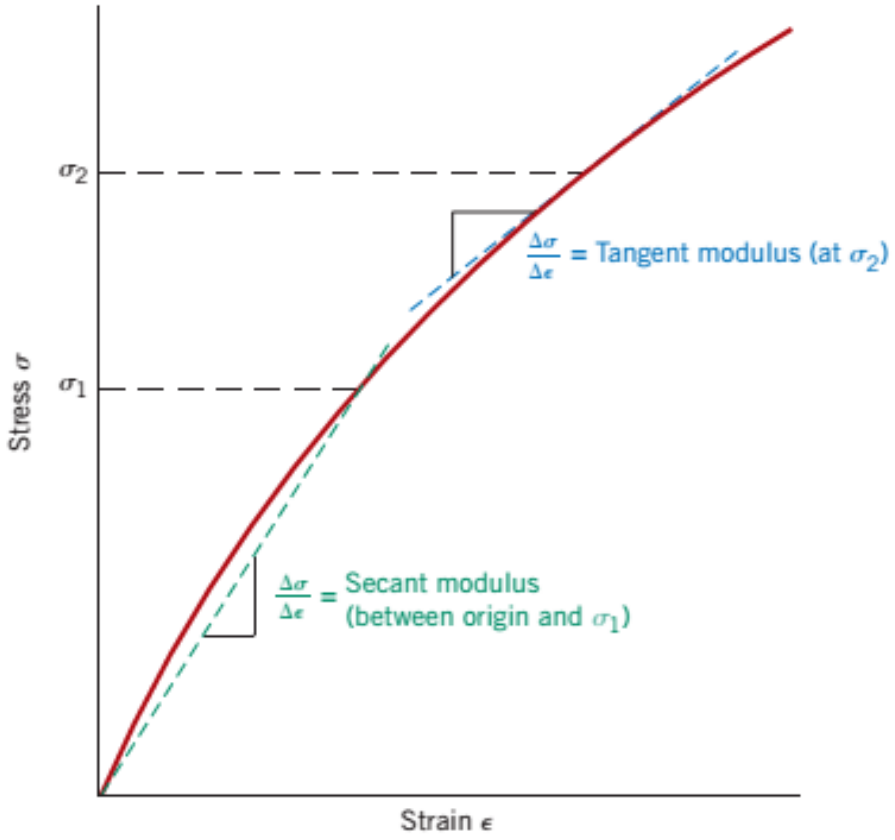
تغییرشکل الاستیک در فلزات





الاستیک یعنی برگشت پذیر!

- برخی مواد مانند خصوص بسیاری از پلیمرها چدن خاکستری هستند که رابطه بین تنش و کرنش در منطقه الاستیک خطی نیست و رفتار غیر خطی دارند. به همین دلیل مدول الاستیک آنها مانند قبل بدست نمی آید. برای این مواد از مدول تانژانتی یا سکانتی استفاده می شود.

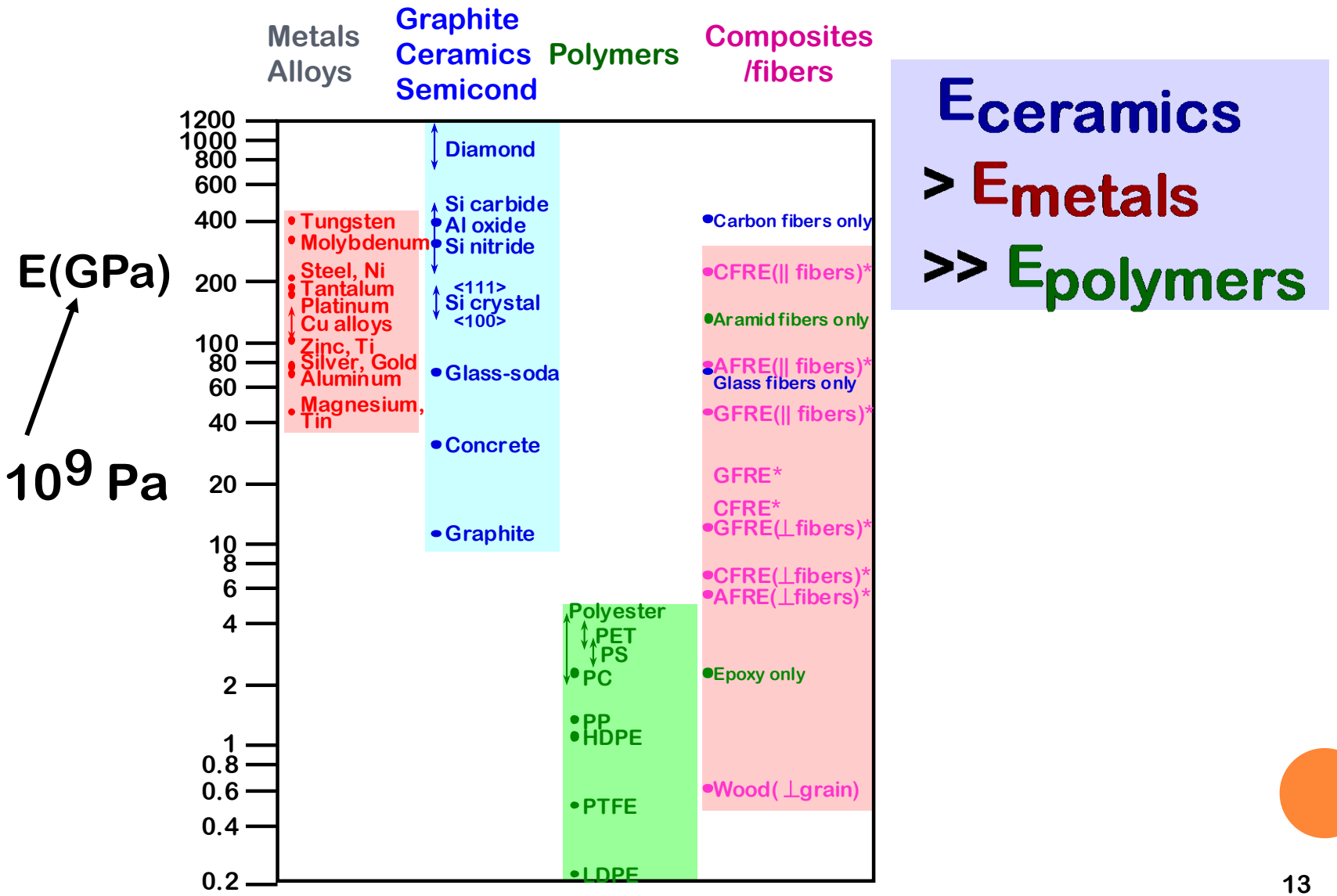


مدول الاستیک، برشی و ضریب پواسان برخی مواد

Table 6.1 Room-Temperature Elastic and Shear Moduli, and Poisson's Ratio for Various Metal Alloys

	Modulus of Elasticity		*Shear Modulus*		*Poisson's Ratio*
Metal Alloy	*GPa*	*10^6 psi*	*GPa*	*10^6 psi*	
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.29
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28

مدول الاستیک (یانگ): مقایسه



$E_{ceramics} > E_{metals} >> E_{polymers}$

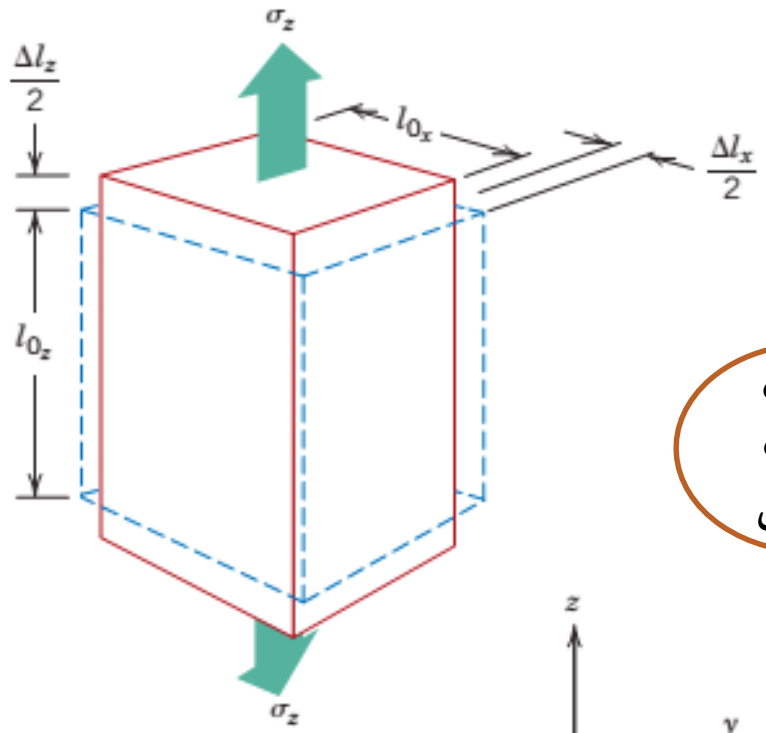
مثال) یک قطعه مسی با طول اولیه 305 mm در آزمون کشش با تنش 276 MPa کشیده می شود. اگر تغییرشکل بطور کلی الاستیک باشد، مقدار کرنش چه مقدار خواهد بود.

$$\sigma = \epsilon E = \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right) E$$

$$\Delta l = \frac{\sigma l_0}{E}$$

$$\Delta l = \frac{(276\ \text{MPa})(305\ \text{mm})}{110 \times 10^3\ \text{MPa}} = 0.77\ \text{mm}\ (0.03\ \text{in.})$$

خواص الاستیک مواد

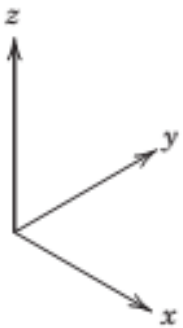


$$\frac{\epsilon_z}{2} = \frac{\Delta l_z/2}{l_{0_z}}$$

$$-\frac{\epsilon_x}{2} = \frac{\Delta l_x/2}{l_{0_x}}$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

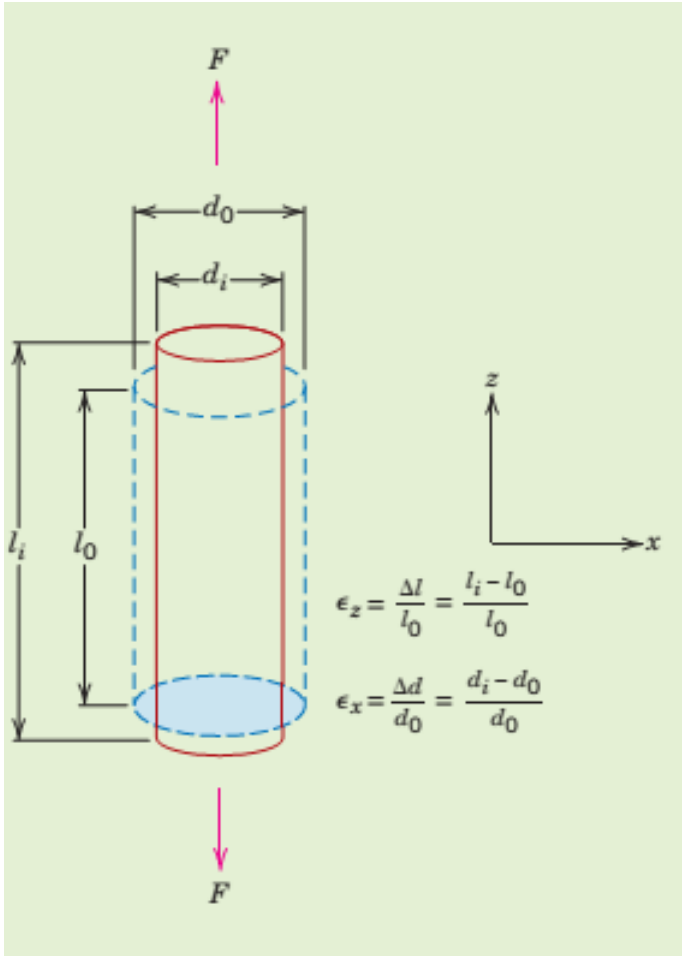
تعریف ضریب پواسان



$$E = 2G(1+\nu)$$

رابطه بین مدول کششی و برشی

مثال) یک تنش کششی در طول نمونه میله ای برنجی با قطر 10 mm اعمال می شود. میزان بار مورد نیاز برای ایجاد 2.5×10^-3 mm تغییر در قطر نمونه به شرط اینکه تغییر شکل بطور کلی الاستیک باشد چقدر است؟



$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{-2.5 \times 10^{-3}\ \text{mm}}{10\ \text{mm}} = -2.5 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_z = -\frac{\epsilon_x}{\nu} = -\frac{(-2.5 \times 10^{-4})}{0.34} = 7.35 \times 10^{-4}$$

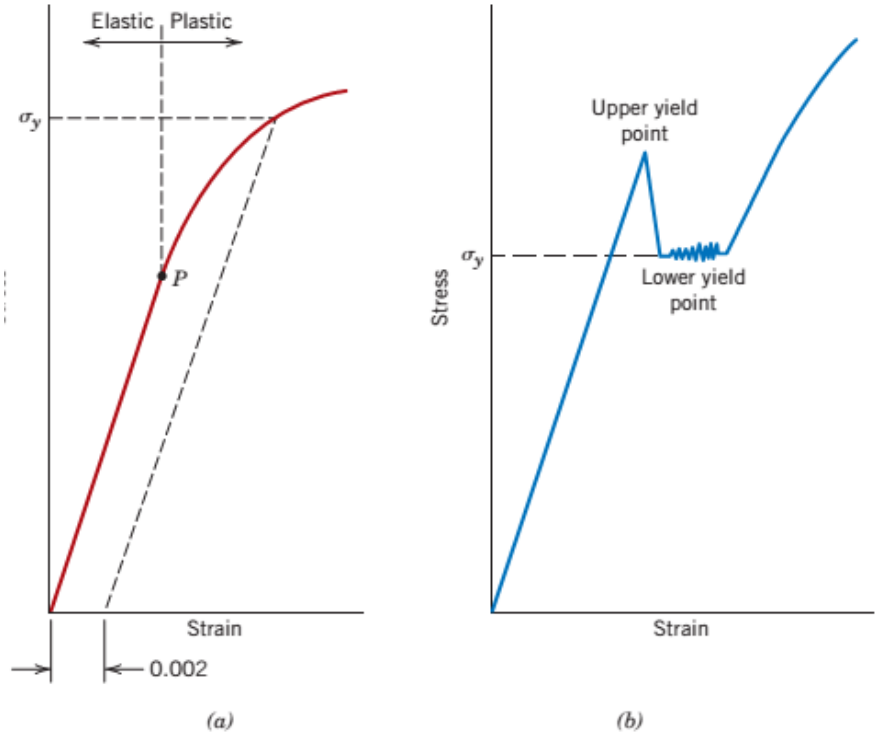
$$\sigma = \epsilon_z E = (7.35 \times 10^{-4})(97 \times 10^3\ \text{MPa}) = 71.3\ \text{MPa}$$

$$F = \sigma A_0 = \sigma\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \pi$$

$$= (71.3 \times 10^6\ \text{N/m}^2)\left(\frac{10 \times 10^{-3}\ \text{m}}{2}\right)^2 \pi = 5600\ \text{N}\ (1293\ \text{lb}_\text{f})$$

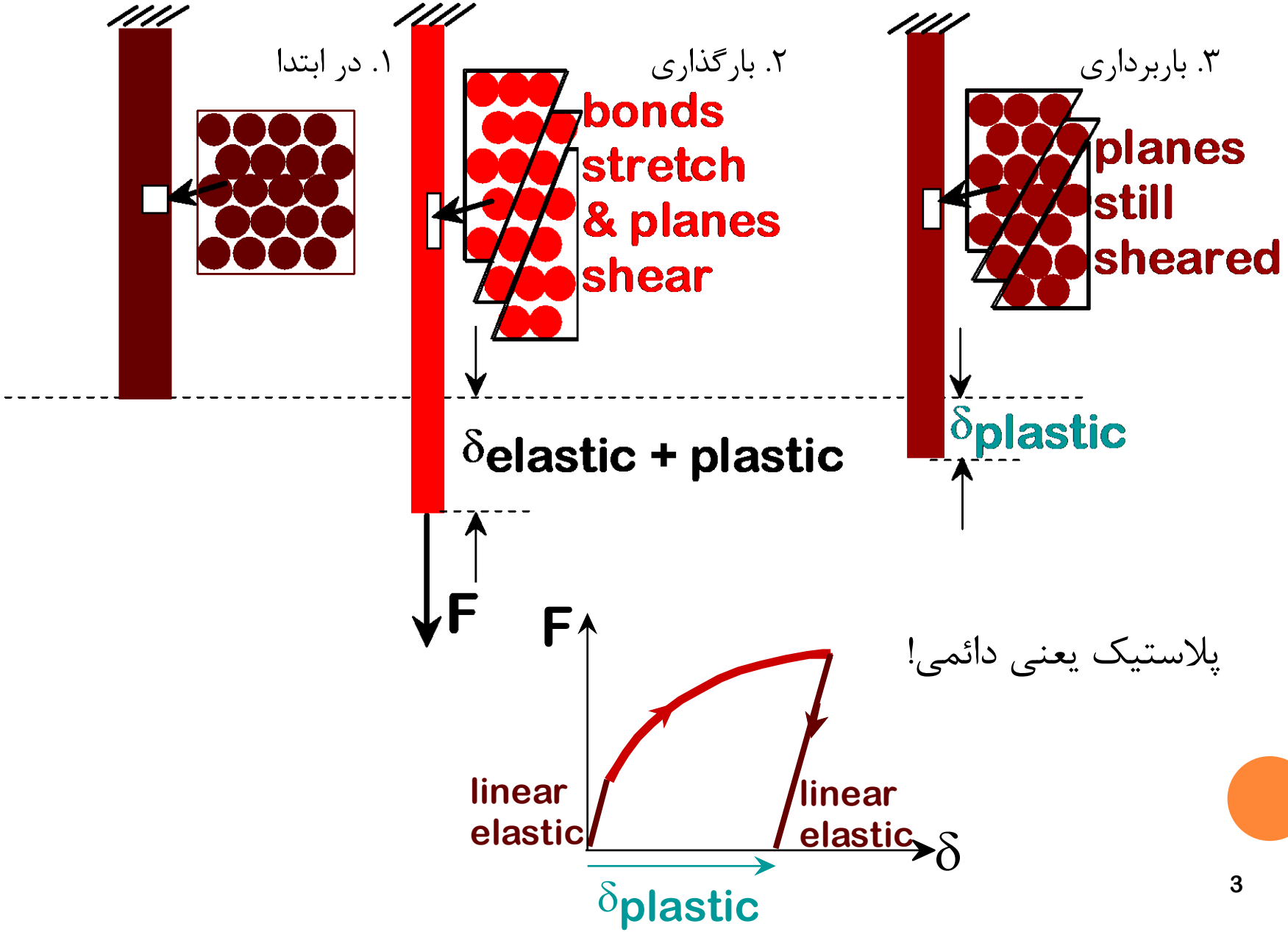
تغییرشکل پلاستیک

- در بسیاری از فلزات منطقه الاستیک در حدود کرنش 0,002 است. تغییر شکل مواد در بالاتر از این نقطه را تغییرشکل پلاستیک گویند.



- در منطقه پلاستیک رابطه بین تنش و کرنش غیر خطی است.

تغییرشکل پلاستیک در فلزات



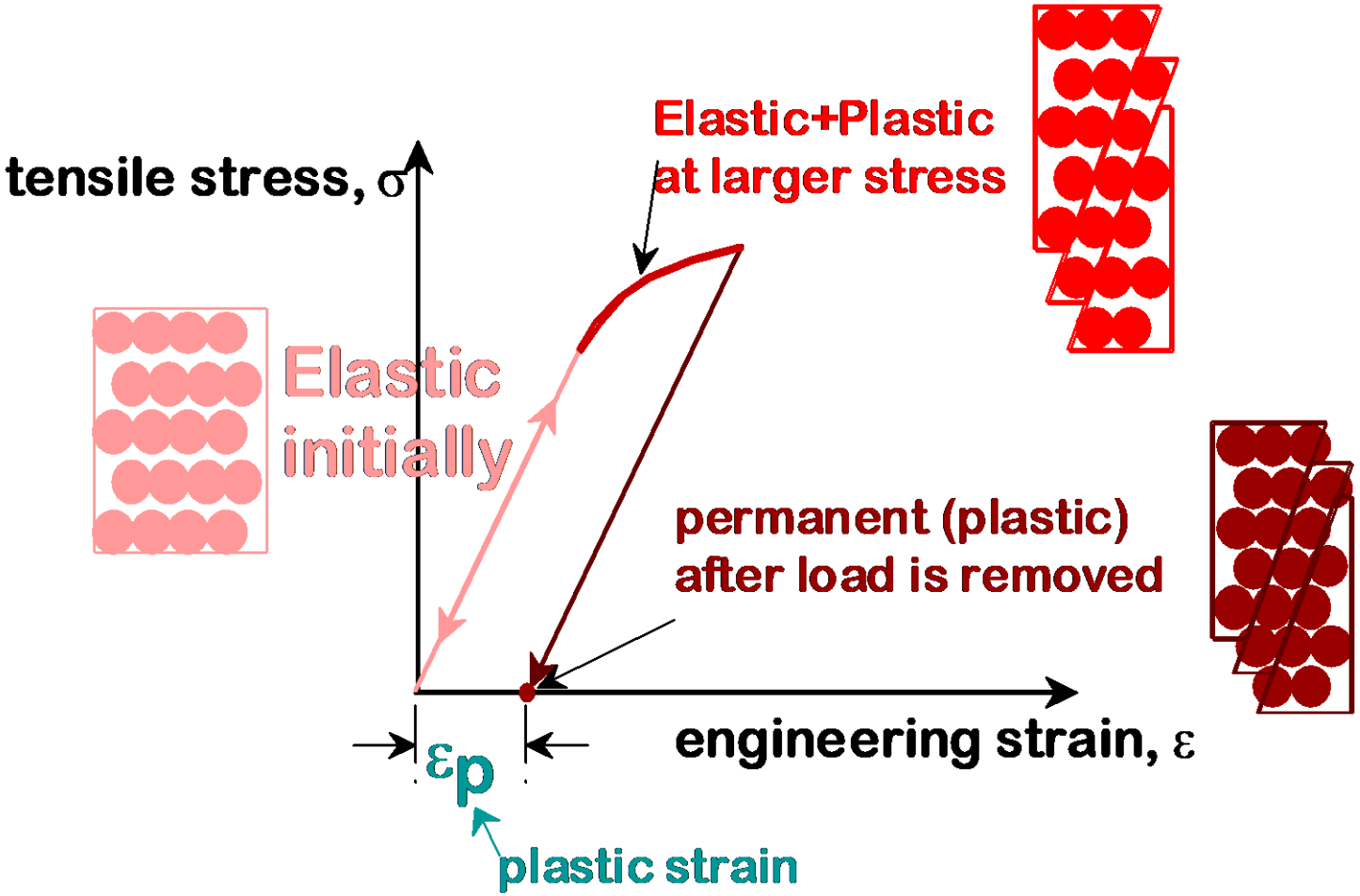
پلاستیک یعنی دائمی!

- نقطه ای که منطقه پلاستیک را از الاستیک جدا می کند نقطه تسلیم گویند و تنش متناظر با این نقطه را استحکام تسلیم گویند.
- برخی از مواد مانند فولاد نقطه تسلیم مشخصی دارند (شکل b اسلاید قبل) و بسیاری از مواد نرم نقطه تسلیم مشخص ندارند (شکل a اسلاید قبل). برای موادی که نقطه تسلیم مشخصی ندارند از کرنش 0.002 خطی به موازات منطقه الاستیک ترسیم می شود و محل تلاقی آن خط را با نمودار تنش-کرنش نقطه تسلیم نامیده می شود.

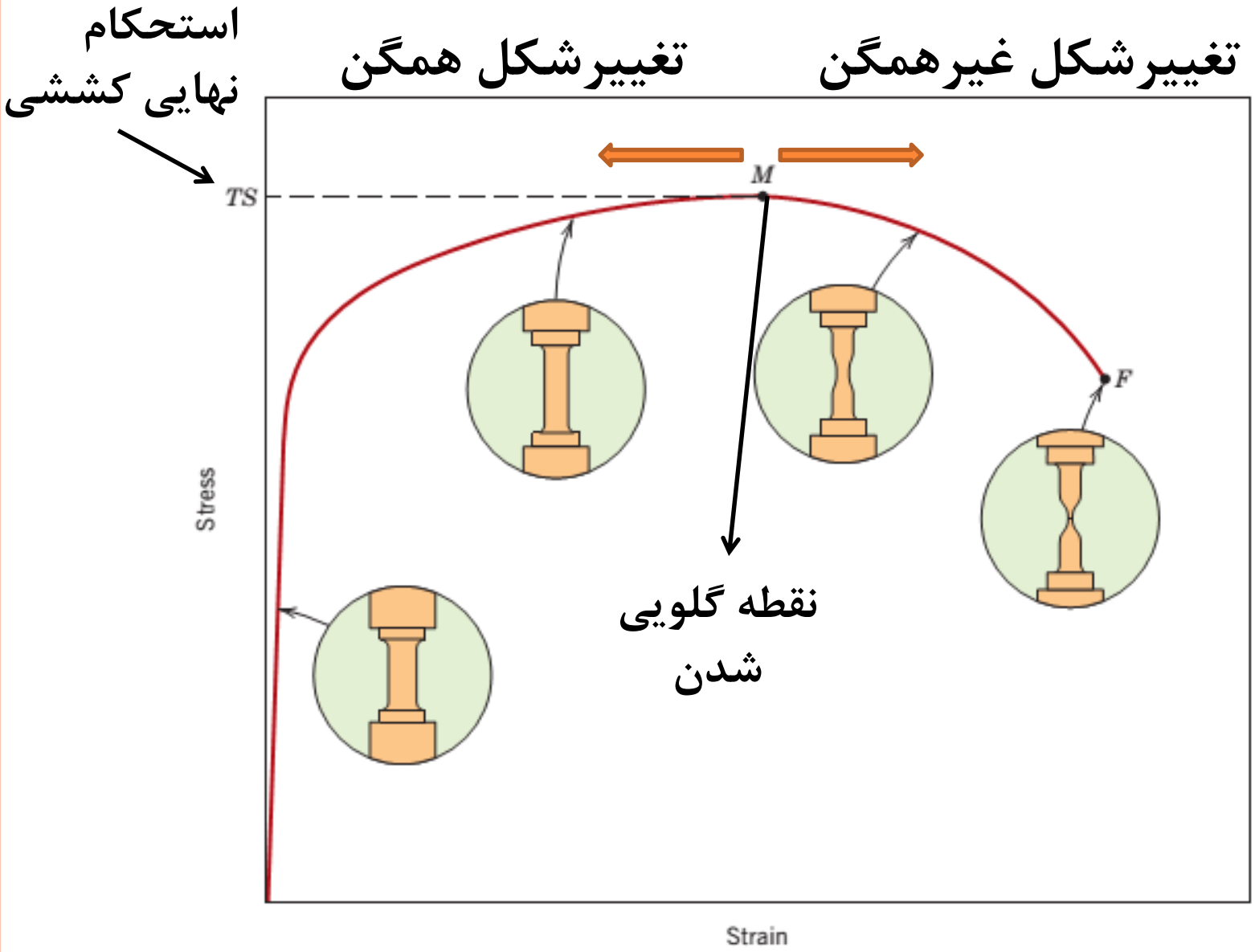
تغییرشکل پلاستیک در فلزات

در دمای پایین، $T < T_{melt}/3$

- آزمون کشش ساده:



استحکام کششی



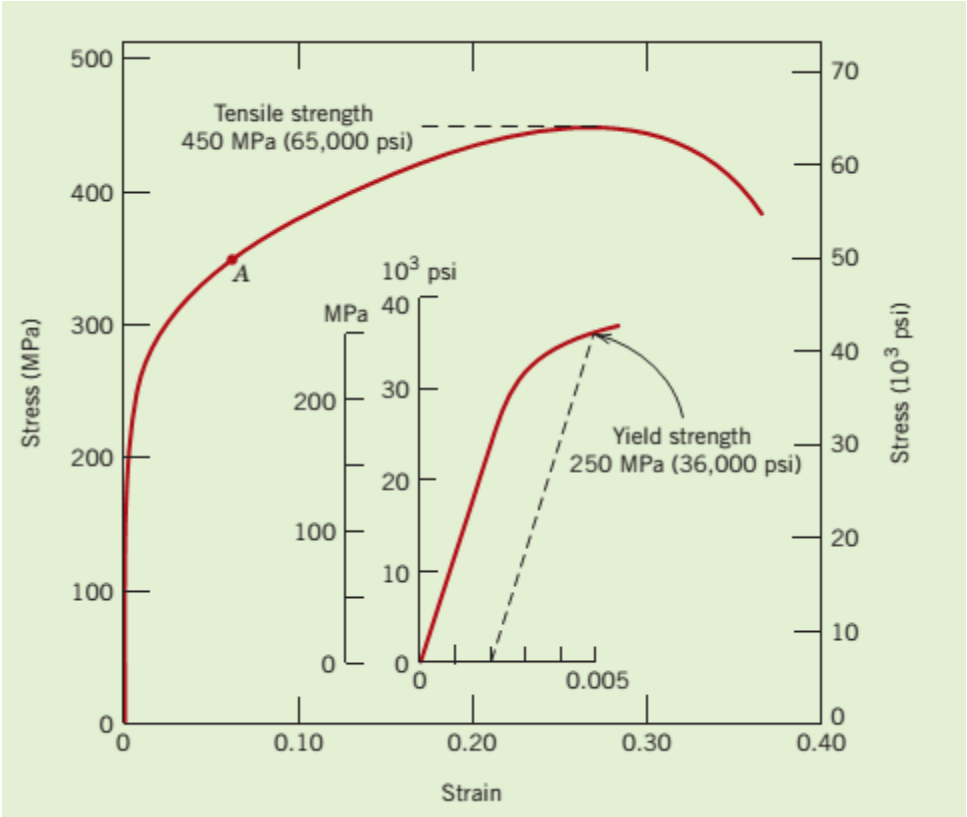
مثال) برای نمودار تنش-کرنش زیرتعیین کنید:

الف) مدول الاستیک

ب) استحکام تسلیم در خط ترسیم شده در کرنش 0.002

ج) حداکثر باری که توسط نمونه استوانه ای با قطر 12.8 mm می تواند تحمل کند.

د) تغییر در طول نمونه با طول اولیه 250 mm که تحت تنش 345 MPa است.



الف)

$$E = \text{slope} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

$$E = \frac{(150 - 0)\,\text{MPa}}{0.0016 - 0} = 93.8\,\text{GPa}\,(13.6 \times 10^6\,\text{psi})$$

ب) خط موازی با نقطه تسلیم که از نقطه کرنش 0.002 ترسیم می شود، نمودار را در 250 MPa قطع می کند. پس تنش تسلیم 250 MPa است.

ج)

$$F = \sigma A_0 = \sigma\left(\frac{d_0}{2}\right)^2\pi$$

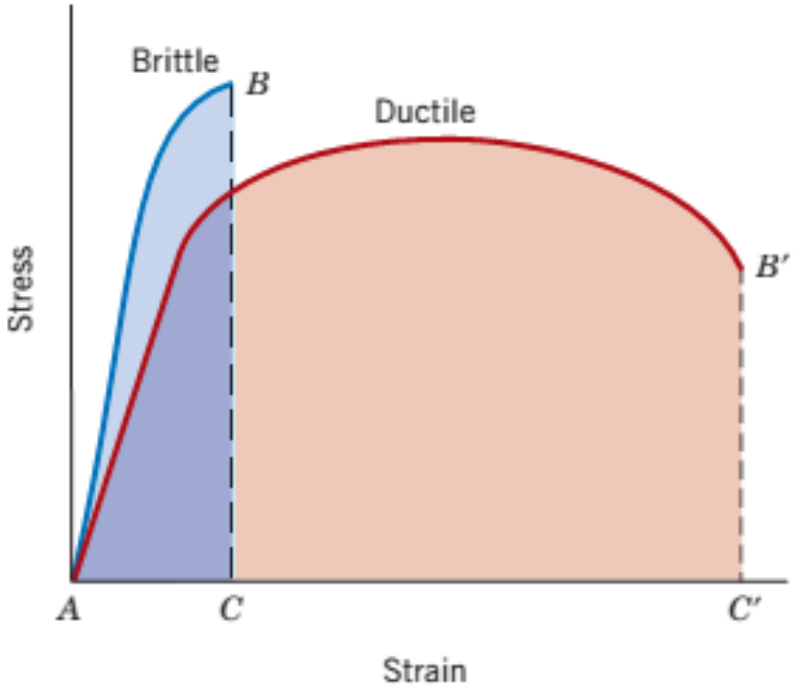
$$= (450 \times 10^6\,\text{N/m}^2)\left(\frac{12.8 \times 10^{-3}\,\text{m}}{2}\right)^2\pi = 57{,}900\,\text{N}\,(13{,}000\,\text{lb}_f)$$

د) از نمودار، کرنش متناظر با تنش 345 MPa برابر با 0.06 بدست می آید.

$$\Delta l = \epsilon l_0 = (0.06)(250\,\text{mm}) = 15\,\text{mm}\,(0.6\,\text{in.})$$

چکش خواری (DUCTILITY)

- چکش خواری درجه تغییرشکل پلاستیک که ماده تا شکست تحمل می کند را اندازه گیری میکند.
- موادی که دارای منطقه پلاستیک نیستند یا منطقه پلاستیک اندکی هستند، ترد (brittle) نامیده می شوند.



روشهای اندازه گیری چکش خواری

1. درصد تغییر طول:

l_0 : طول اولیه
l_f : طول نهایی
$\%EL$: درصد تغییر طول

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

2. درصد کاهش سطح مقطع:

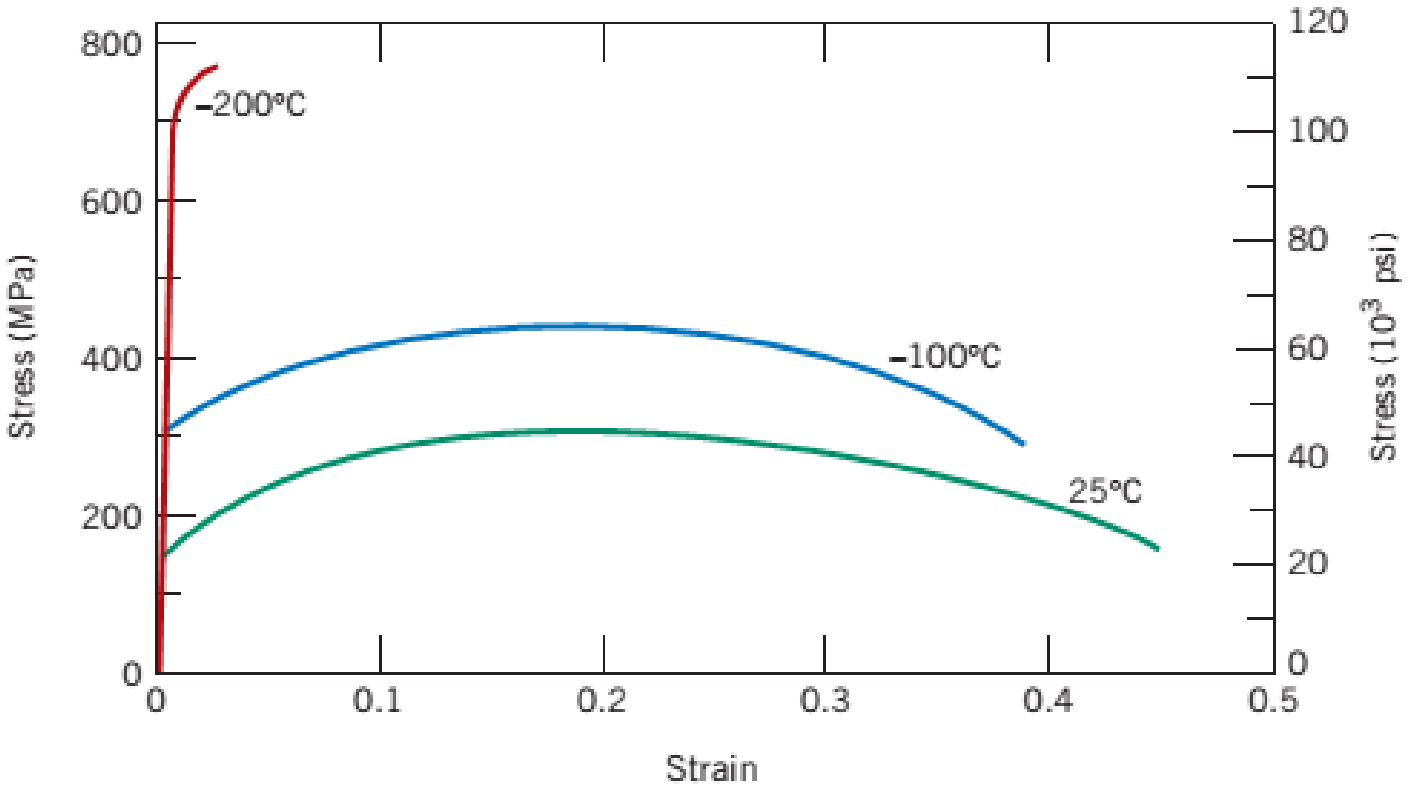
A_0 : سطح مقطع اولیه
A_f : سطح مقطع نهایی
$\%RA$: درصد کاهش سطح مقطع

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

خواص مکانیکی چند ماده شامل استحکام تسلیم، استحکام کششی و چکش خواری

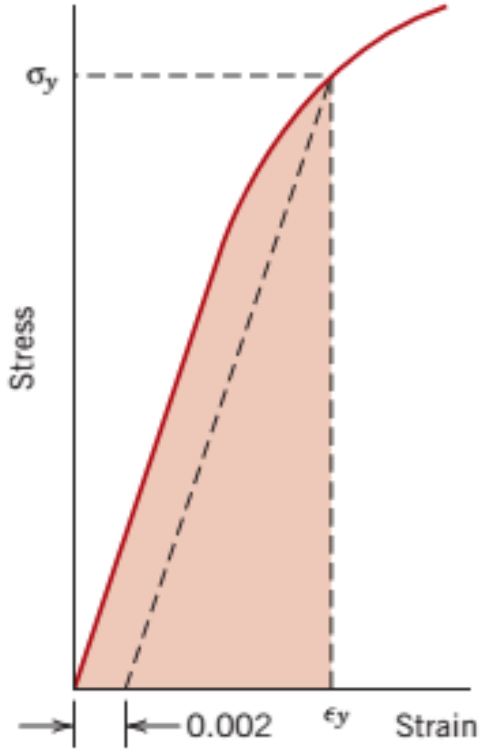
Metal Alloy	*Yield Strength MPa (ksi)*	*Tensile Strength MPa (ksi)*	*Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]*
Aluminum	35 (5)	90 (13)	40
Copper	69 (10)	200 (29)	45
Brass (70Cu–30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Iron	130 (19)	262 (38)	45
Nickel	138 (20)	480 (70)	40
Steel (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titanium	450 (65)	520 (75)	25
Molybdenum	565 (82)	655 (95)	35

تنش-کرنش مهندسی برای آهن در سه دمای مختلف



برجهندگی (RESILIENCE)

- برجهندگی قابلیت مواد برای جذب انرژی هنگام تغییرشکل الاستیک، و سپس بازیابی این انرژی هنگام باربرداری. خاصیت مربوط به آن را مدول جهندگی (Ur) می نامند، که انرژی کرنشی بر واحد حجم از نقطه بی باری تا نقطه تسلیم است.



$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon$$

- با فرض خطی بودن رابطه بی تنش و کرنش داریم:

$$U_r = \frac{1}{2}\sigma_y \varepsilon_y$$

σ_y استحکام تسلیم

ε_y کرنش تسلیم

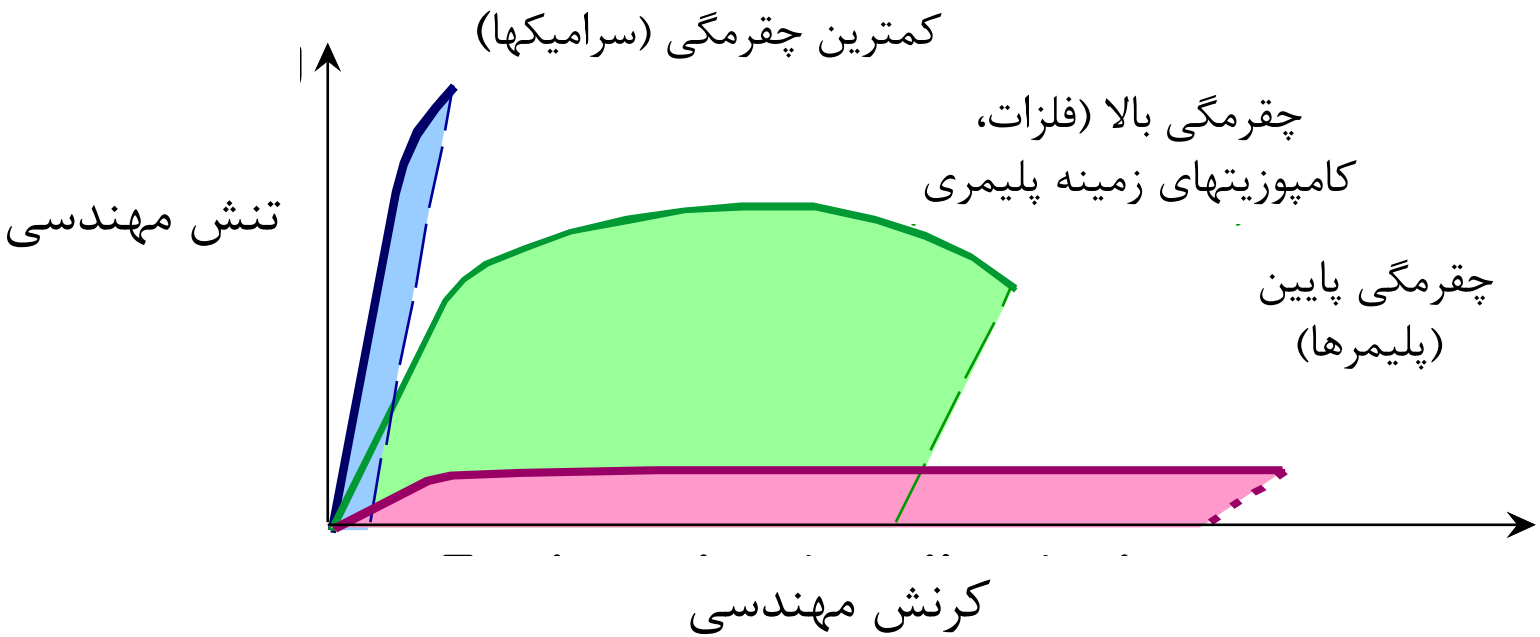
E مدول الاستیک

$$U_r = \frac{1}{2}\sigma_y \varepsilon_y = \frac{1}{2}\sigma_y \left(\frac{\sigma_y}{E}\right) = \frac{{\sigma_y}^2}{2E}$$

چقرمگی (TOUGHNESS)

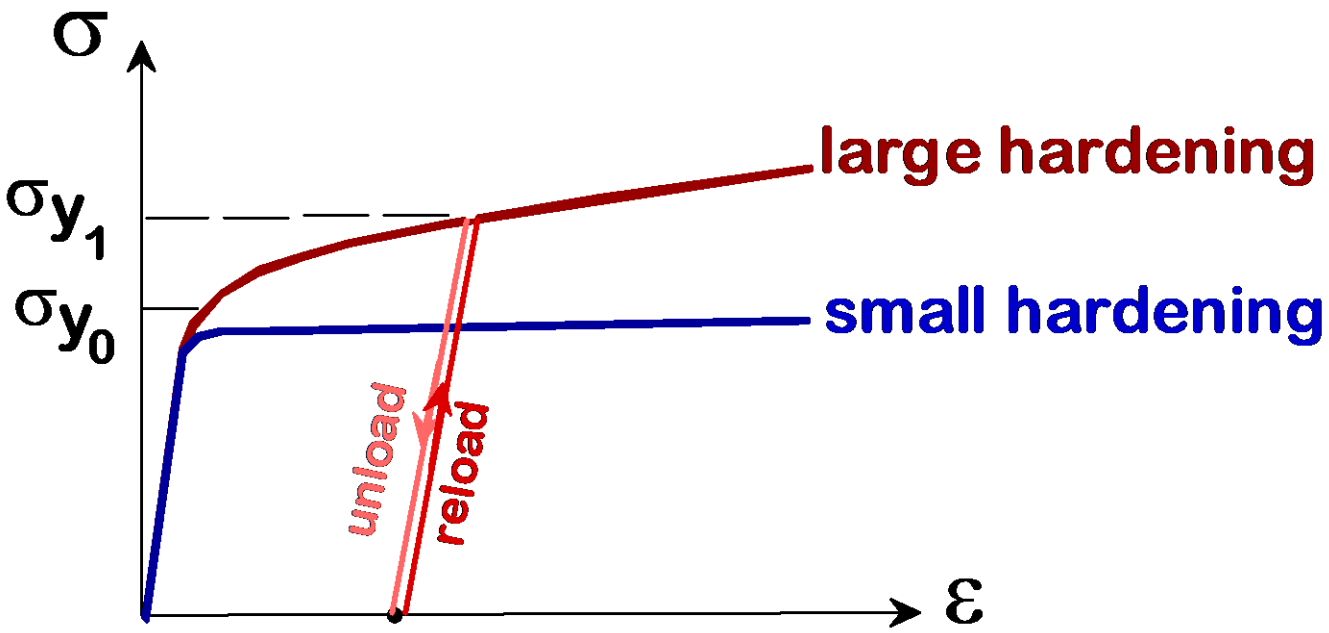
- چقرمگی دارای تعاریف متفاوتی است.
- چقرمگی میزان قابلیت مواد در جذب انرژی تا نقطه شکست است.
- در حالت دینامیکی (نرخ کرنش بالا) چقرمگی شکست توسط آزمون ضربه یا ایجاد ترک روی نمونه و تحت آزمون کشش یا خمش قراردادن آن بدست می آید.
- در حالت استاتیکی (نرخ کرنش پایین) چقرمگی را مساحت زیر نمودار تنش-کرنش در نظر میگیرند.

چقرمگی (TOUGHNESS)



کارسختی (HARDENING)

- افزایش استحکام تسلیم به دلیل تغییرشکل پلاستیک



تنش و کرنش واقعی

A_0 سطح مقطع اولیه

A_i سطح مقطع در هر لحظه

l_0 طول اولیه

l_i طول در هر لحظه

$\sigma_T = \frac{F}{A_i}$ **تنش واقعی**

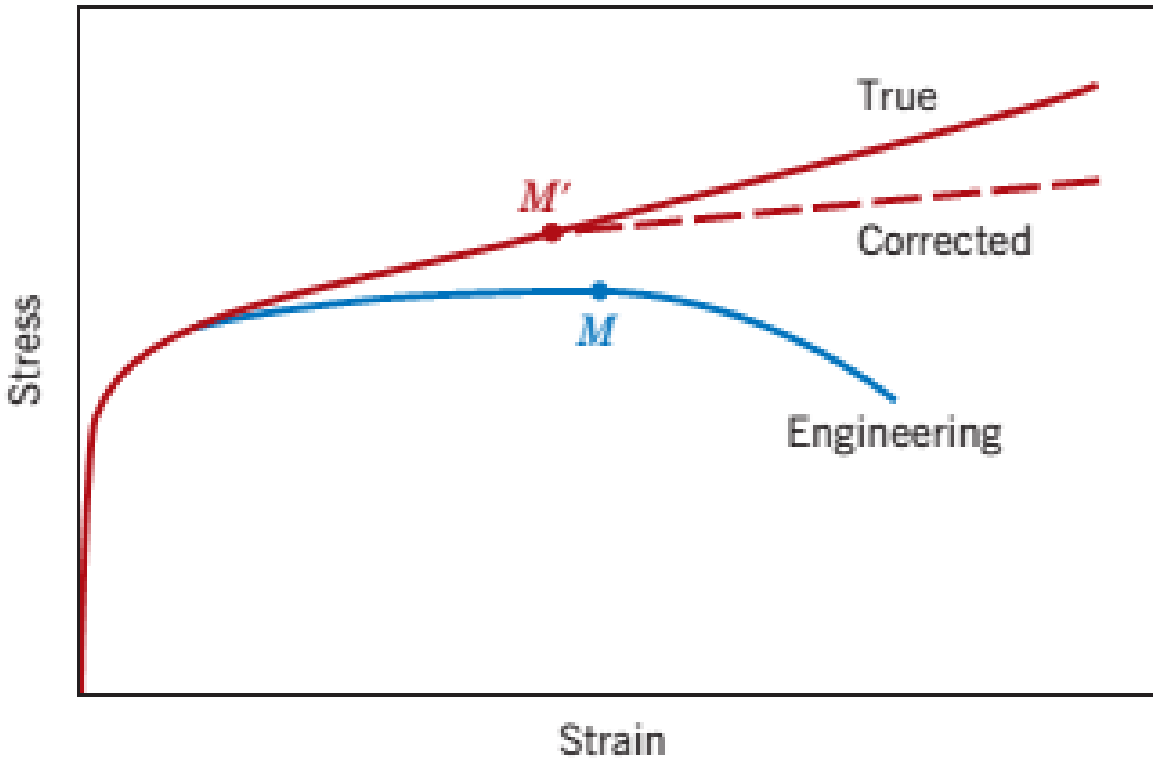
$\varepsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_0}$ **کرنش واقعی**

$A_i l_i = A_0 l_0$ **قانون بقاء حجم**

$\sigma_T = \sigma(1+\varepsilon)$ **رابطه بین تنش واقعی و تنش مهندسی**

$\varepsilon_T = \ln(1+\varepsilon)$ **رابطه بین کرنش واقعی و کرنش مهندسی**

نمودار تنش-کرنش واقعی و مهندسی



- رابطه بین تنش و کرنش در منطقه پلاستیک توسط روابط مختلفی بیان می شود. یکی از پرکاربردترین آنها رابطه توانی است که به صورت زیر بیان می شود:

$$\sigma_T = K\varepsilon_T^n$$

K: ضریب کارسختی (Mpa)

n: توان کارسختی

مقادیر n و k برای آلیاژهای مختلف

Table 6.4 **Tabulation of *n* and *K* Values (Equation 6.19) for Several Alloys**

		K	
Material	***n***	***MPa***	***psi***
Low-carbon steel (annealed)	0.21	600	87,000
4340 steel alloy (tempered @ 315°C)	0.12	2650	385,000
304 stainless steel (annealed)	0.44	1400	205,000
Copper (annealed)	0.44	530	76,500
Naval brass (annealed)	0.21	585	85,000
2024 aluminum alloy (heat treated—T3)	0.17	780	113,000
AZ-31B magnesium alloy (annealed)	0.16	450	66,000

مثال) یک نمونه استوانه ای فولادی که دارای قطر 12.8 mm است تحت آزمون کشش قرار گرفته تا گسیخته شود. در آزمون میزان استحکام شکست (σ_f) ۴۶۰ مگاپاسکال بدست آمده است. اگر قطر سطح مقطع هنگام شکست 10.7 mm باشد تعیین کنید:

الف) چکش خواری به روش کاهش سطح مقطع

ب) تنش واقعی در نقطه شکست.

$$\%RA = \frac{\left(\frac{12.8\text{ mm}}{2}\right)^2\pi - \left(\frac{10.7\text{ mm}}{2}\right)^2\pi}{\left(\frac{12.8\text{ mm}}{2}\right)^2\pi} \times 100$$

$$= \frac{128.7\text{ mm}^2 - 89.9\text{ mm}^2}{128.7\text{ mm}^2} \times 100 = 30\%$$

ب)

$$F = \sigma_f A_0 = (460 \times 10^6\text{ N/m}^2)(128.7\text{ mm}^2)\left(\frac{1\text{ m}^2}{10^6\text{ mm}^2}\right) = 59{,}200\text{ N}$$

$$\sigma_T = \frac{F}{A_f} = \frac{59{,}200\text{ N}}{(89.9\text{ mm}^2)\left(\frac{1\text{ m}^2}{10^6\text{ mm}^2}\right)}$$

$$= 6.6 \times 10^8\text{ N/m}^2 = 660\text{ MPa (95,700 psi)}$$

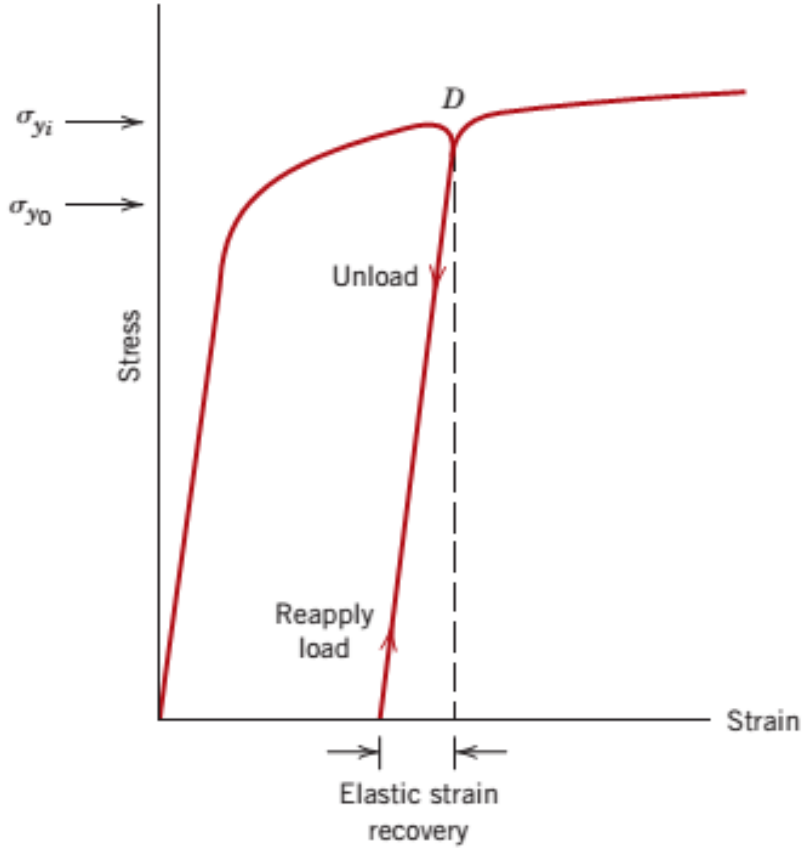
مثال) توان کارسختی (n) را برای یک آلیاژ که در تنش واقعی 415 MPa کرنش واقعی 0.1 تولید میکند محاسبه کنید. فرض کنید k=1035 Mpa

$$n = \frac{\log \sigma_T - \log K}{\log \epsilon_T}$$

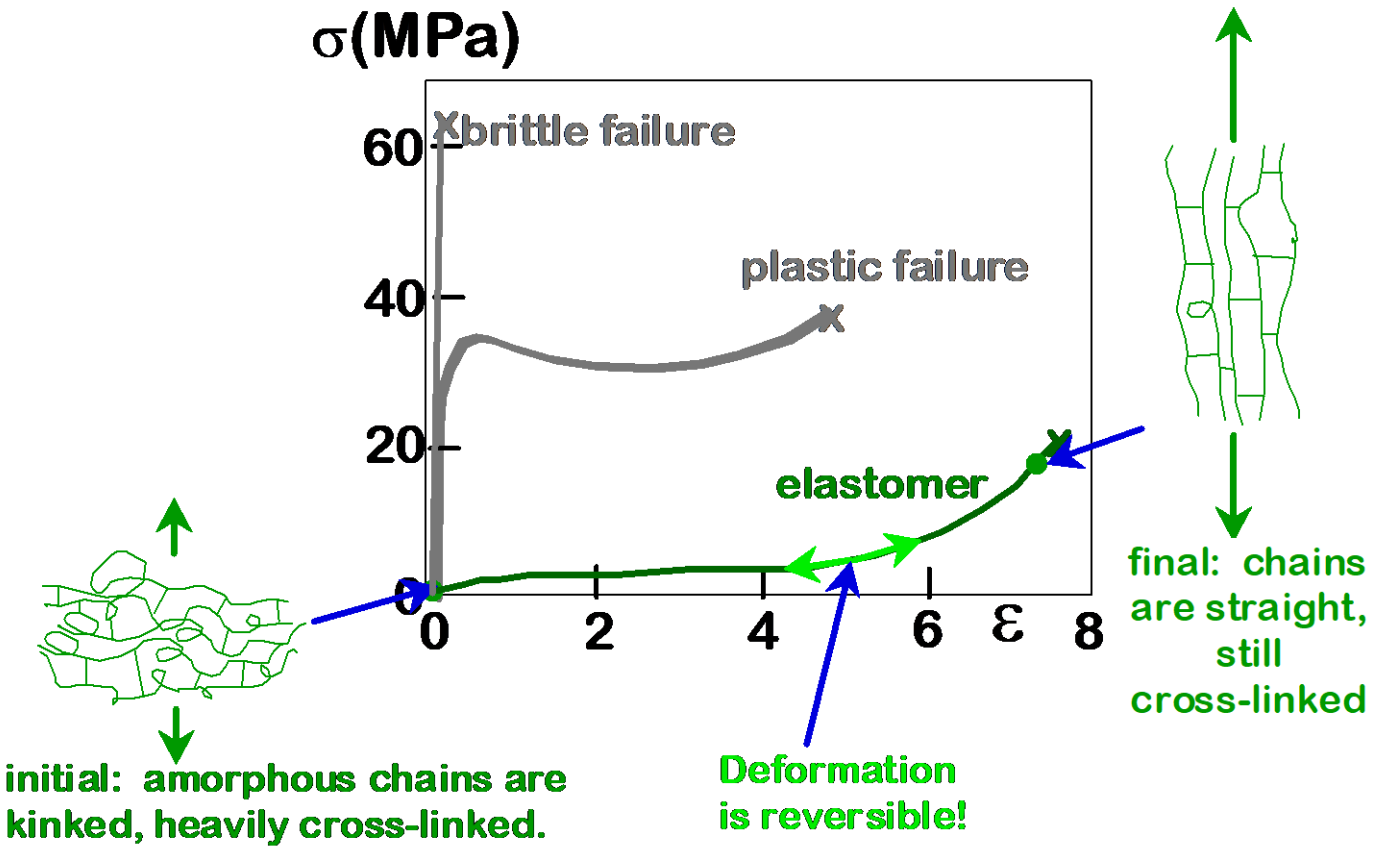
$$= \frac{\log(415\ \text{MPa}) - \log(1035\ \text{MPa})}{\log(0.1)} = 0.40$$

بازیابی الاستیک بعد از تغییرشکل پلاستیک

- هنگام باربرداری نمونه در آزمون کشش، مقداری از تغییر شکل بصورت کرنش الاستیک برگشت می شود.

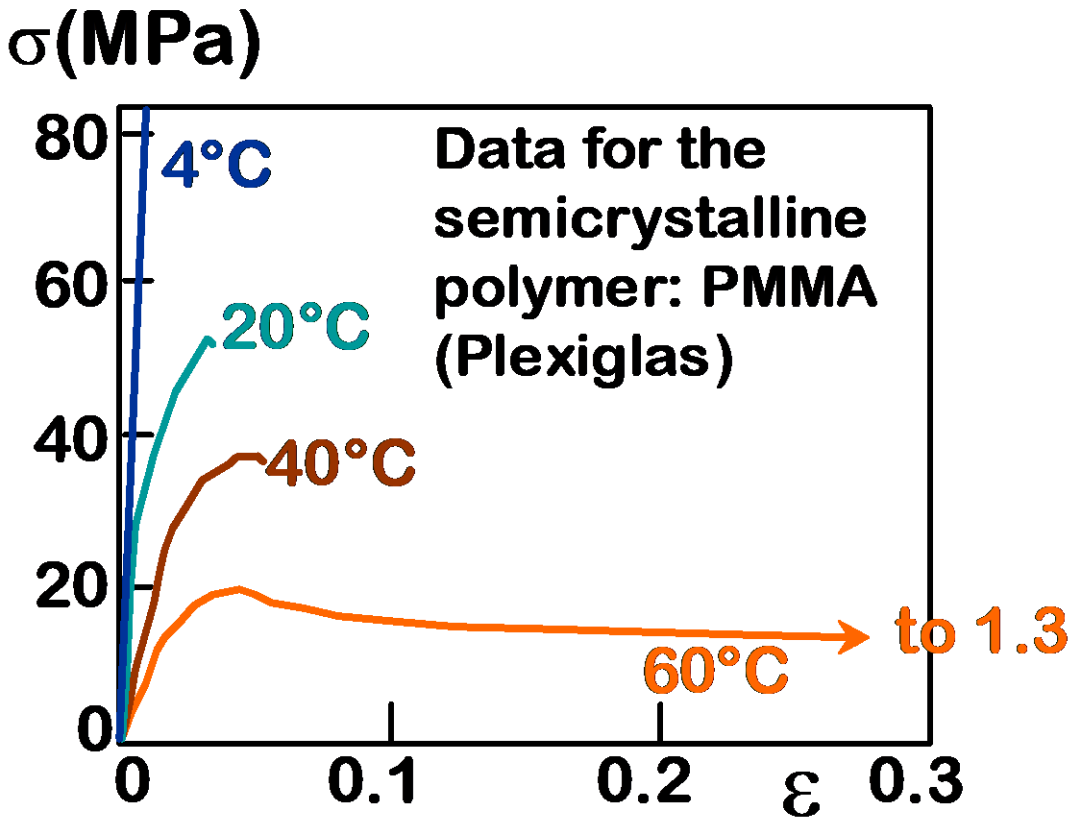


رفتار الاستومرها در آزمون کشش



- در مقایسه با رفتار دیگر مواد پلیمری
  - **رفتار ترد:** مخصوص پلیمرهای با زنجیره های همراستا و دارای پیوندهای عرضی
  - **رفتار پلاستیک:** مخصوص پلیمرهای نیمه بلورین

دما و نرخ کرنش: ترموپلاستیکها (گرمانرم ها)



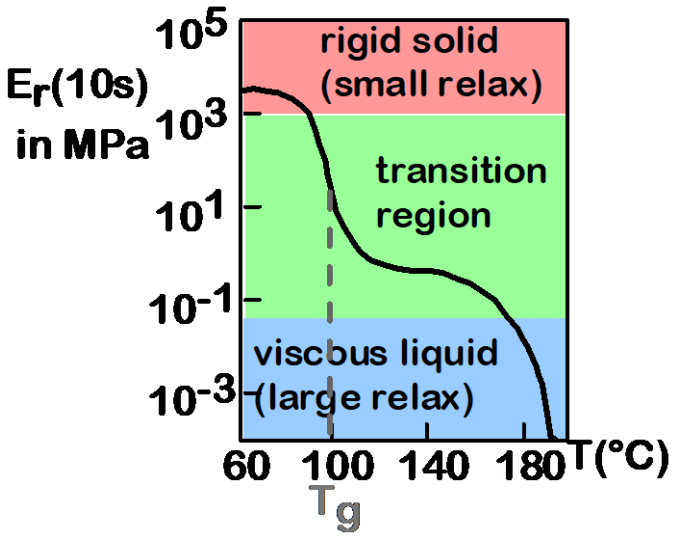
- **کاهش دما:**
  - -- افزایش **E**
  - -- افزایش **TS**
  - -- کاهش **%EL**

- **افزایش نرخ کرنش:**
  - -- همان اثرات کاهش دما را دارد.

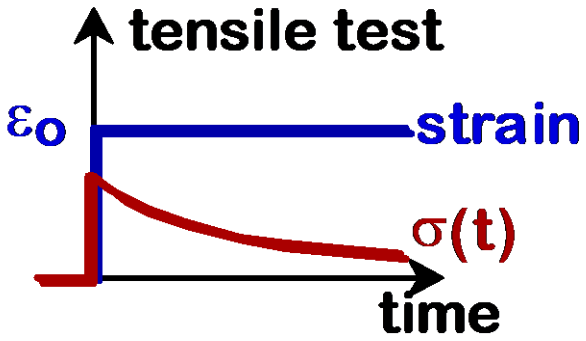
تغییرشکل وابسته به زمان

- آزمون رهایش تنش:

-- اعمال کرنش ε_o و نگهداری در آن
-- مشاهده کاهش در تنش با افزایش زمان



افت قابل توجه Er وقتی **T > Tg**
(پلی استایرن بی شکل)



- مقدار Tg(C) نمونه های مختلف

PE (low Mw)	-110
PE (high Mw)	- 90
PVC	+ 87
PS	+100
PC	+150

- مدول رهایش

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_o}$$

سختی (HARDNESS)

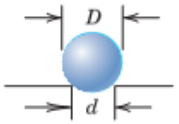
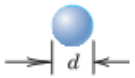
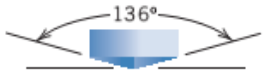
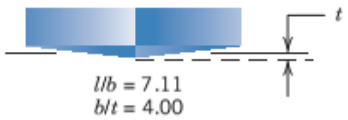
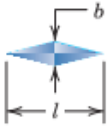
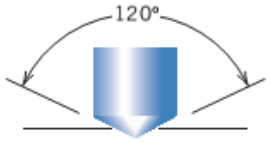
- سختی عبارت است از مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی (مانند تورفتگی کوچک یا خراش)
- برای اندازه گیری سختی فلزات، یک فرورونده روی سطح نمونه قرار داده شده و روی سطح نمونه فشار داده می شود. میزان نفوذ فرورونده اندازه گیری شده و میزان سختی بدست می آید.

روشهای تعیین سختی برای فلزات

1. روش برینل (Brinell)
2. روش ویکرز (Vickers)
3. روش راکول (Rockwell)
4. روش نوپ (Knoop)

روشهای مختلف اندازه گیری سختی سطحی

Table 6.5 Hardness-Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation: Side View	Shape of Indentation: Top View	Load	Formula for Hardness Number[a]
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$\mathrm{HB} = \dfrac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$\mathrm{HV} = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$\mathrm{HK} = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone; $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres			60 kg, 100 kg, 150 kg: Rockwell 15 kg, 30 kg, 45 kg: Superficial Rockwell	

[a] For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D, d, d_1, and l are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

انواع سختی راکول

Table 6.6a Rockwell Hardness Scales

Scale Symbol	*Indenter*	*Major Load (kg)*
A	Diamond	60
B	$\frac{1}{16}$-in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	$\frac{1}{8}$-in. ball	100
F	$\frac{1}{16}$-in. ball	60
G	$\frac{1}{16}$-in. ball	150
H	$\frac{1}{8}$-in. ball	60
K	$\frac{1}{8}$-in. ball	150

رابطه بین سختی و استحکام کششی

$$TS(MPa) = 3.45 \times HB$$

$$TS(psi) = 500 \times HB$$

نکته مهم: روابط فوق برای فولاد و چدن صادق است.