

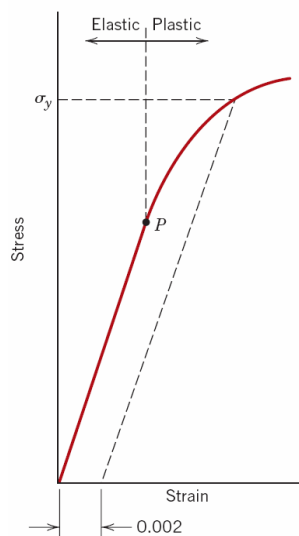
# Bevezetés az anyagtudományba

## VII. előadás

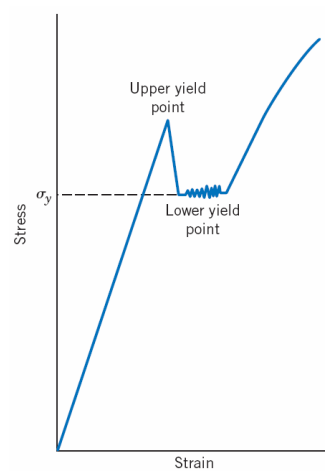
2010. március 18.

## II. Képlékeny alakváltozás

Kétféle viselkedés



fémeknél tipikus

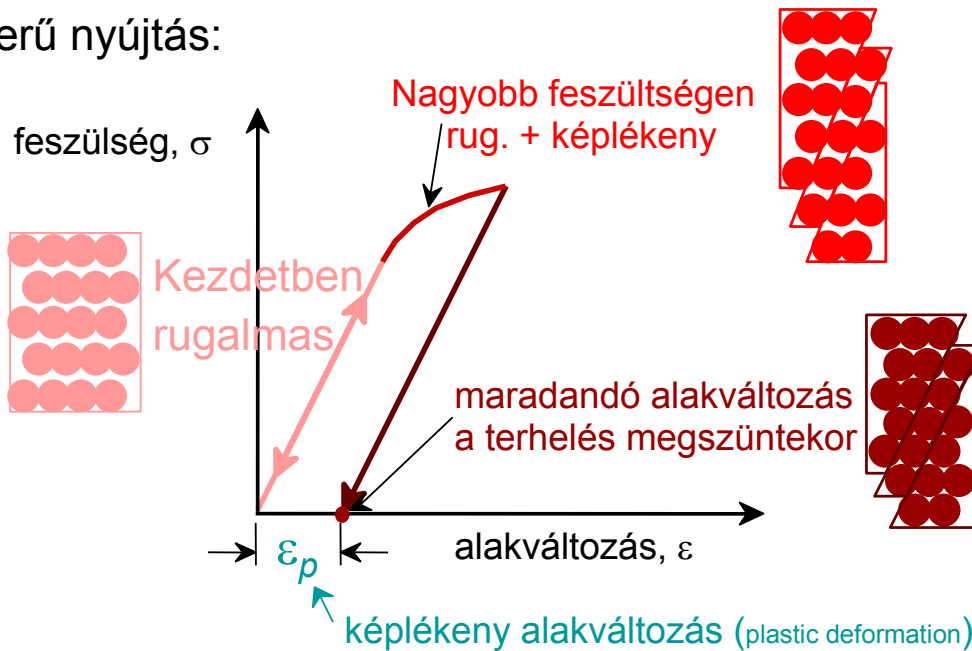


atipikus  
(egyes acélok, nemfémek)

# Mikroszkópikus magyarázat

(alacsony hőmérsékleten, kb.  $T < T_{op}/3$ )

- Egyszerű nyújtás:



Képlékeny alakváltozás kompresszív és nyírási feszültségek esetén is létrejön. De kompresszív feszültség esetén nincs befűződés, s így „szakítószilárdság” sem és az anyag törése is másféle.

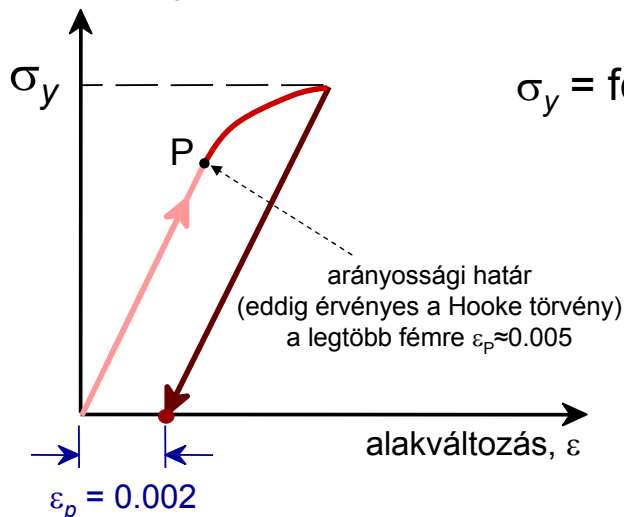
VII/3

## Folyáserősség, $\sigma_y$

- Az a feszültség, melynél **észrevehető** mértékű rugalmas deformáció következik be.

megjegyzés szerint, ha  $\varepsilon_p = 0.002$

nyújtó feszültség,  $\sigma$



$\sigma_y =$  folyáserősség (*yield strength*)

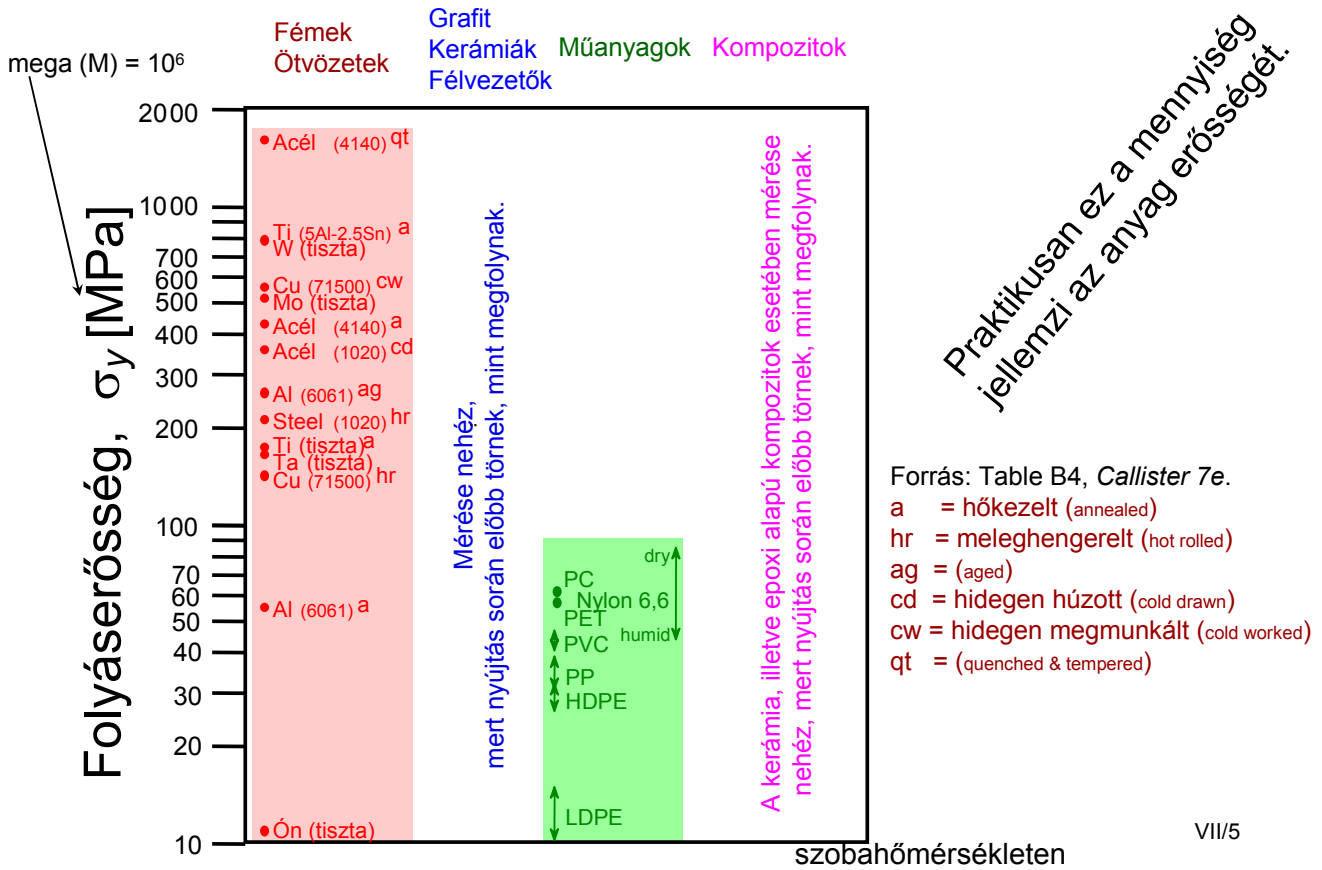
Megjegyzés: egy 50 mm hosszú minta esetén

$$\varepsilon_p = 0.002 = \Delta z / z$$

$$\therefore \Delta z = 0.1 \text{ mm}$$

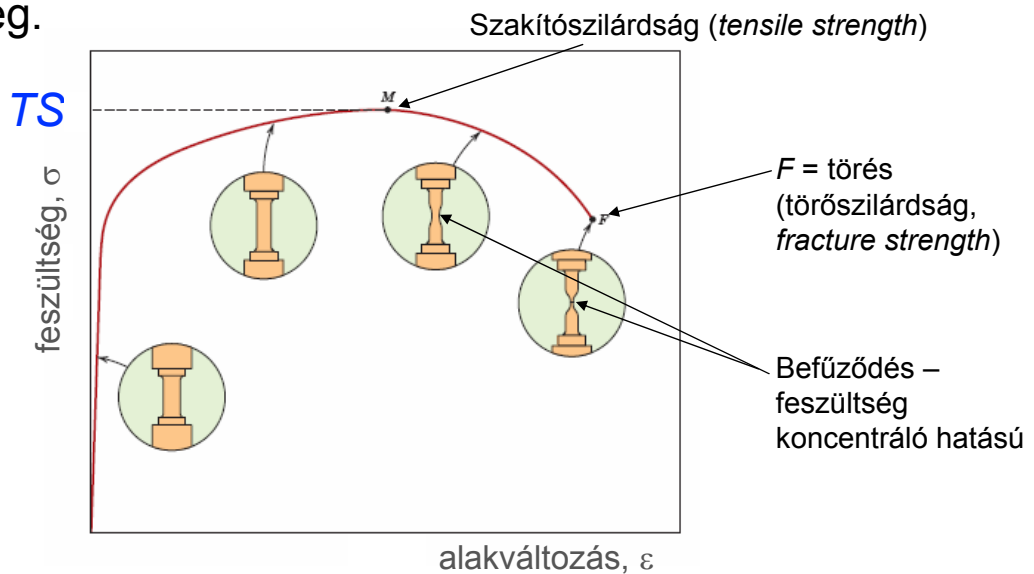
VII/4

# Folyáserősség: összehasonlítás



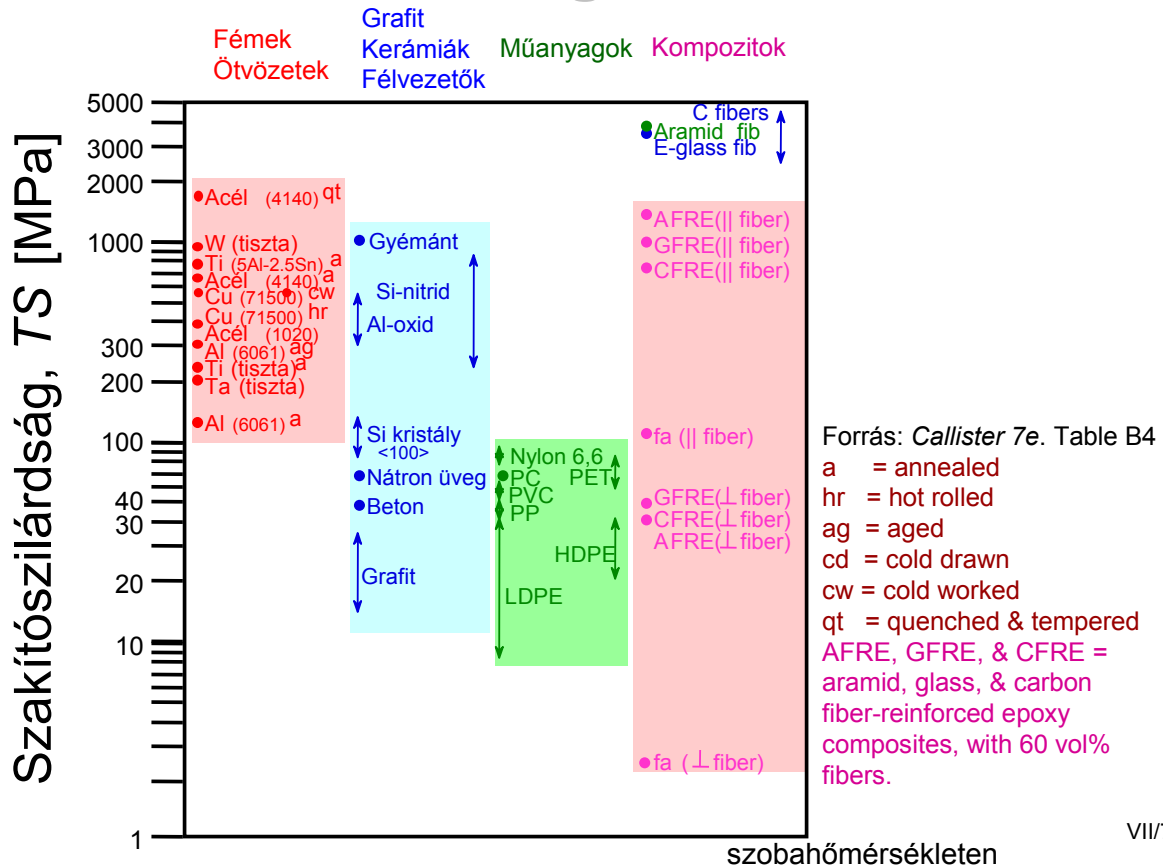
## Szakítószilárdság, $TS$

- A feszültség-alakváltozás görbén megjelenő maximális feszültség.



- **Fémeknél** egybeesik az észrevehető befűződés kezdetével.
- **Műanyagoknál** egybeesik a polimer láncok rendeződésével és szakadásával.

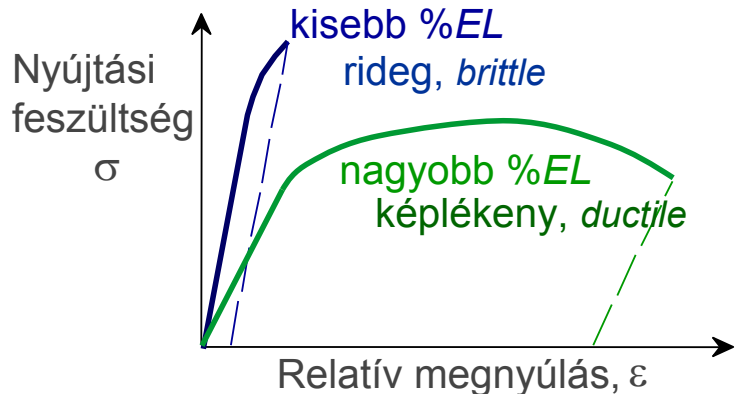
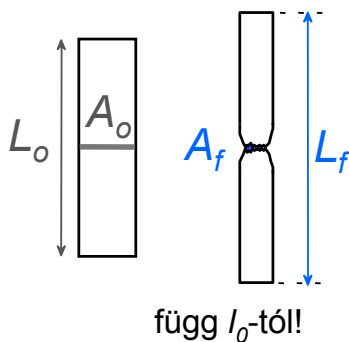
# Szakítószilárdság: összehasonlítás



## Alakíthatóság, duktilitás

- A szakadáskor visszamaradó képlékeny alakváltozás:

$$\%EL = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$



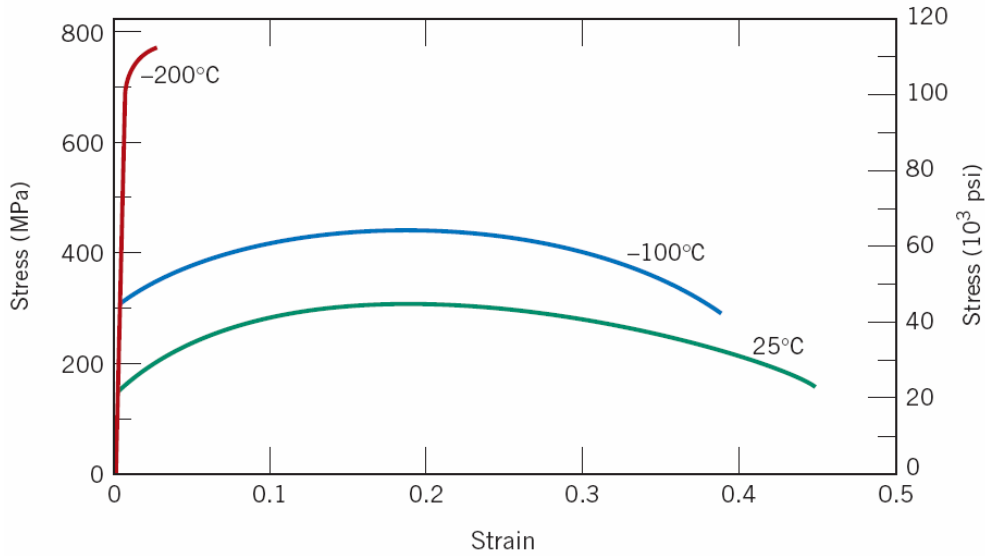
A legtöbb fém szobahőmérsékleten képlékeny és csak alacsonyabb hőmérsékleten válik rideggé.

- Szokásos keresztmetszetre is vonatkoztatni:

$$\%RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

nem függ  $l_0$ -tól és  $A_0$ -tól

# Hőmérséklet függés



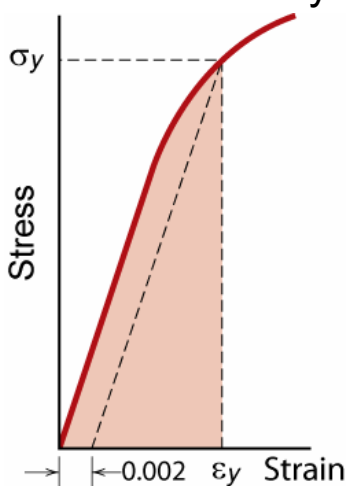
A hőmérséklet növelésekor a fémek

- Young modulusa csökken
- folyáserőssége csökken
- szalítószilárdsága csökken
- duktilitása viszont nő

VII/9

## Rugalmasság (resilience), $U_r$

- Az anyag energiatároló képességét jellemzi.
  - Az energia leginkább az alakváltozás rugalmas tartományában tárolható (a terhelés megszűnésekor visszanyerhető).



$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

Lineáris feszültség-deformáció viselkedést feltételezve:

$$U_r \approx \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

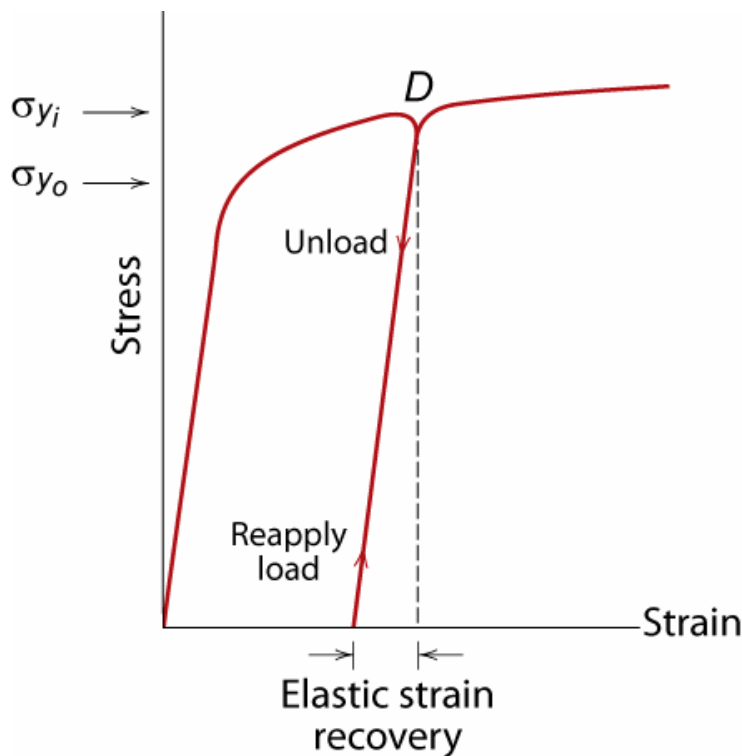
$$[U_r] = \frac{J}{m^3}$$

(rugók!)

fajlagos elasztikus deformációs munka

VII/10

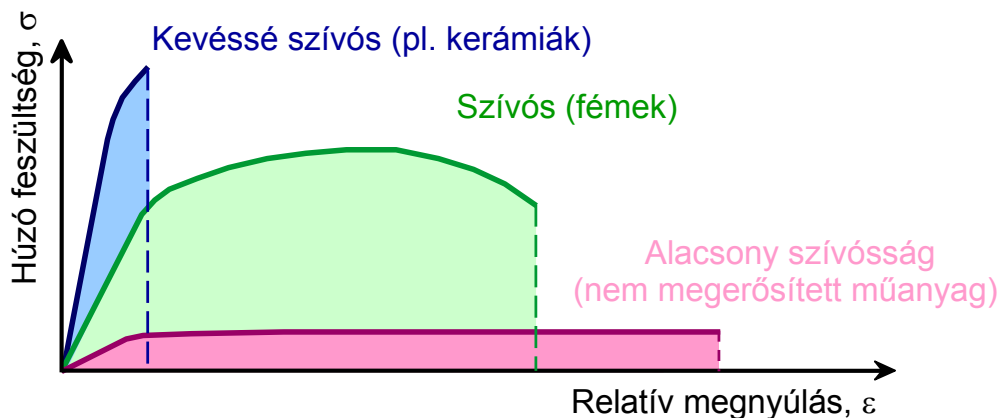
# Rugalmas regeneráció



VII/11

# Szívósság (toughness)

- Az anyag azon tulajdonságát jellemzi, hogy töréséig mennyi energiát képes elnyelni.
- Sztatikus esetben a feszültség-deformáció görbe alatti területtel egyezik meg.
- A szívós anyag erős és alakítható.



Rideg törés: rugalmas energia

Képlékeny törés: rugalmas + képlékeny energia

VII/12

# Valós feszültség és alakváltozás

Valódi, vagy pillanatnyi feszültség

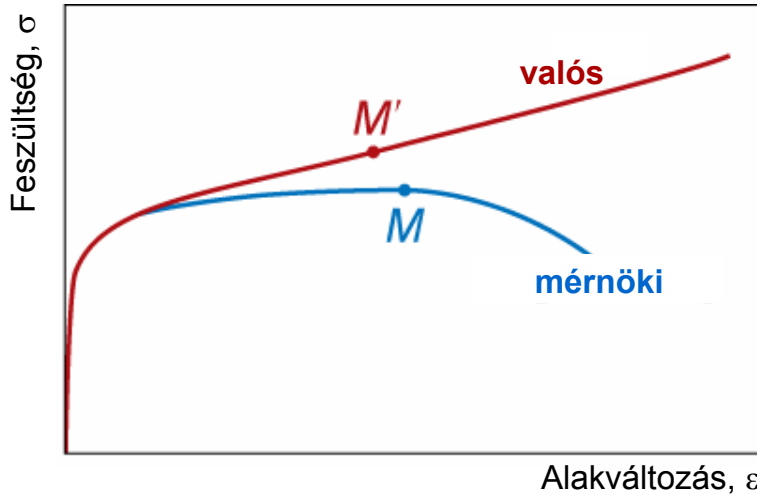
$$\sigma_T = F/A$$

Valós deformáció

$$\varepsilon_T = \ln(\ell_i/\ell_o)$$

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon)$$



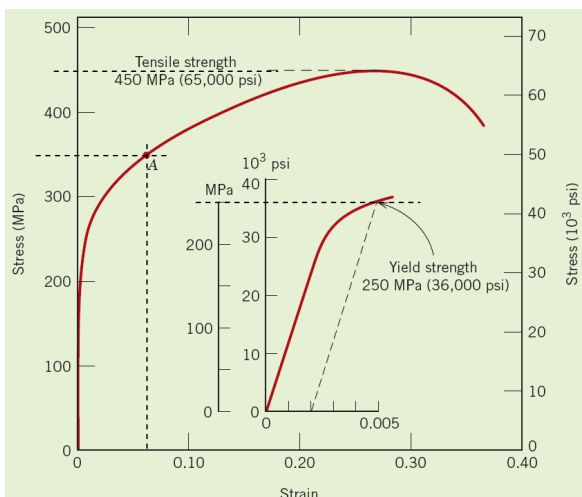
Ha a térfogatváltozás elhanyagolható.

VII/13

## 55. feladat

A bronz feszültség-deformáció görbéjének ismeretében határozza meg

- a rugalmassági együtthatóját;
- a (0,2% maradandó relatív alakváltozásra vonatkozó) folyásérősség nagyságát,
- annak a maximális tehernek a súlyát, amelyet egy terheletlenül 12,8mm átmérőjű henger alakú minta elbír;
- hogyan változik meg a hosszúsága egy eredetileg 250 mm hosszú mintának?



a)  $E = 93.8 \text{ GPa}$

b)  $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$

c)  $TS = 450 \text{ MPa}$

$$F = TS \cdot A_0 = 57900 \text{ N}$$

d) Az A pont koordinátája alapján

$$\varepsilon = 0.06$$

$$\Delta l = 15 \text{ mm}$$

VII/14

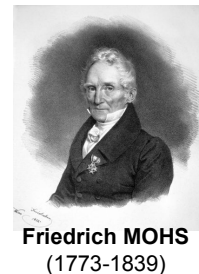
# Keménység (hardness)

- Az anyag képlékeny (maradandó) alakváltoztatás elleni **lokális** ellenállóképességét jellemzi.
- A nagy keménységű (vagy kemény) anyag:
  - jobban ellenáll a képlékeny alakváltoztatásnak és a kompressziós törésnek
  - kopásállóbb.




Az anyagtechnológiában három féle módon szokás mérni:  
 karcolásos elven ( $\rightarrow$  *scratch hardness*)  
 benyomódás elven ( $\rightarrow$  *indentation hardness*) és  
 visszapattanás elvén ( $\rightarrow$  *rebound hardness*)

VII/15

## A Mohs-féle keménységi skála



Mohs-féle keménység

	<b>1</b>	<b>Talkum (<math>Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2</math>)</b>	<b>1</b>
	<b>2</b>	<b>Gipsz (<math>CaSO_4 \cdot 2H_2O</math>)</b>	<b>3</b>
	<b>3</b>	<b>Kalcit (<math>CaCO_3</math>)</b>	<b>9</b>
	<b>4</b>	<b>Fluorit (<math>CaF_2</math>)</b>	<b>21</b>
	<b>5</b>	<b>Apatit (<math>Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)</math>)</b>	<b>48</b>
	<b>6</b>	<b>Földpát (<math>KAlSi_3O_8</math>)</b>	<b>72</b>
	<b>7</b>	<b>Kvarc (<math>SiO_2</math>)</b>	<b>100</b>
	<b>8</b>	<b>Topáz (<math>Al_2SiO_4(OH, F)_2</math>)</b>	<b>200</b>
	<b>9</b>	<b>Korund (<math>Al_2O_3</math>)</b>	<b>400</b>
	<b>10</b>	<b>Gyémánt (C)</b>	<b>1600</b>

karcoláson alapuló *nem arányos* skála

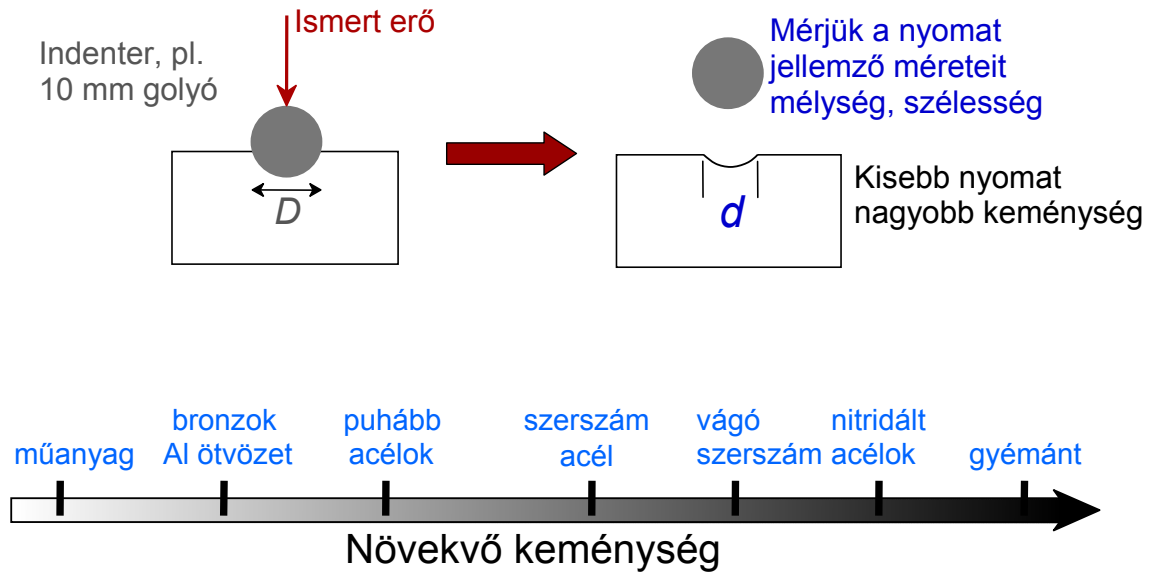
abszolút keménység

VII/16



# Keménység

Egy kvantitatívabb, standardizálható definíció



VII/17

## Keménység mérési módszerek

Hardness Testing Techniques				[P]=kg	[D]=[d]=[d <sub>i</sub> ]=[l]=mm
Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diamond cone</li> <li>1/16, 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> </ul> Rockwell	$P_{\text{minor}}=10\text{kg}$
				<ul style="list-style-type: none"> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul> Superficial Rockwell	$P_{\text{minor}}=3\text{kg}$
					$HR=\Delta d=d_{\text{major}}-d_{\text{minor}}$

<sup>a</sup> For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D, d, d<sub>1</sub>, 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.

VII/18

# A keménység mérése

- **Rockwell (felszíni Rockwell)**

- Nincs jelentősebb roncsolódás
- Minor terhelés 10 kg (3kg)
- Major terhelés 60 (A), 100 (B) vagy 150 (C) kg (15, 30, 45kg)
  - A = gyémánt, B = 1/16" golyó, C = gyémánt, stb.
- A HR skála kb. 130-ig tart, de csak a 20-100 tartomá megbízható. Ezen kívül skálát kell váltani.

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

- **HB = Brinell keménység**

- Terhelés 500-3000kg
- HB a terheléstől és a nyomat méretétől is függ

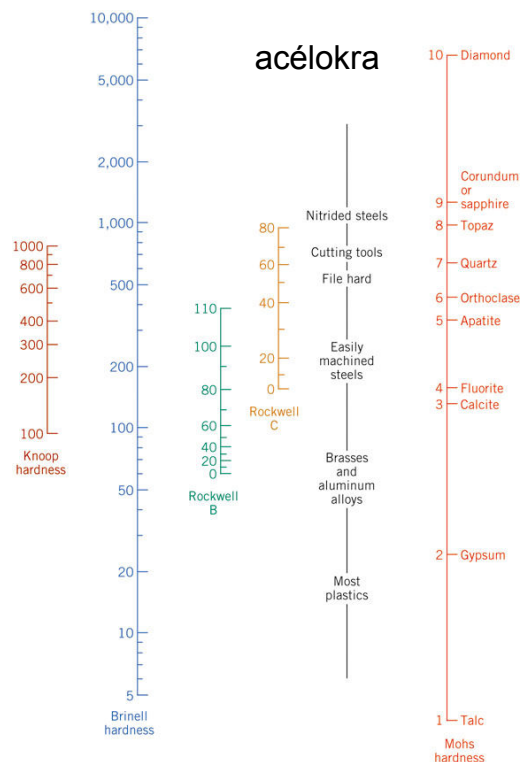
*Figyelem!* A minta vastagsága min. 10x a nyomat mélysége legyen, a nyomatok középpontjai pedig min. 3x nyomatátmérő távolságra legyenek!

VII/19

## Keménység konverzió



Rockwell keménység mérő  
Instron Co. Wilson Instruments Division

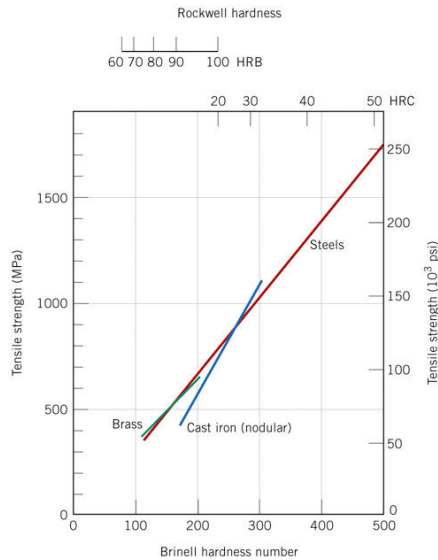


A konverzió anyagfüggő!

VII/20

# A szakítószilárdság és a keménység kapcsolata

Mindkét mennyiség az anyag képlékeny alakváltozás elleni ellenállóképességét jellemzi. Arányosságuk nem meglepő.



A legtöbb acélra:

$$TS(MPa) = 3.45 * HB$$

VII/21

## Diszlokációk és keményedési folyamatok

- A képlékeny alakváltozás maradandó alakváltozás. Az anyag ellenállóképességét e téren *erőssége*, illetve *keménysege* írja le.
- Az elméleti számítások a tökéletes kristályok mechanikai erősségét a tapasztaltaknál többször nagyobboknak becsülték. Az 1930-as években merült fel a gondolat, hogy az eltérés magyarázata a diszlokációkban rejlik. 1950-ig kellett várni, míg EM-val mód nyílt a diszlokációk létezésének kísérleti igazolására.
- Kristályos anyagokban a képlékeny deformáció legtöbbször a diszlokációk mozgásával valósul meg (de történhet még ikerképződéssel (hexagonális fémeknél jellemző), diffúziós kúszással, szemcsehatár elcsúszással, szemcserotációval stb.).
- A folyamatok megértése révén képesek leszünk fémek keménységét befolyásolni.

VII/22

# Anyagcsaládok

• **Fémek:** A diszlokációk mozgékonyak

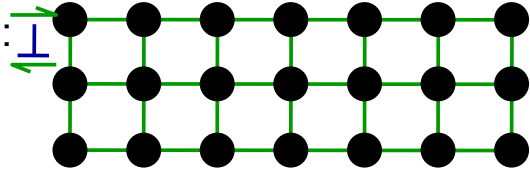
- nem irányított kötések
- tömör atomi síkok és irányok

→ **csúszás.**



• **Kovalens kerámiák** (pl. Si, gyémánt):  
Nehéz mozgás.

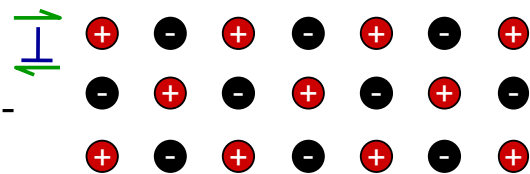
- irányított, erős kötések



• **Ionos kerámiák** (pl. NaCl):

Nehéz mozgás.

- nem tudják elkerülni a szomszédok taszítását.

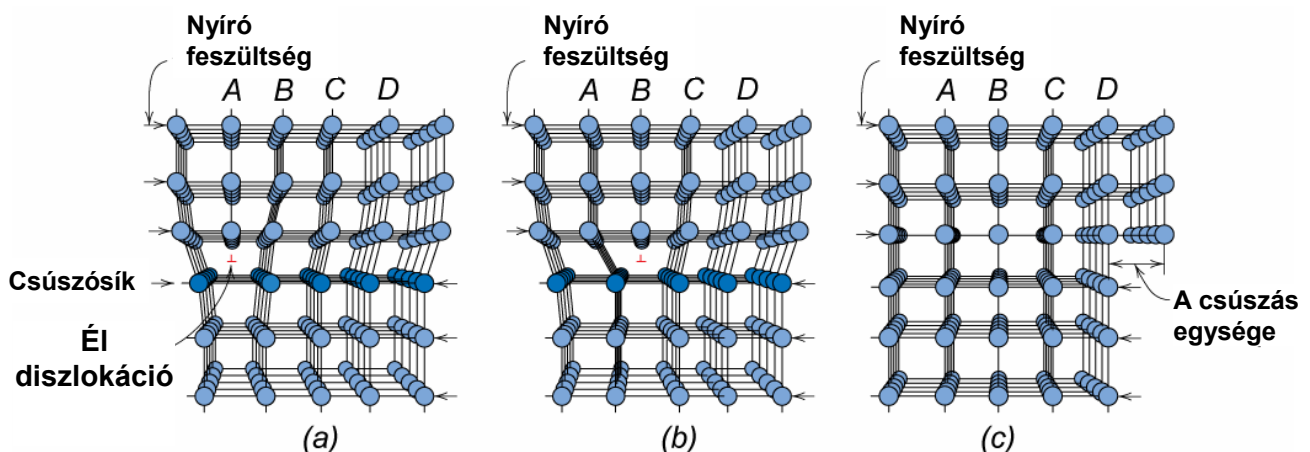


VII/23

## A diszlokációk mozgása 1/3

Diszlokációk és képlékeny deformáció

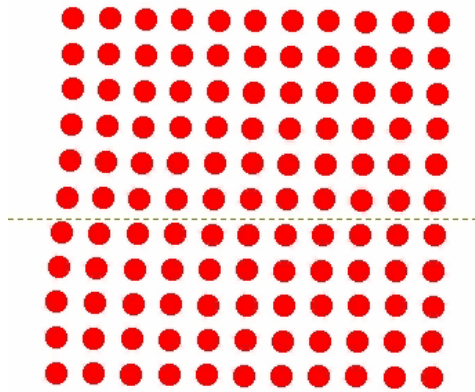
- Köbös és hexagonális fémek – képlékeny deformáció **képlékeny nyírás vagy csúszás** ahol egymás melletti atomsíkok csúsznak el diszlokációk mentén.



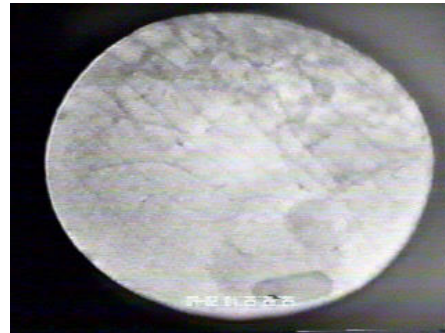
Ha a diszlokáció nem mozog, akkor deformáció sem történik!

VII/24

# Diszlokációk mozgása 2/3



Sematikus modellen



Ferrites acélokban a hőmérséklet emelésekor.  
TEM felvétel

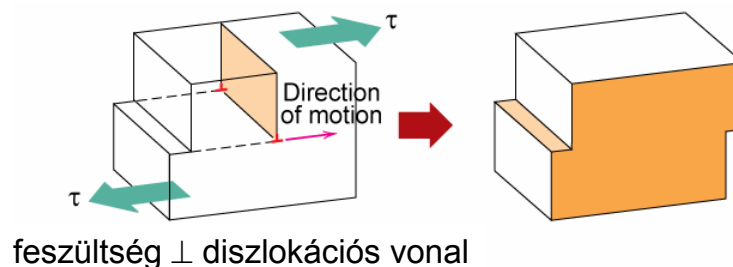
<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/dislocations.movies.html>

VII/25

# A diszlokációk mozgása 3/3

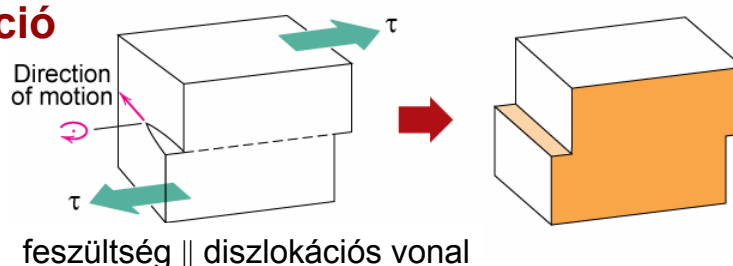
- A diszlokáció a **csúszósík** mentén a diszlokációs vonalra merőleges **csúszási irányban** mozog.
- A csúszási irány megegyezik a **Burgers vektor** irányával.

## Él diszlokáció



feszültség  $\perp$  diszlokációs vonal

## Csavar diszlokáció



feszültség  $\parallel$  diszlokációs vonal

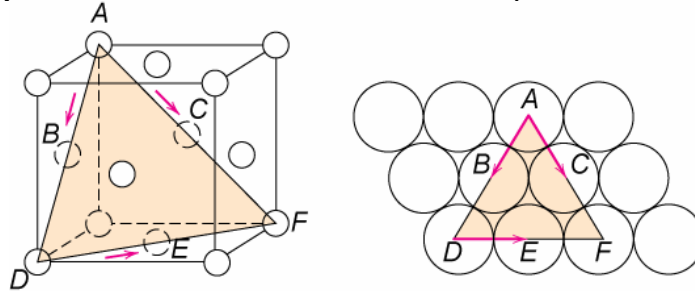
VII/26

# A csúszási rendszer 1/2

## Alkotói

- **Csúszósík** - a csúszást legkönnyebben lehetővé tevő, a legnagyobb síkbeli atomsűrűséget mutató kristálytani síkok
- **Csúszási irány** - a mozgás iránya - legnagyobb lineáris atomsűrűségű kristálytani irányok

Egy példa (lapcentrált köbös rács, FCC)



A csúszás a szoros illeszkedést mutató  $\{111\}$  síkok  $\langle 110 \rangle$  kristálytani irányai mentén következik be.

VII/27

# A csúszási rendszer 2/2

A csúszási rendszert a lehetséges csúszási irányok alkotják, melyből

$$N_{\text{csúszósík}} \times N_{\text{csúszási irány}} \text{ db van.}$$

A főbb kristályrendszerek jellemzői

Fémek	Csúszósík	Csúszási irány	Csúszási rendszer
	<b>Lapcentrált köbös (FCC)</b>		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	$\{111\}$	$\langle \bar{1}10 \rangle$	12
	<b>Tércentrált köbös (BCC)</b>		
$\alpha$ -Fe, W, Mo	$\{110\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
$\alpha$ -Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
	<b>Hexagonális (HCP)</b>		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	$\{0001\}$	$\langle \bar{1}1\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle \bar{1}1\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle \bar{1}1\bar{2}0 \rangle$	6

VII/28