

Bevezetés az anyagtudományba

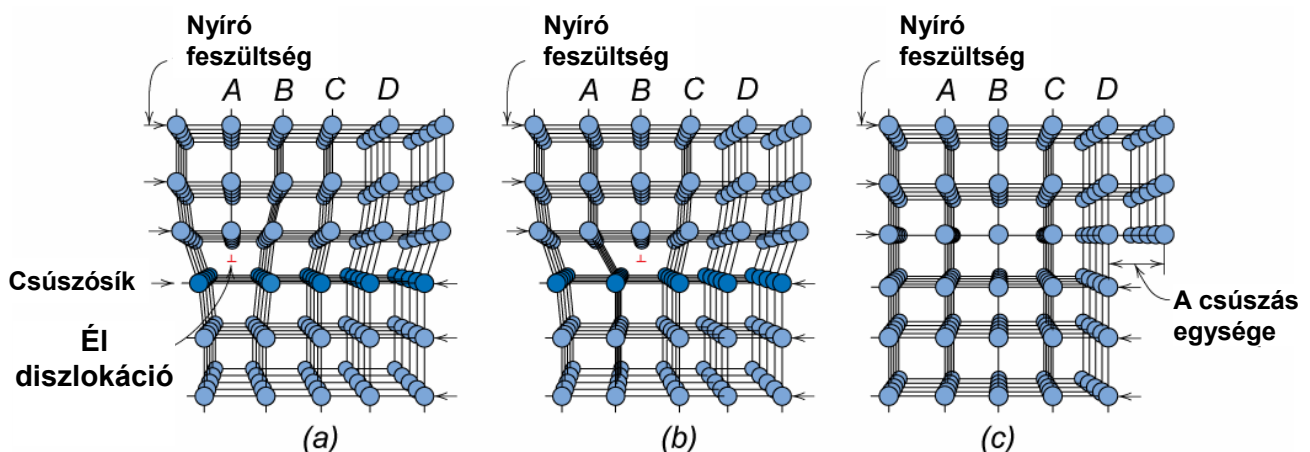
VIII. előadás

2010. március 25.

A diszlokációk mozgása 1/2

Diszlokációk és képlékeny deformáció

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

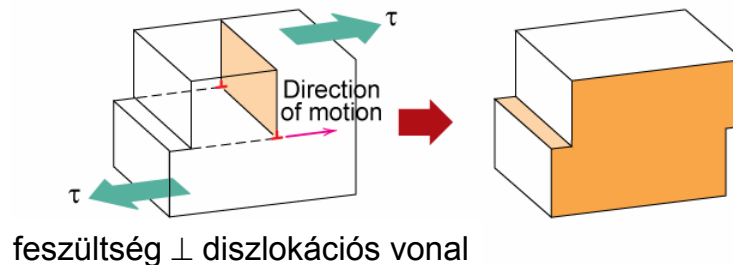


Ha a diszlokáció nem mozog, akkor deformáció sem történik!

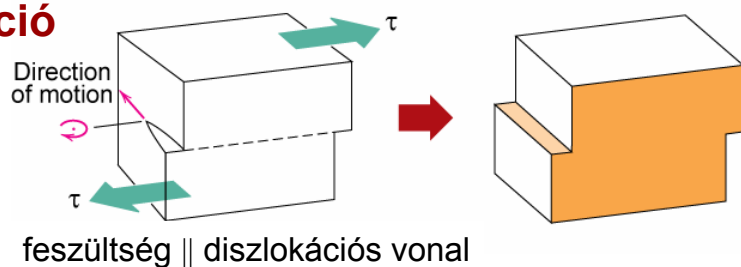
A diszlokációk mozgása 2/2

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

Él diszlokáció



Csavar diszlokáció



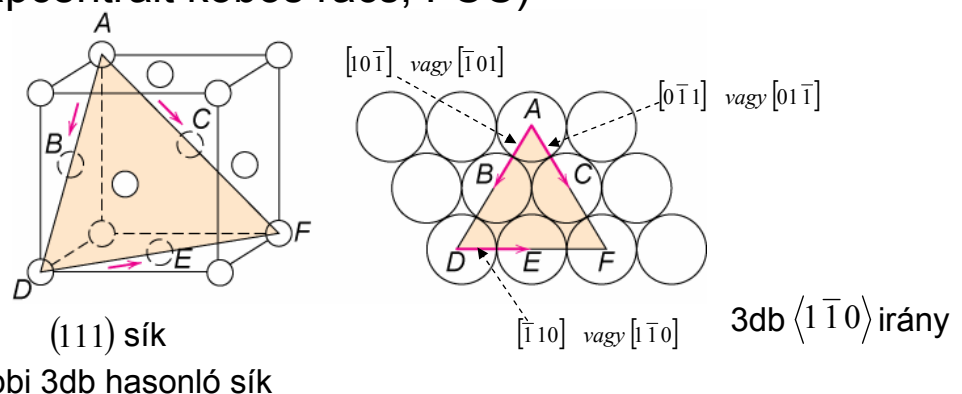
VIII/3

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 (lapcentrálalt köbös rács, FCC)



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

VIII/4

A csúszási rendszer 2/2

Egy csúszósík és csúszási irány **csúszási rendszert** alkot, melyből

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

A főbb kristályrendszerek jellemzői

Fémek	Csúszósík	Csúszási irány	Csúszási rendszer [db]	
Cu, Al, Ni, Ag, Au	Lapcentrált köbös (FCC)			} képlékeny
	{111}	$\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$	12	
α -Fe, W, Mo	Tércentrált köbös (BCC)			
	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12	
	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12	
	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24	
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	Hexagonális (HCP)			} rideg
	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3	
	{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3	
	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6	

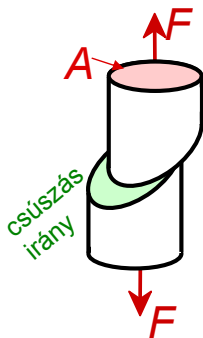
VIII/5

Feszültség és a diszlokáció mozgása

- A kristályok csúszása az **effektív nyírófeszültség**, τ_R következménye.

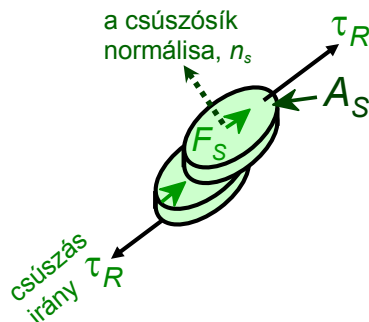
Az alkalmazott húzófeszültség:

$$\sigma = F/A$$

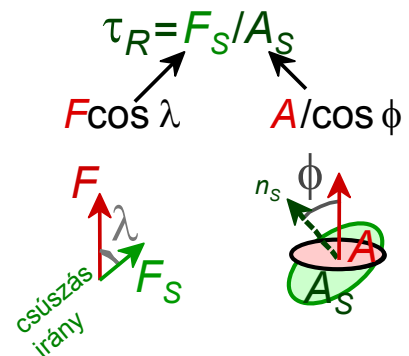


Effektív nyírófeszültség:

$$\tau_R = F_S/A_S$$



σ és τ_R kapcsolata

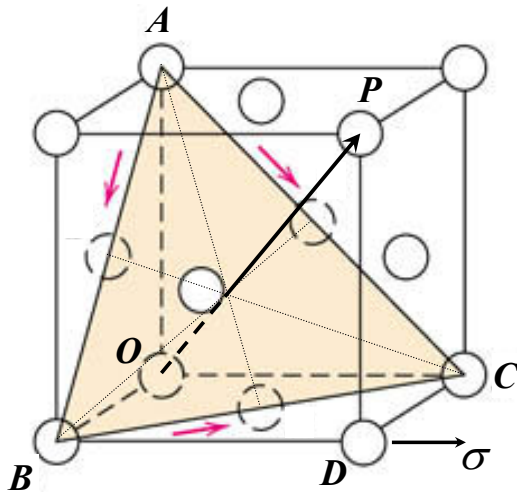
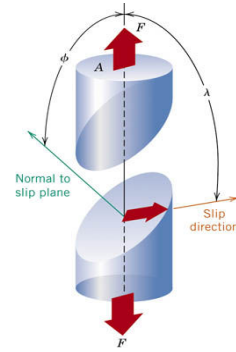


$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$

VIII/6

λ és ϕ jelentése

- λ : a csúszási irány és az alkalmazott húzófeszültség által bezárt szög
- ϕ : a csúszósík normálisa és az alkalmazott húzófeszültség által bezárt szög



a húzófeszültség iránya: \overrightarrow{BD}

csúszási irány: pl. \overrightarrow{BC} \overrightarrow{AB} \overrightarrow{AC}

a csúszósík normálisának iránya: \overrightarrow{OP}

$$\lambda: \angle(\overrightarrow{BC}, \overrightarrow{BD}) = 45^\circ \quad 90^\circ \quad 45^\circ$$

$$\phi: \angle(\overrightarrow{OP}, \overrightarrow{BD}) = 54.7^\circ$$

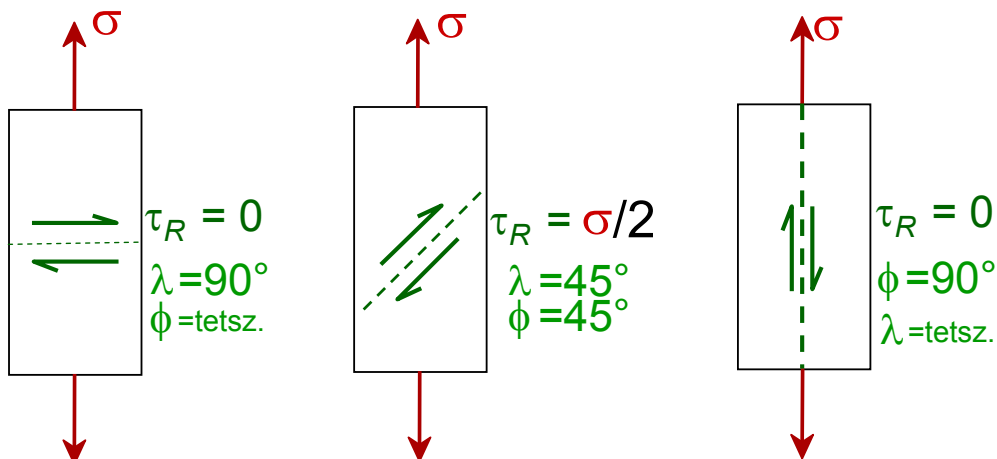
Általános esetben $\lambda + \phi \neq 90^\circ$, mert a húzófeszültség, a csúszósík normálisa és a csúszási irány nem esnek egy síkba!

VIII/7

Az orientáció szerepe

- A kristály orientációja megkönnyítheti, de meg is nehezítheti a diszlokációk mozgását.

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



τ_R maximális ha $\lambda = \phi = 45^\circ$

VIII/8

Kritikus effektív nyírófeszültség, τ_{CRSS}

- Azt mutatja meg, hogy minimálisan mekkora nyírófeszültség szükséges a csúszás megindulásához.
- τ_{CRSS} anyagi jellemző, mely a folyáserősséggel a következő kapcsolatban áll:

$$\tau_{CRSS} = \sigma_y (\cos \phi \cos \lambda)_{\max}$$

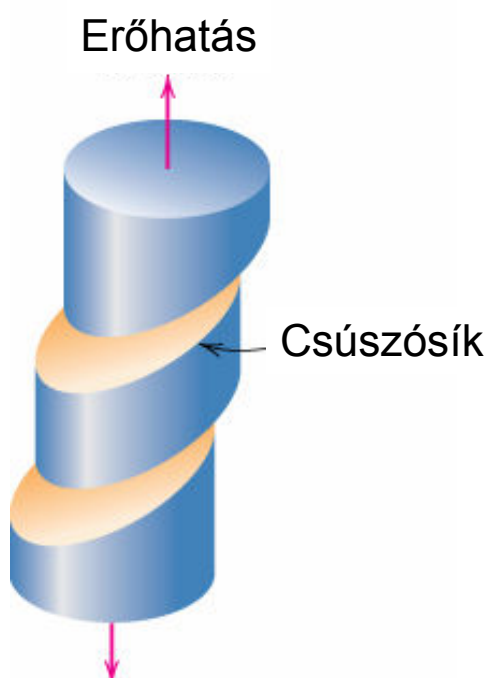
optimális orientáció esetén: $\sigma_y = 2\tau_{CRSS}$
jellemzően 10^{-4} - 10^{-2} GPa

- A diszlokáció mozgásának feltétele:

$$\tau_R > \tau_{CRSS}$$

VIII/9

Csúszás egykristályban

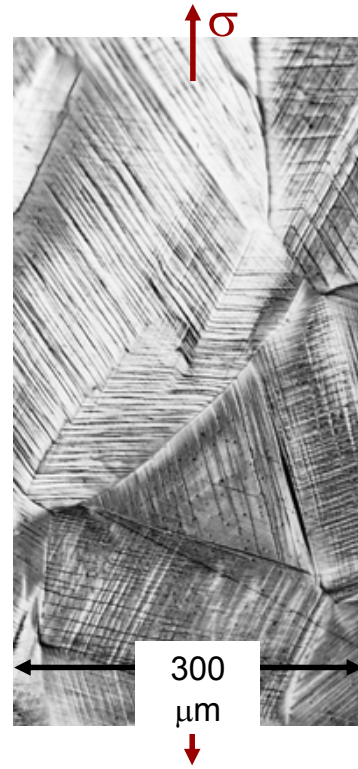


Zn egykristály

VIII/10

Csúszás polikristályos anyagban

- Csúszósíkok és irányok (λ , ϕ) szemcséről szemcsére változnak.
- τ_R szemcsefüggő is lesz.
- Az a szemcse csúszik meg először, melyre nézve τ_R maximális.
- A polikristályos anyagok erősebbek egykristályos társaiknál. (Az optimálisan orientált szemcsék ugyanis mindaddig nem tudnak megcsúszni, míg a feszültség elegendően nagy nem lesz ahhoz, hogy hatására a szomszéd szemcsék, kevésbe optimálisan orientált kristályai is meg nem tudnak csúszni.)

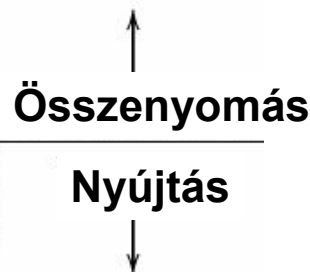
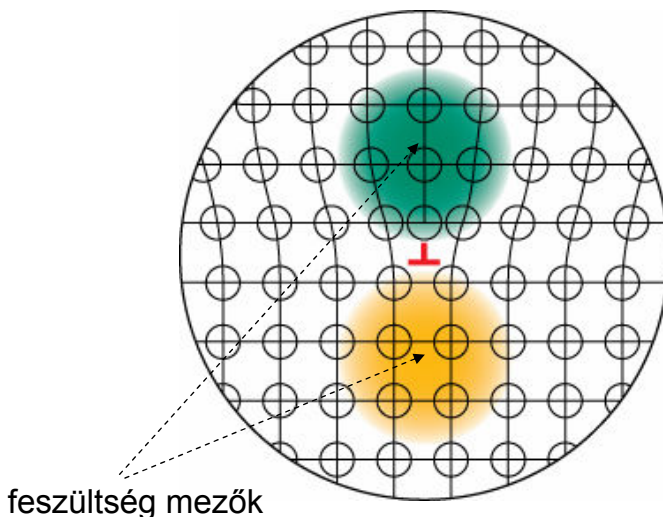


Polikristályos réz minta

VIII/11

Rácsdeformáció és diszlokáció közelében

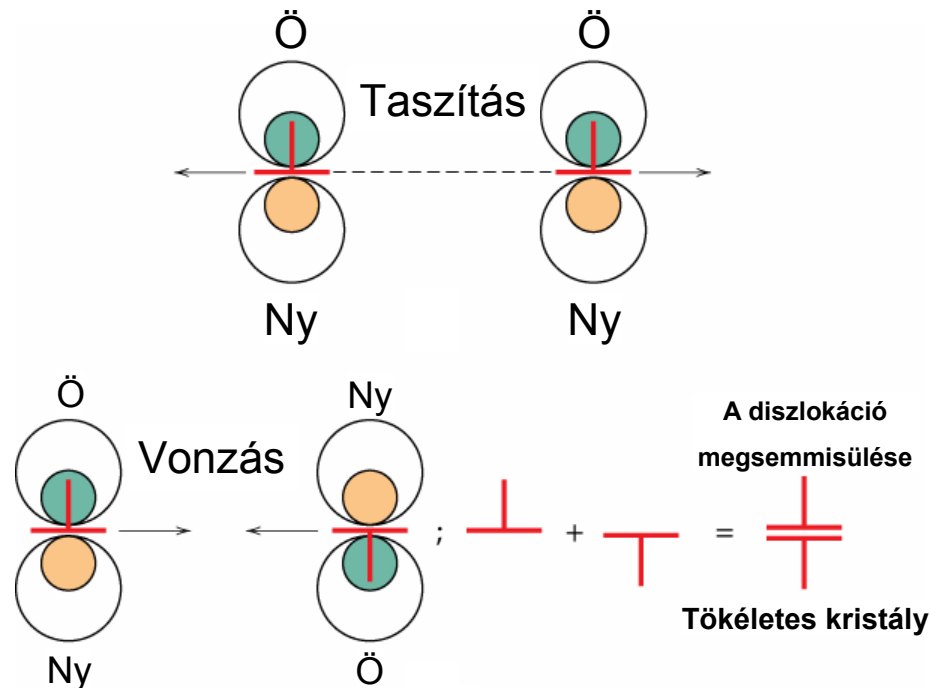
A rács a képlékeny deformáció energiájának kb. 5%-át őrzi meg. ----> diszlokáció



A rácsdeformációt okozó feszültségnek van nyíró komponense is! (Csavardiszlokációknál a rácsstorzulás csak nyírási deformáció jellegű.)

VIII/12

A diszlokációk kölcsönhatása



Diszlokációk keletkezhetnek másik diszlokáció (osztódás), szemcsehatár, hibahelyek, karcolások stb. révén. VIII/13

Keményedési mechanizmusok

mikroszkópikus

Az anyag képlékeny deformációra való hajlama attól függ, hogy a diszlokációk mennyire képesek mozogni.

+

fenomenológikus

A keménység, a folyáserősség és a szakítószilárdság azzal kapcsolatosak, hogy mennyire könnyen deformálható az anyag képlékenyen.

⇓

A diszlokációk mobilitásának csökkentése mechanikailag keményebb és erősebb anyagot eredményez.

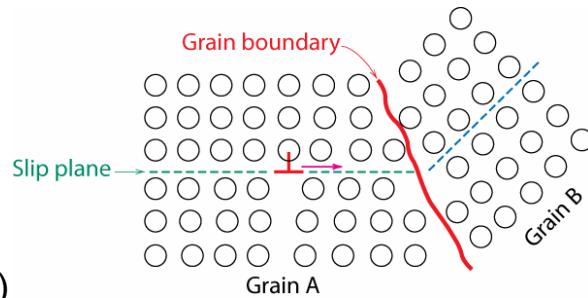
Minden keményedési folyamat alapja a diszlokációk mozgásának korlátozása, illetve blokkolása.

Keményedési mechanizmusok

1: A szemcseméret csökkentése

- A szemcsehatárok a csúszó sík megtörése révén gátolják a csúszást.
- A gátlás „erőssége” annál nagyobb, minél nagyobb szögű az illeszkedés.
(ám ha α kicsi \rightarrow hatástalan
ha $\alpha > \alpha_{kr} \rightarrow$ feltorlódás)
- Kisebb szemcseméret \rightarrow több gátló határfelület.

pl. hűlési sebesség, vagy képlékeny deformáció révén változtatható



(a kisebb szemcseméret általában erősebb, szívósabb anyagot eredményez)

- **Hall-Petch egyenlet:**

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

d : átlagos szemcseméret; σ_o és k_y anyagi állandók

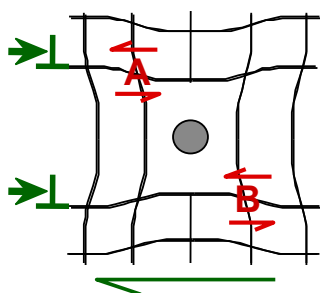
VIII/15

Keményedési mechanizmusok

2: Szilárd oldat

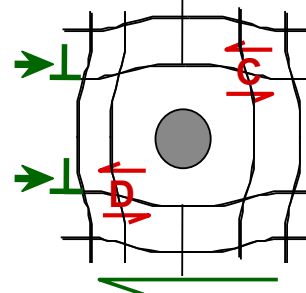
- A szennyező atomok torzítják a rácsot és feszültséget okoznak.
- A feszültség gátolja a diszlokáció mozgását.
 \rightarrow A nagy tisztaságú fémek puhábbak, mint ötvözeteik.

Kisebb szubsztitúciós szennyező



A szennyeződés keltette lokális feszültség az **A** és **B** pontokban gátolja a diszlokáció jobbra mozgását.

Nagyobb szubsztitúciós szennyező



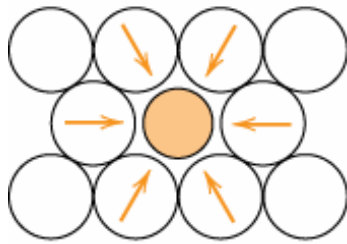
A szennyeződés keltette lokális feszültség a **C** és **D** pontokban gátolja a diszlokáció jobbra mozgását.

VIII/16

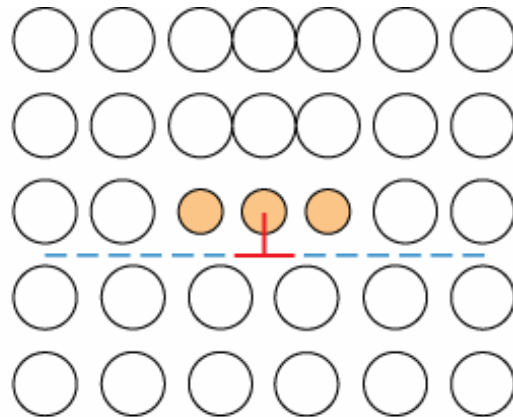
Keményedési mechanizmusok

3: Ötvözés 1/3

A rendszer igyekszik minimalizálni a deformáció okozta energia többletet → a kisebb szennyező atomok a csúszósík fölé diffundálnak (szegregálnak)



Húzófeszültséget jelent

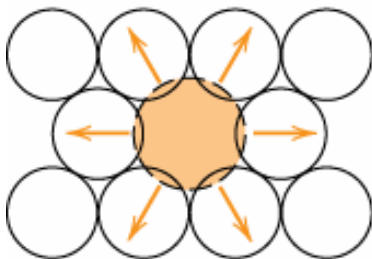


VIII/17

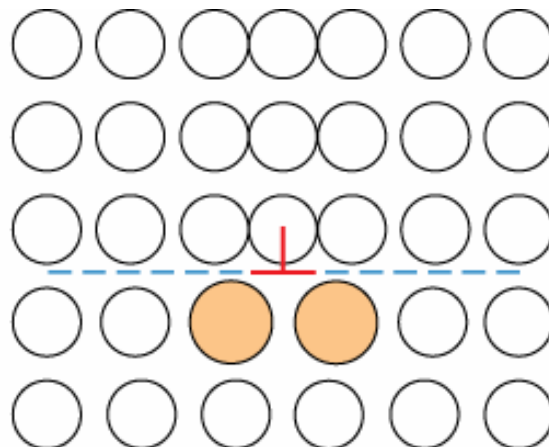
Keményedési mechanizmusok

3: Ötvözés 2/3

A rendszer igyekszik minimalizálni a deformáció okozta energia többletet → a nagyobb szennyező atomok a csúszósíkban gyűlnek fel (szegregálnak)



Összenyomást jelent



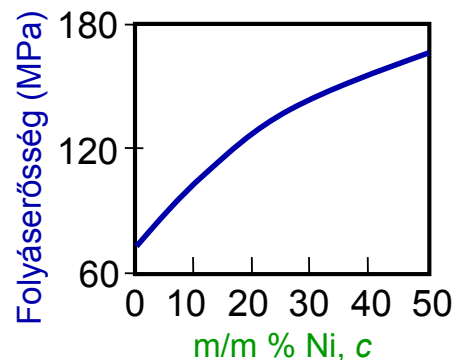
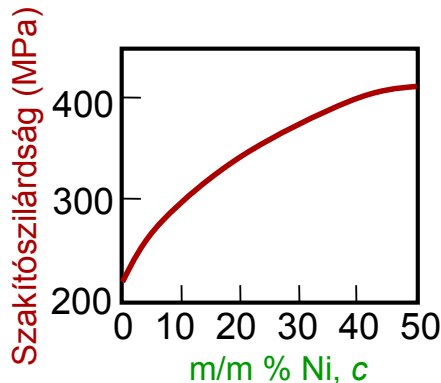
A szegregáció nehezíti a diszlokációk mozgását.

VIII/18

Keményedési mechanizmusok

3: Ötvözés 3/3

- A Cu-Ni ötvözetek szakítószilárdsága és folyáserőssége nő a Ni mennyiségének növelésekor.



- Tapasztalati összefüggés: $\sigma_y \sim c^{1/2}$
- A σ_y és TS növekedése a duktilitás rovására következik be, mely a Ni tartalom növekedésével csökken.

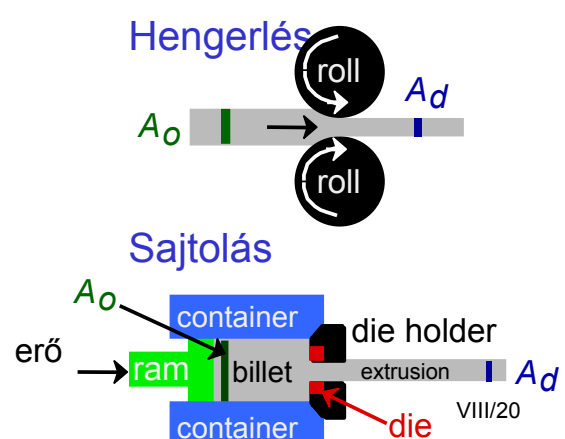
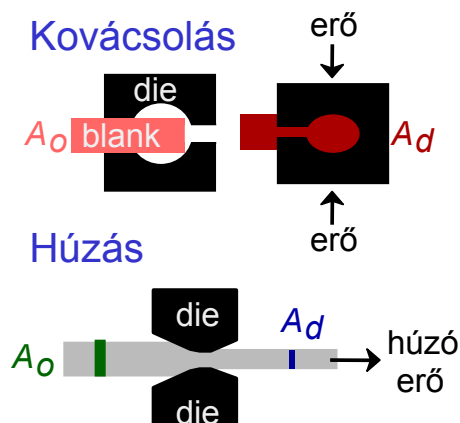
VIII/19

Keményedési mechanizmusok

4: Deformációs keményedés

- Alacsony hőmérsékletű deformáció. $T < T_{\text{újra kristályosodás}} = 0.4 \times T_{\text{op}}$
 \rightarrow hidegalakítás (általában szobahőmérsékleten)
- A hidegalakítási műveletek általában a keresztmetszetet változtatják.

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



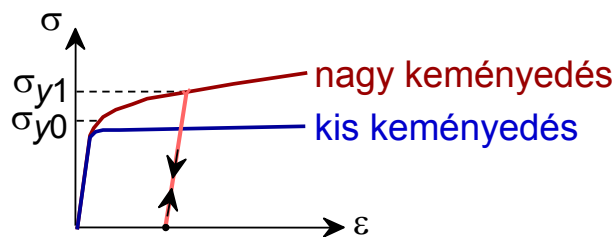
VIII/20

A hidegalakítás

diszlokáció sűrűség, $\rho_d = \frac{\text{diszlokációk összhossza}}{\text{térfogat}}$

- Gondosan növesztett egykristály
→ kb. 10^3 mm^{-2}
- Alakváltózkor a sűrűség nő
→ $10^9\text{-}10^{10} \text{ mm}^{-2}$
- A hőkezelés csökkenti a diszlokáció sűrűséget
→ $10^5\text{-}10^6 \text{ mm}^{-2}$

- A szakítási szilárdság nő ρ_d növelésekor:

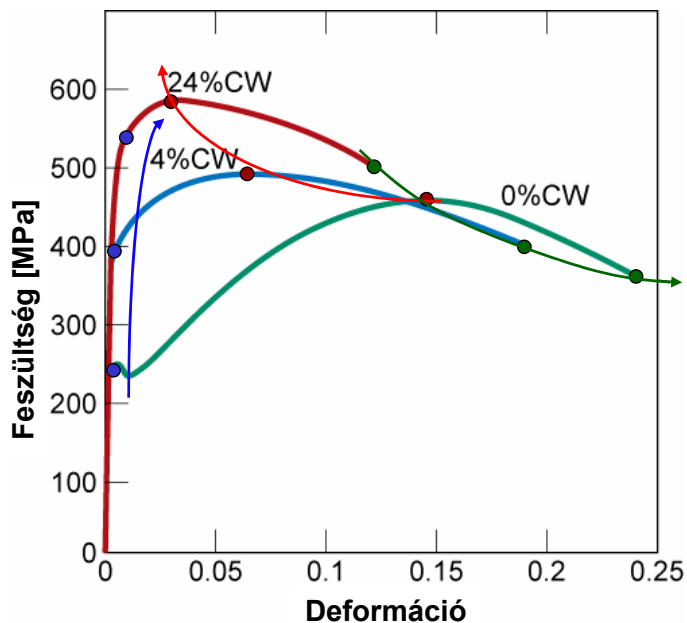


VIII/21

A hidegalakítás hatása

A százalékos hidegalakítás (%CW) növelésével

- A folyáserősség (σ_y) nő.
- A szakítószilárdság (TS) nő.
- Duktilitás (% EL vagy % AR) csökken.

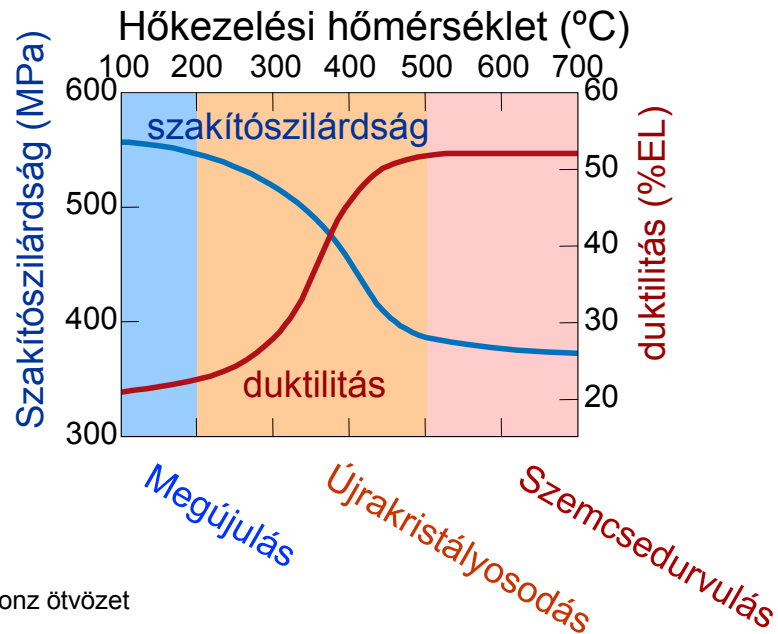


Alacsony széntartalmú acél

VIII/22

A megváltozott tulajdonságok visszaállítása

- Hőkezelés (annealing), mely csökkenti TS -t és növeli $\%EL$ -t
- Három szakaszát különböztetjük meg.

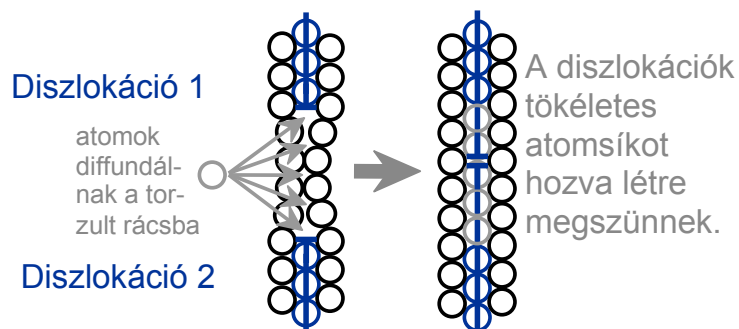


Megújulás (recovery)

A diszlokációk annihilációja csökkenti sűrűségüket.

Diffúzió alapul.

- A. példa

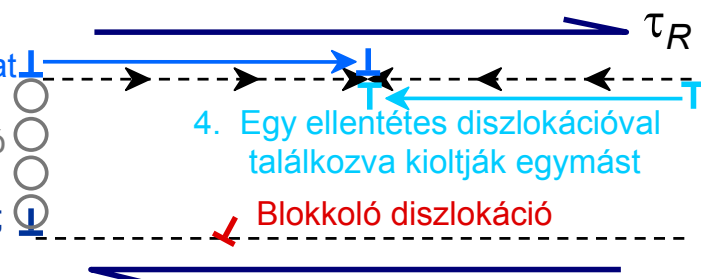


- B. példa

3. Az új csúszósíkon a diszlokáció már mozoghat

2. a szürke atomok diffúziójával a diszlokáció "felemelkedhet"

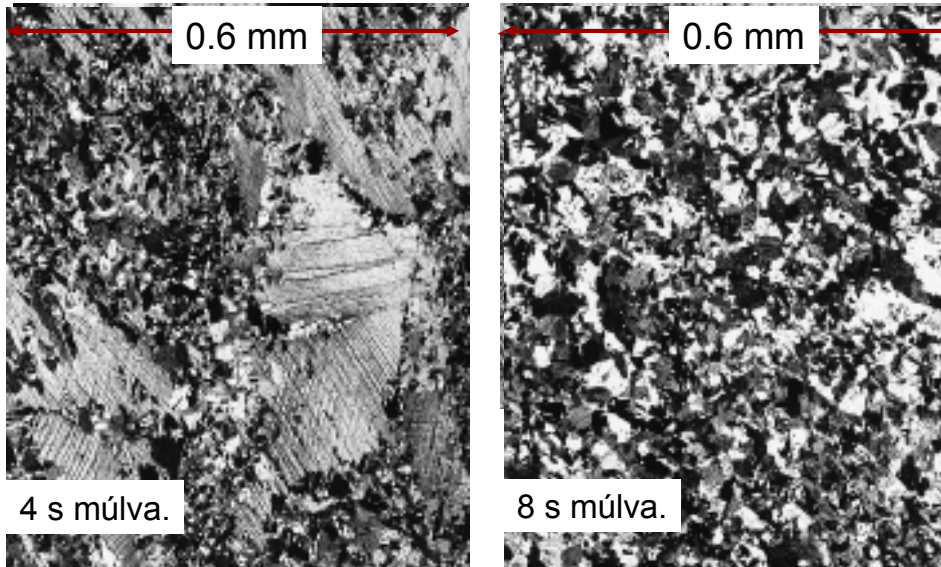
1. A diszlokáció blokkolt; nem tud jobbra mozogni



Újrakristályosodás

A belső energia minimalizálása új szemcséket eredményez, melyek

- kicsik,
- alacsony diszlokáció sűrűségűek, és
- fokozatosan felemésztik a deformált szemcséket.



VIII/25

Újrakristályosodási hőmérséklet, T_R

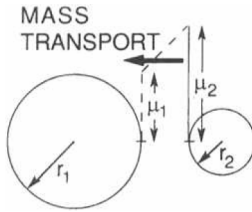
- Az a hőmérséklet, melyen a teljes újrakristályosodás épp 1 órát vesz igénybe.
 1. $T_R \approx 0.3-0.6 T_{op}$ ($[T_R]=K$)
 2. A diffúzió időt igényel $\rightarrow T_R = f(t)$
rövidebb hőkezelés \Rightarrow magasabb T_R
 3. Nagyobb mértékű hidegalakítás \Rightarrow alacsonyabb $T_R \Rightarrow$ gyorsabb újrakristályosodás
 4. Tiszta fémek T_R -e alacsonyabb, mint az ötvözeteké, mert az ötvözetek szemcsehatárain a szennyező elem szegregálódik és ezzel nehezíti a diszlokációk mozgását.

VIII/26

Szemcsedurulás 1/4

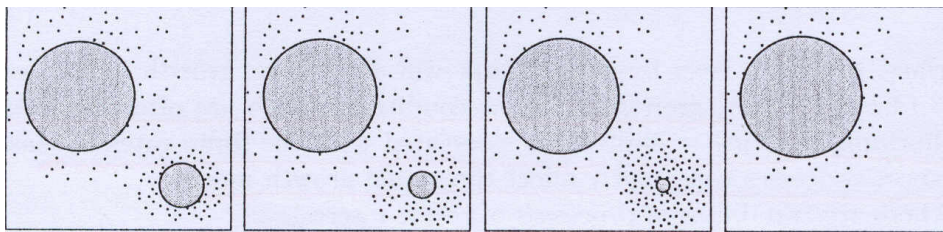
- Hosszabb idők alatt a nagyobb szemcsék „felfalják” a kisebbeket (a szemcsehatár az atomi migrációval ellentétes irányba vándorol).
- Miért? A szemcsehatárok összmérete (és ezzel együtt a rendszer teljes energiája) csökken.

A folyamatot tehát az hajtja, hogy a felületi szabadenergia minimális legyen.



$$\Delta G_i = 4\pi r_i^2 \gamma, \quad n_i = \frac{4r_i^3 \pi}{3\Omega}$$

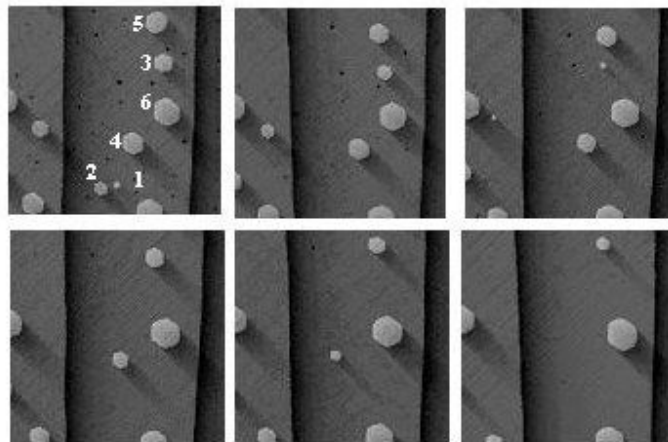
$$\text{és így } \mu_i = \frac{dG_i}{dn_i} = \frac{2\Omega\gamma}{r_i}$$



Oswald-féle feldurulás

VIII/27

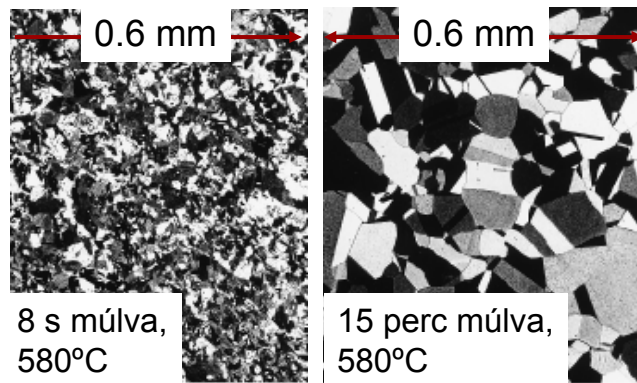
Szemcsedurulás 2/4



Szemcsék Cu(111) felületen

VIII/28

Szemcsedurvulás 3/4



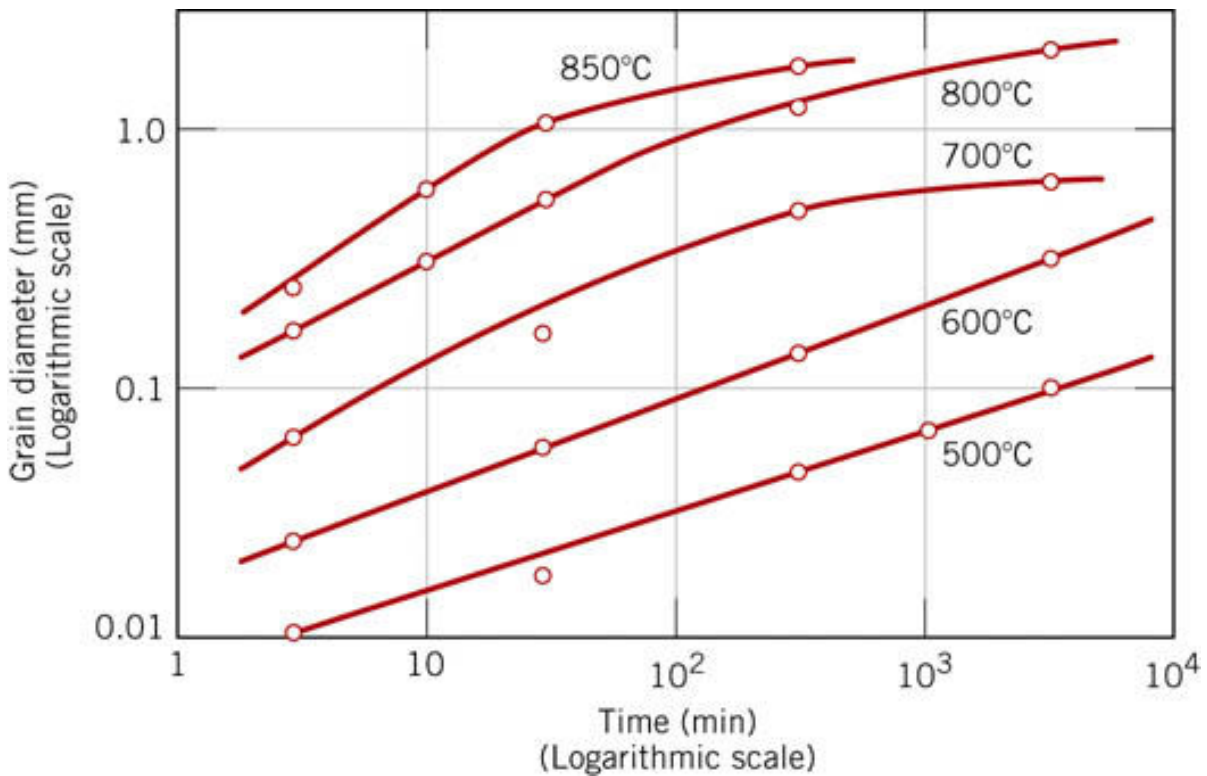
Tapasztalati összefüggés:

$$d^n - d_o^n = Kt$$

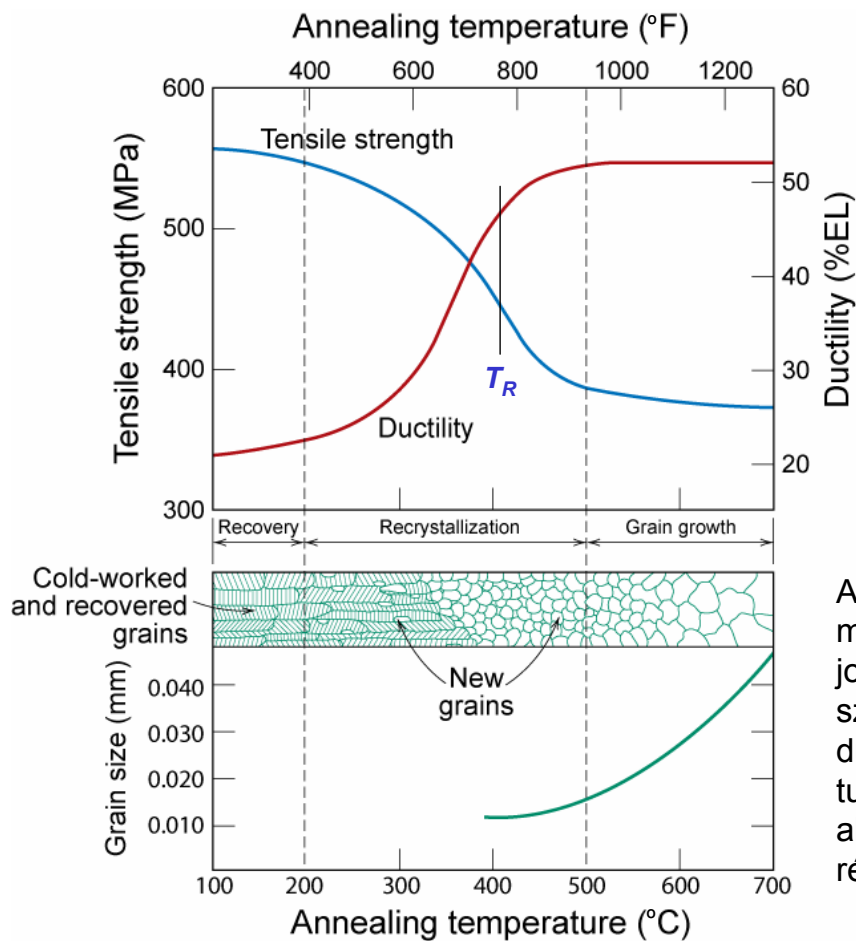
szemcseméret t -kor. kitevő ~ 2 anyagi minőségtől és hőmérséklettől függő állandó eltelt idő

VIII/29

Szemcsedurvulás 4/4



VIII/30



T_R = újrakristályosodási hőmérséklet

A finomszemcsés fémek mechanikai tulajdonságai jobbak, mint a durva szemcsézetté. Egy durva szemcsés anyag tulajdonságai képlékeny alakítás + hőkezelés révén javíthatóak.

VIII/31

Mechanikai szakadás (failure)

Módjai, fajtái

- Törés (fracture)
- Kifáradás (fatigue)
- Kúszás, hidegfolyás (creep)

Törés: az anyag két vagy több darabra történő szakadása, mely **sztatikus** (időben állandó, vagy lassan változó) feszültség hatására, az anyag op.-hoz viszonyítva alacsony hőmérsékleten következik be (egy tengelyű, húzó)

Két lépésből áll: a repedések keletkezése és terjedése

Lehet **képlékeny** és **rideg** (valamelyest relatív fogalmak)

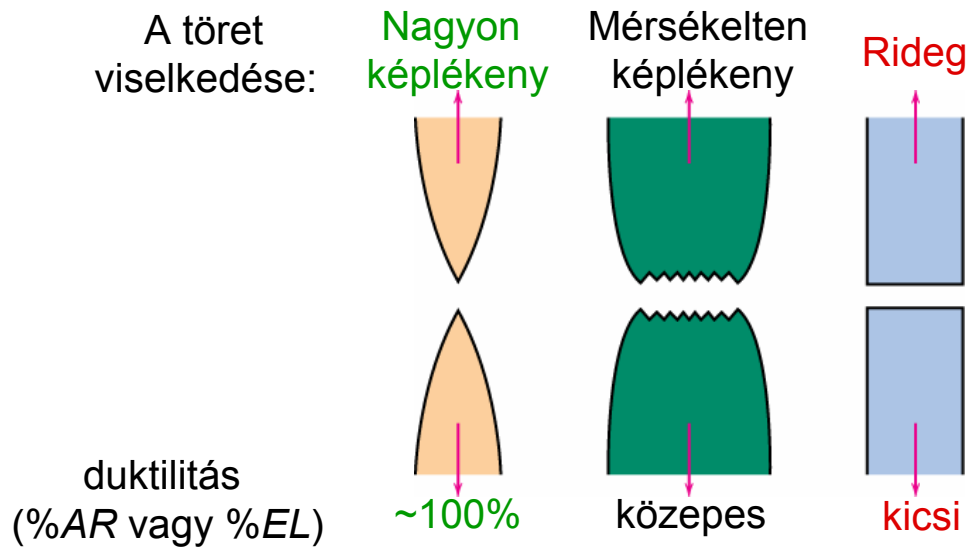
Képlékeny törés: jelentős képlékeny alakváltozással jár; sok energia abszorbeálódik; stabil törés fajta (a repedés terjedése lassú, s általában igényli a feszültség növekedését)

Rideg törés: csekély képlékeny alakváltozás; kevés energia abszorpciójával jár; instabil törés fajta (a repedés terjedése szinte pillanatszerű, s nem igényli a feszültség növekedését)

VIII/32

Képlékeny kontra rideg törés

Csoportosítás:



A képlékeny törést általában előnyben részesítjük, mert

1) a maradandó alakváltozás fokozatos → figyelmeztet a szakadásra és lehetőséget biztosít a megelőzésre

2) több deformációs energiát igényel (szívósabb anyagokra jellemző)

VIII/33

Képlékeny kontra rideg törés



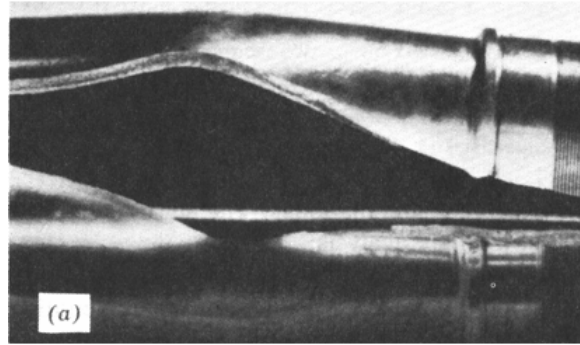
Tipikus mérsékelten képlékeny, ún. *cup-and-cone* töret

rideg töret

Egy életből vett példa

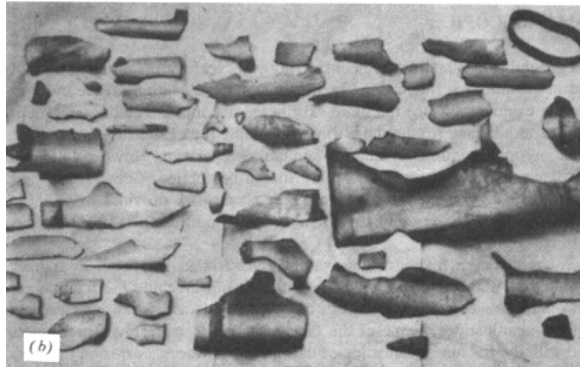
- **Képlékeny törés:**

- egy darab
- nagy deformáció



- **Rideg törés:**

- sok darab
- kis deformáció

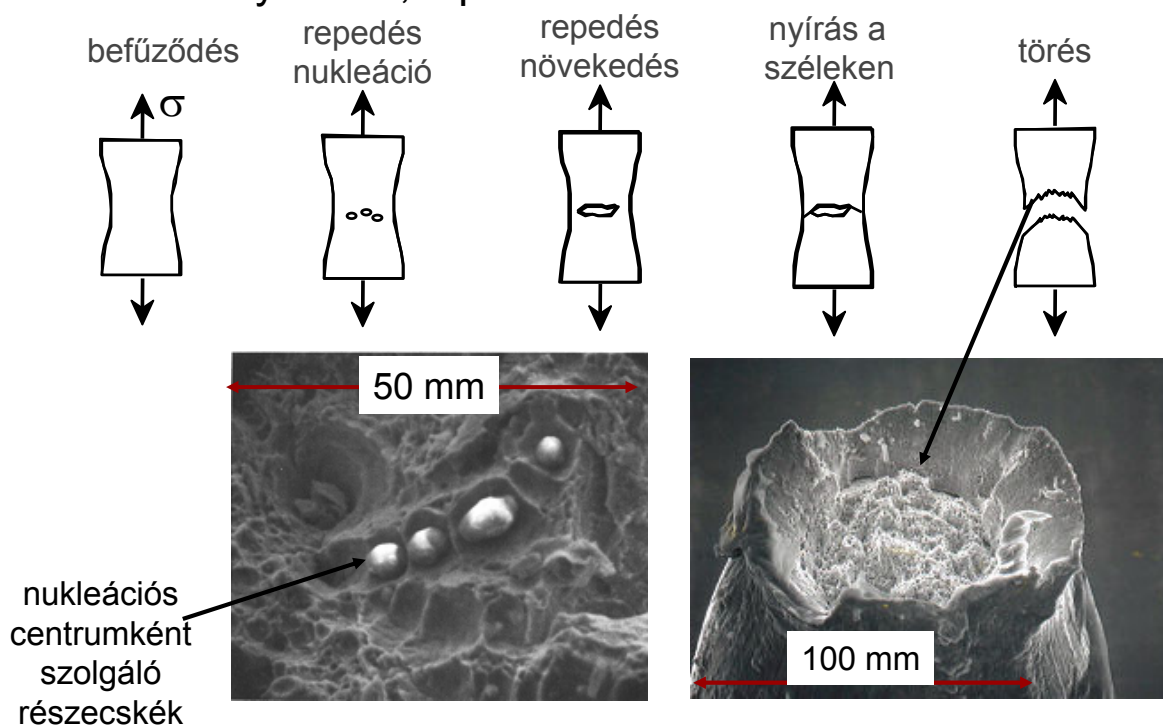


tudománya a *fraktográfia*

VIII/35

Mérsékelten képlékeny törés

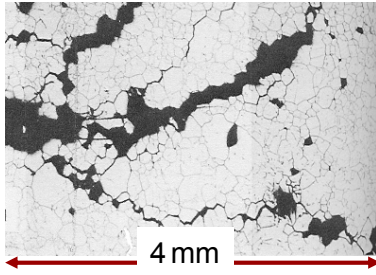
- A törés folyamata, lépései:



VIII/36

Rideg törés 1/2

- Intergranuláris
(szemcsék közötti)



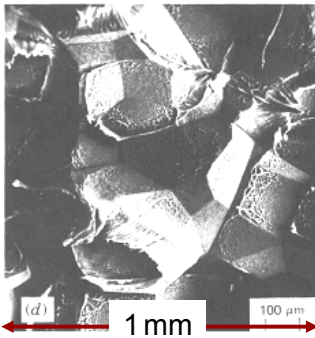
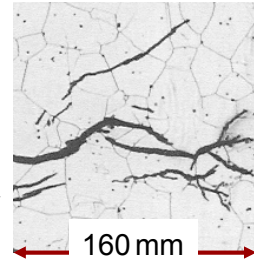
304 rozsdamentes acél (fém)

from "Metals Handbook", 9th ed, Fig. 633, p. 650. Copyright 1985, ASM International, Materials Park, OH. (Micrograph by J.R. Keiser and A.R. Olsen, Oak Ridge National Lab.)

- Intragranuláris
(szemcsén keresztül)

316 rozsdamentes acél (fém)

from "Metals Handbook", 9th ed, Fig. 650, p. 357. Copyright 1985, ASM International, Materials Park, OH. (Micrograph by D.R. Diercks, Argonne National Lab.)

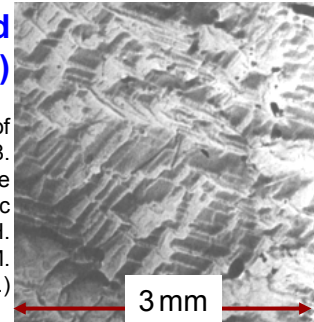


Polypropilén (műanyag)

from R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Fig. 7.35(d), p. 303, John Wiley and Sons, Inc., 1996.

Al oxid (kerámia)

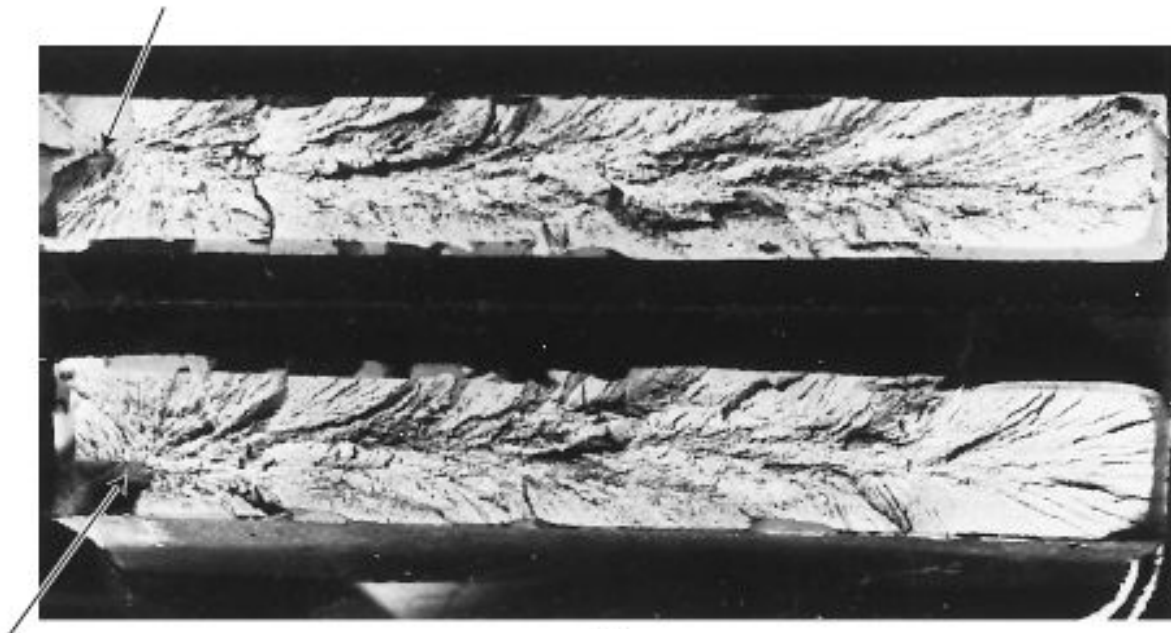
from "Failure Analysis of Brittle Materials", p. 78. Copyright 1990, The American Ceramic Society, Westerville, OH. (Micrograph by R.M. Gruver and H. Kirchner.)



VIII/37

Rideg törés 2/2

Sok esetben megállapítható a töret centruma



VIII/38