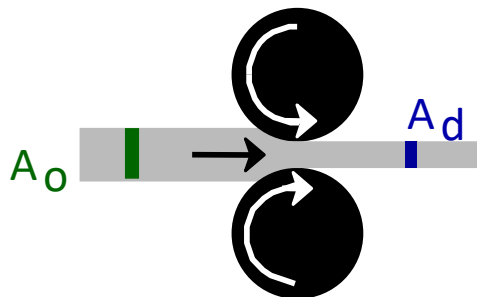


Fázisátalakulások, hőkezelések II.

(Újrakristályosodás, hideg- és melegalakítás, szilárdságnövelő eljárások)

- A hideg alakítás során lezajló anyagszerkezeti folyamatokat és tulajdonság változásokat;
- A megújulás és az újrakristályosodás lépéseit;
- Az újrakristályosodást befolyásoló tényezőket;
- A hideg és meleg alakítás fogalmát;
- Jellegzetes képlékeny alakító eljárásokat.

Hengerlés

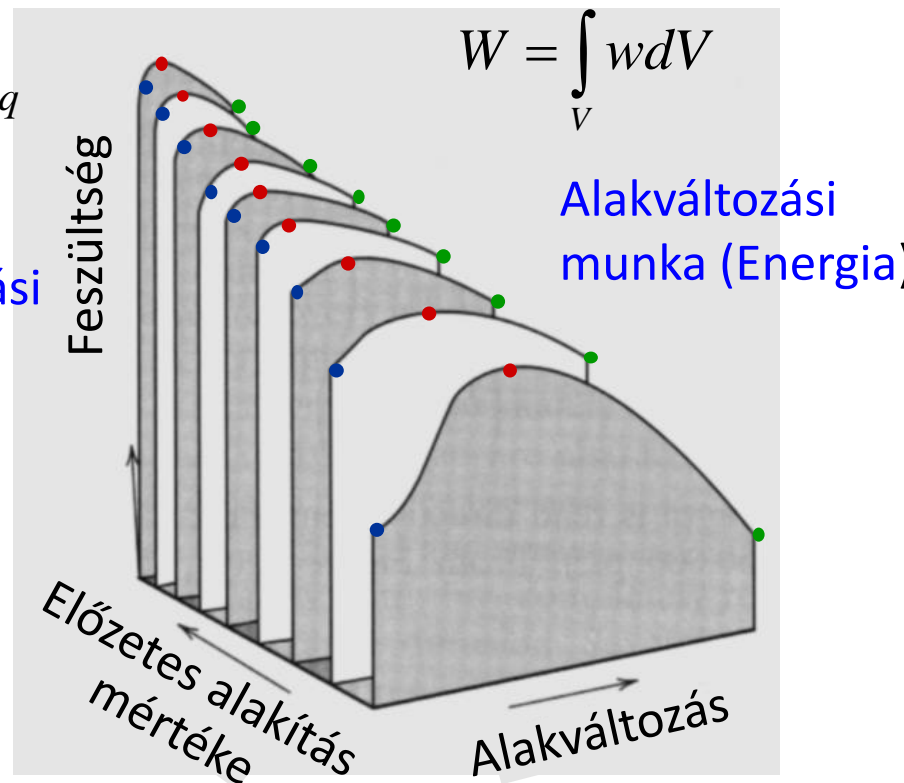


$$w = \int_0^{\varphi} \sigma_{eq} d\varphi_{eq}$$

Fajlagos alakváltozási munka

$$q = (A_0 - A_d) / A_0 * 100 \%$$

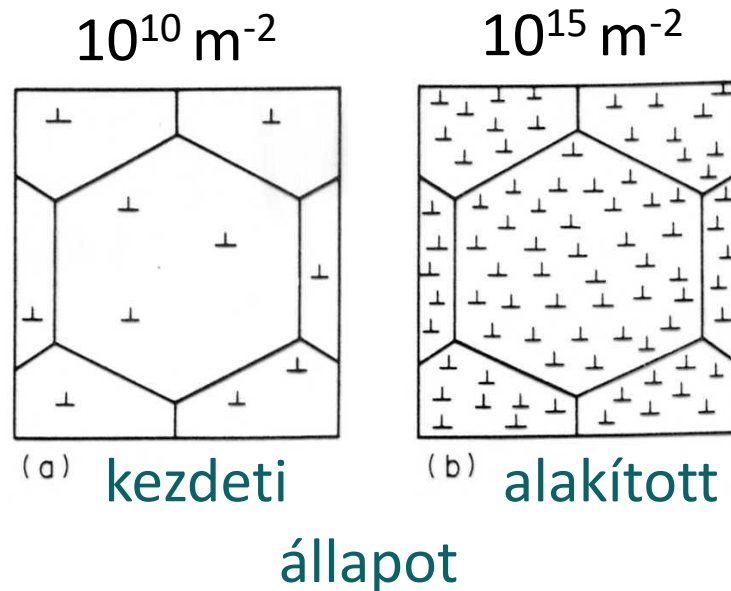
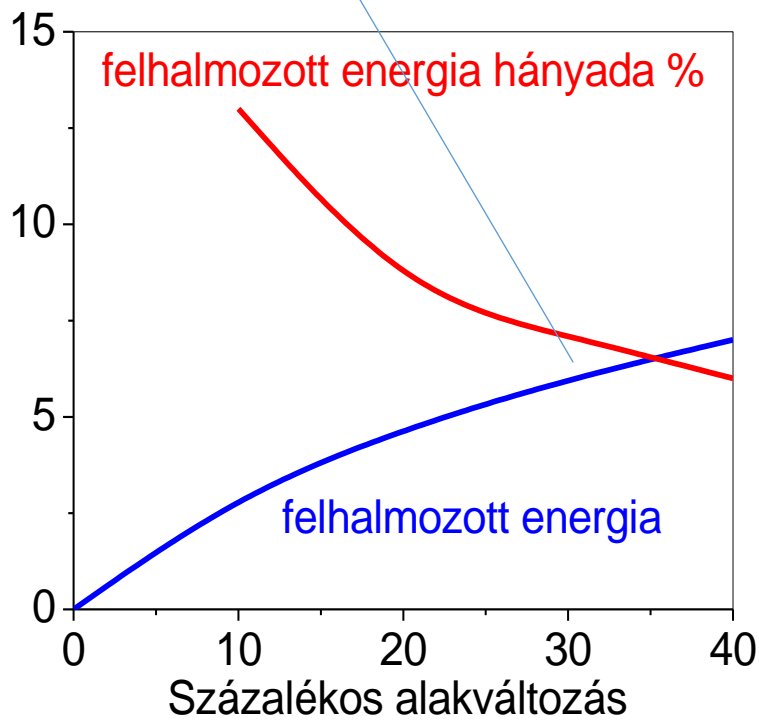
$$q \approx (h_0 - h_d) / h_0 * 100 \%$$



A szilárdság nő, a szívósság csökken.

A rácshibasűrűség és a felhalmozott energia nő.

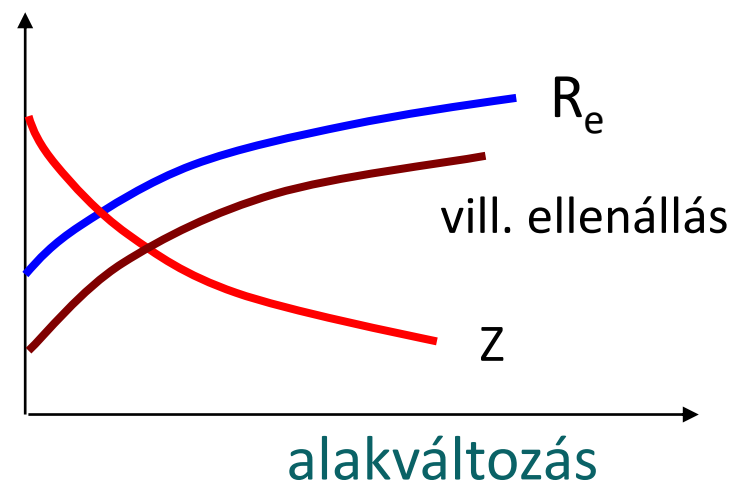
$$W = W_{fh} + Q_{hő}$$

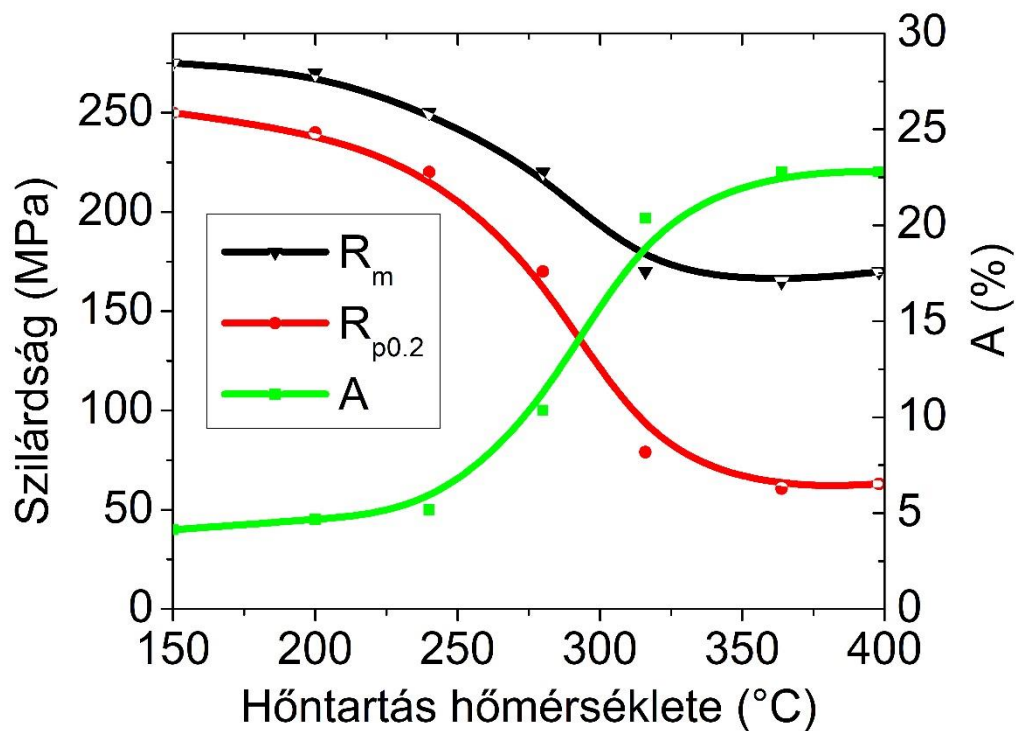
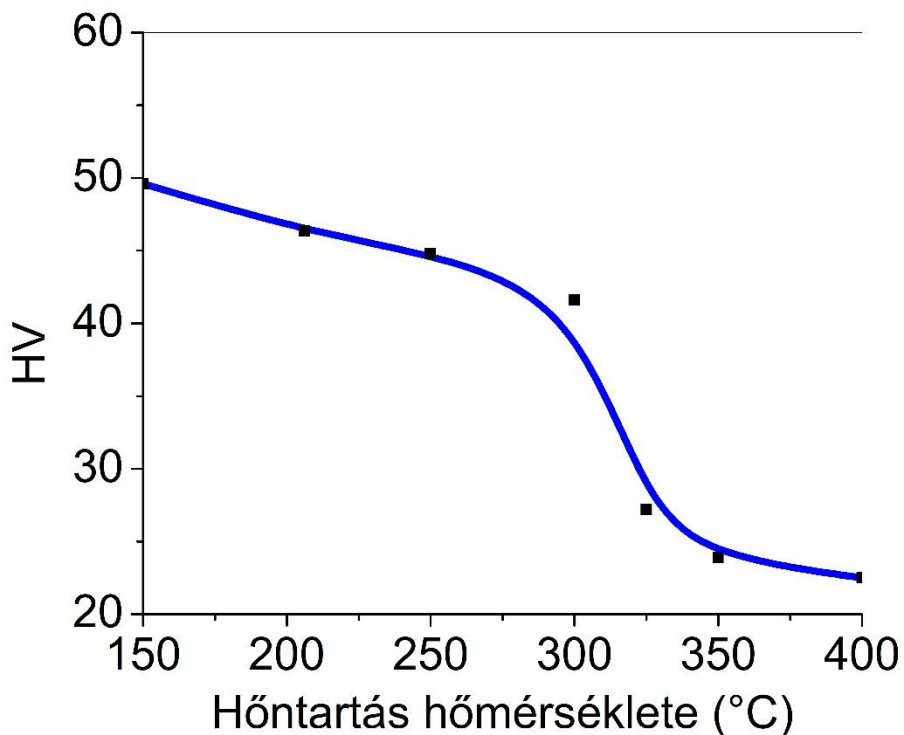


$$R_e = R_0 + \alpha M b G \sqrt{\rho}$$

α – tényező, M – Taylor paraméter, b – |Burgers vektor|

G – csuszató rug.modulus, ρ – diszlokáció sűrűség

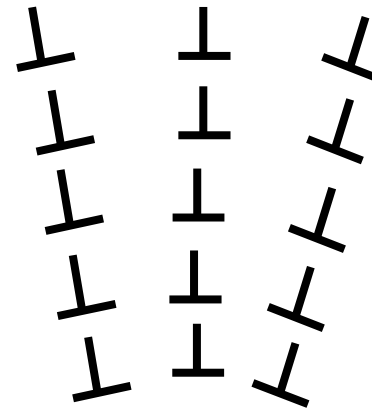


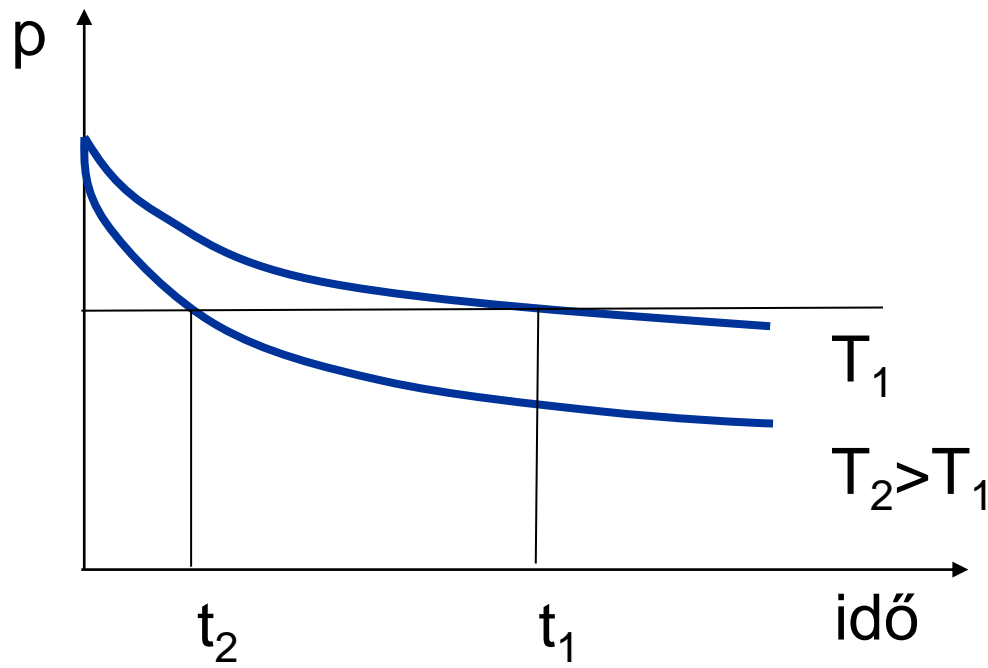


1. A többlet intersztíciós atomok eltűnése.
2. Intersztíciós atomsorok eltűnése.
3. Páros üres rácshelyek eltűnése.
4. Üres rácshelyek eltűnése.
5. Diszlokációsűrűség csökkenése, átrendeződése
(**poligonizáció**).
6. Újrakristályosodás.



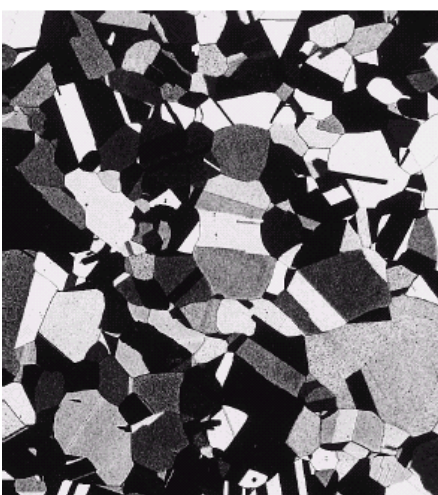
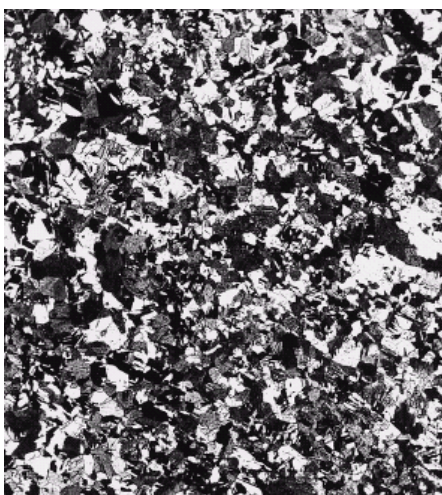
Szubszemcse határok





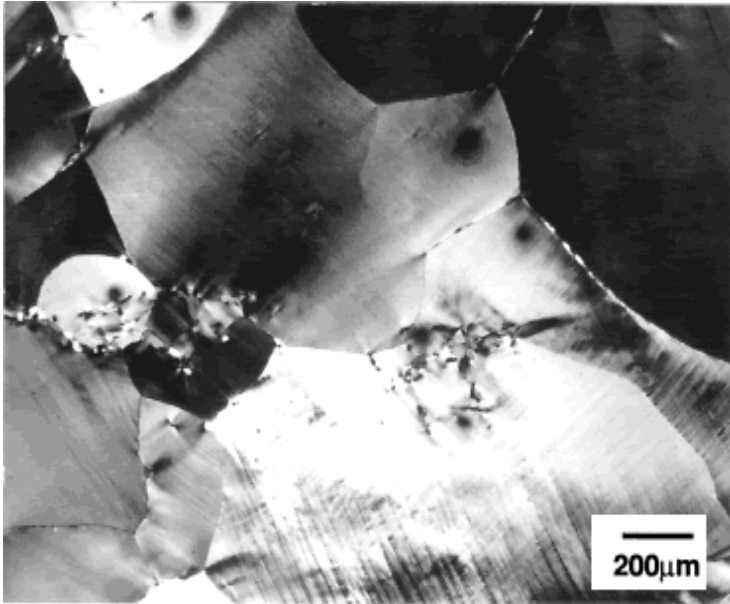
$$\ln(p - p_0) = konst. - A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t$$

Alakított
szerkezet

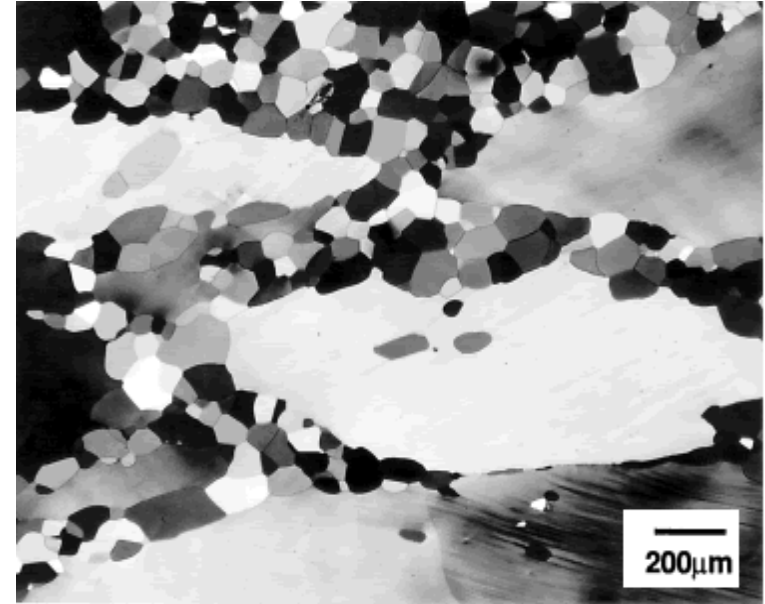


sárgaréz

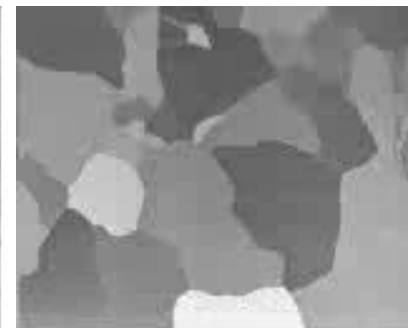
Al-Mg ötvözet



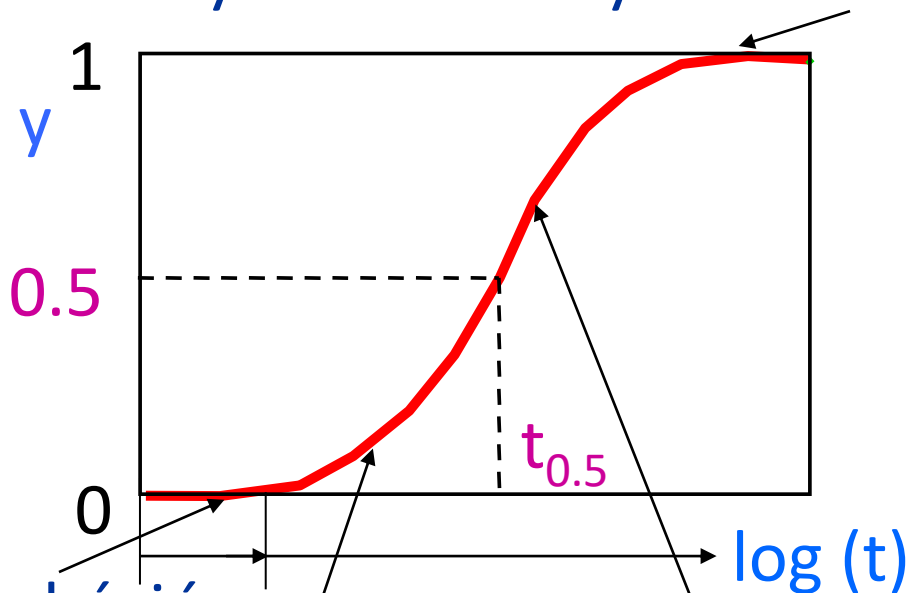
Szemcsehatáron,
második fázisok
környezetében, csúszási
kötegek tartományában



Heterogén tartományok,
nagy orientáció
különbség és nagy
diszlokáció- sűrűség



Újrakristályosodott hányad szemcseütközés



Avrami egyenlet

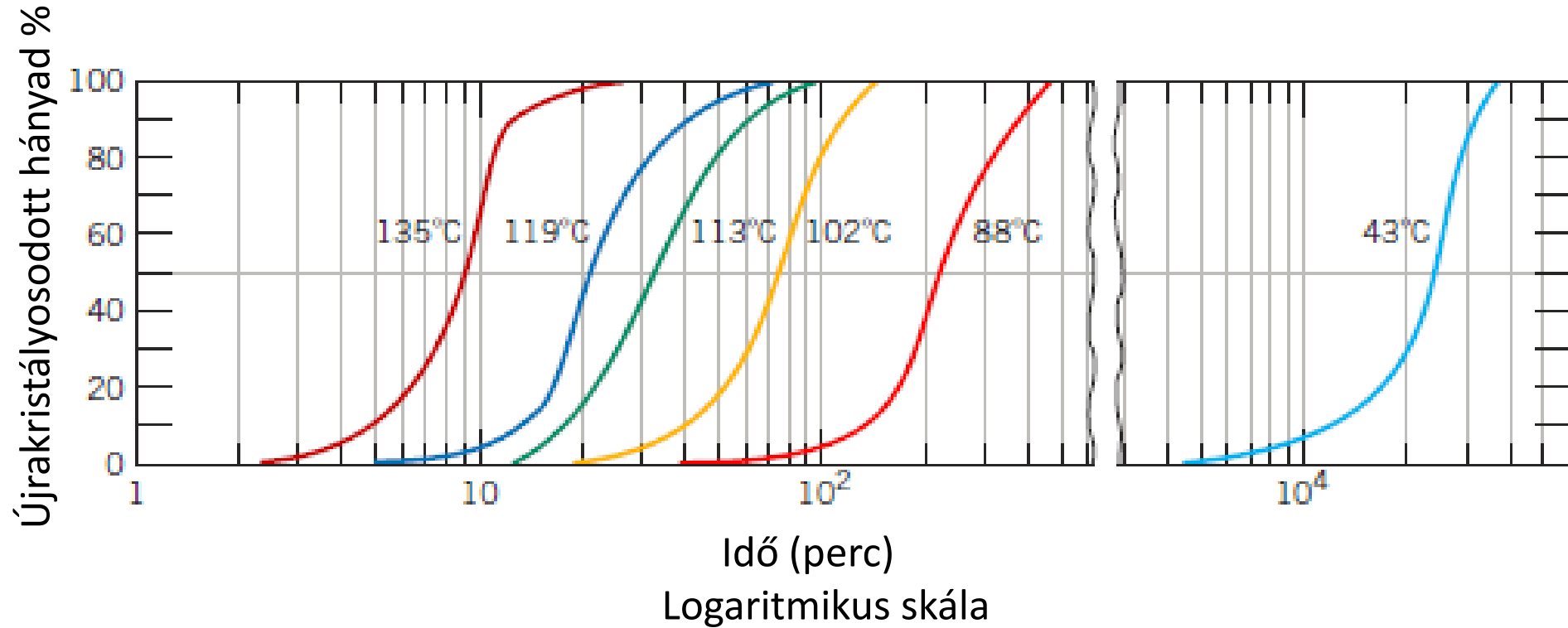
$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

$$r = \frac{1}{t_{0.5}} - \text{az átalakulás sebessége}$$

$$r = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

inkubáció

csíráképződés szemcsenövekedés



- **Folyamat paraméterek**

Hőmérséklet (termikusan aktivált folyamat);

Hevítés sebessége (nagyobb hevítési sebesség → nagyobb rekrisztallizáció sebesség);

Hevítés ideje;

Alakváltozás mértéke;

Alakváltozás sebessége.

- **Mikroszerkezeti tényezők**

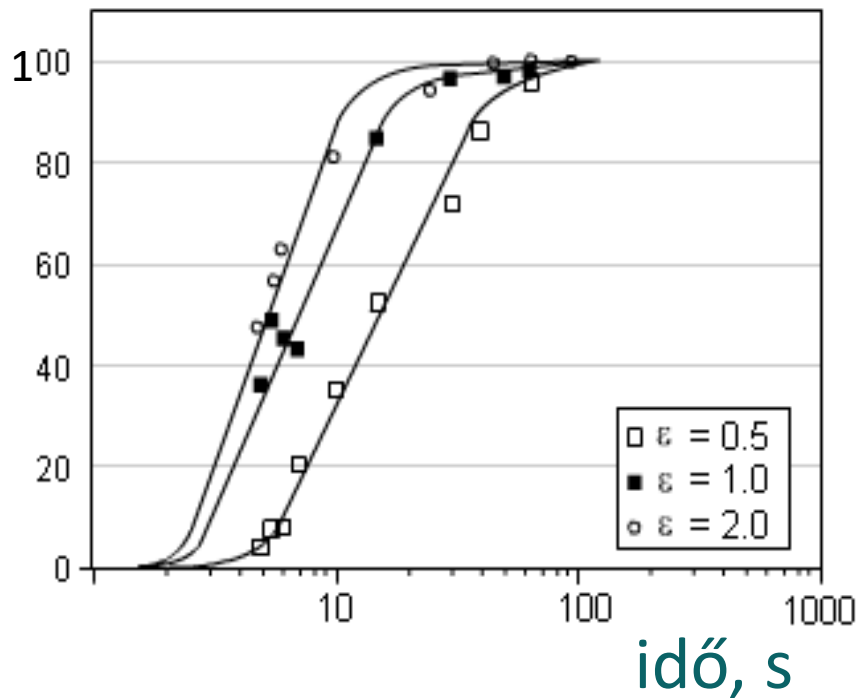
Kezdeti szemcsenagyság (finomabb kiinduló szemcse → finomabb rekr. szemcse, nagyobb rekrisztallizáció sebesség);

Második fázisú részecskék mérete, eloszlása, kapcsolódása az alapszerkezethez;

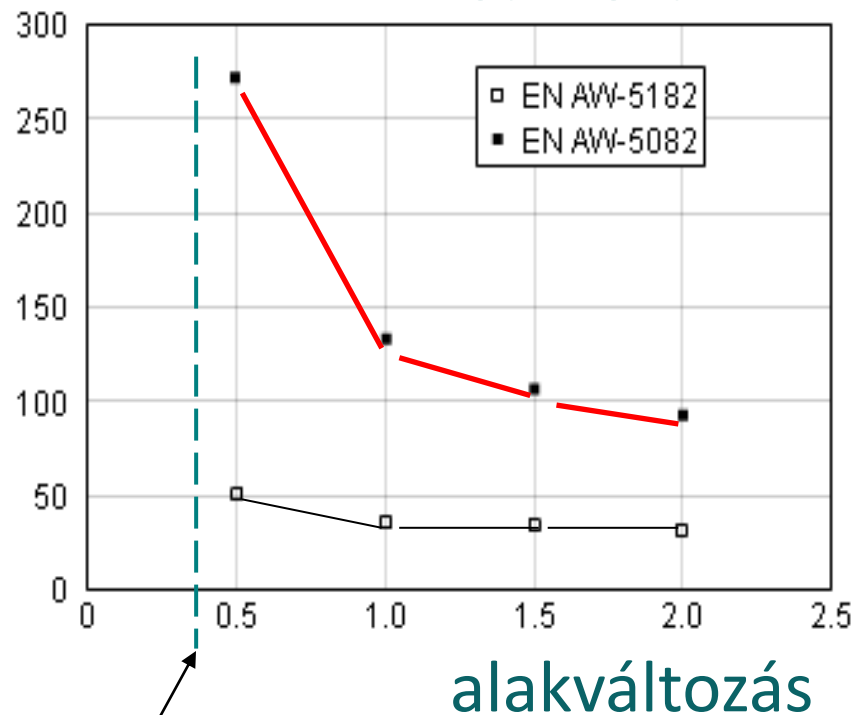
Oldott anyagok mennyisége és minősége;

Alakítás előtti és utáni textúra.

Rekrisztallizált hányad, %

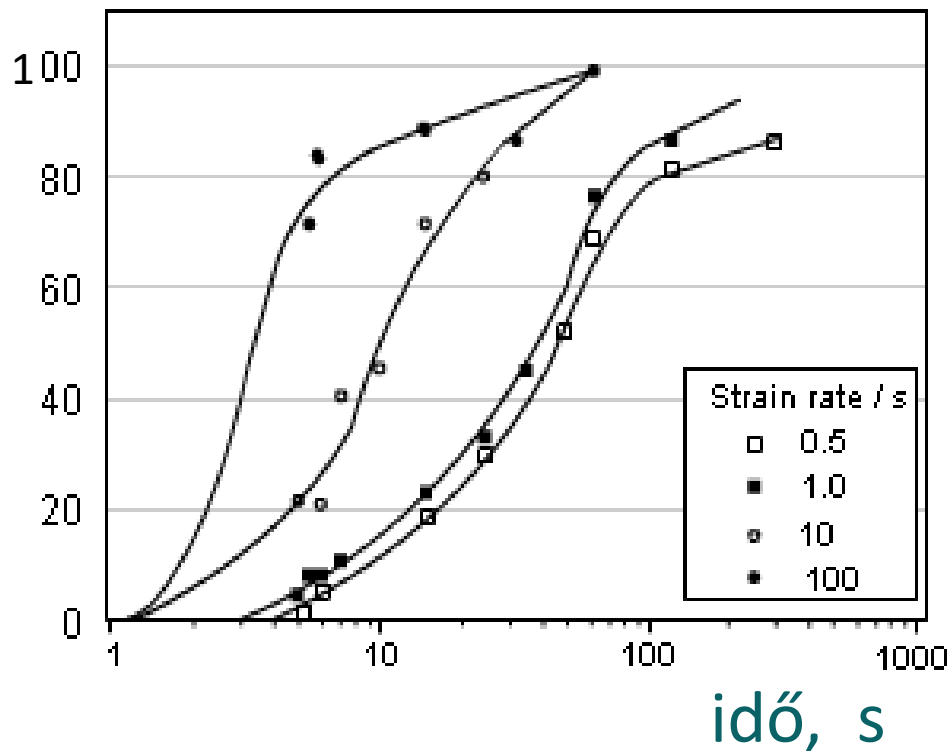


Szemcsenagyság, μm

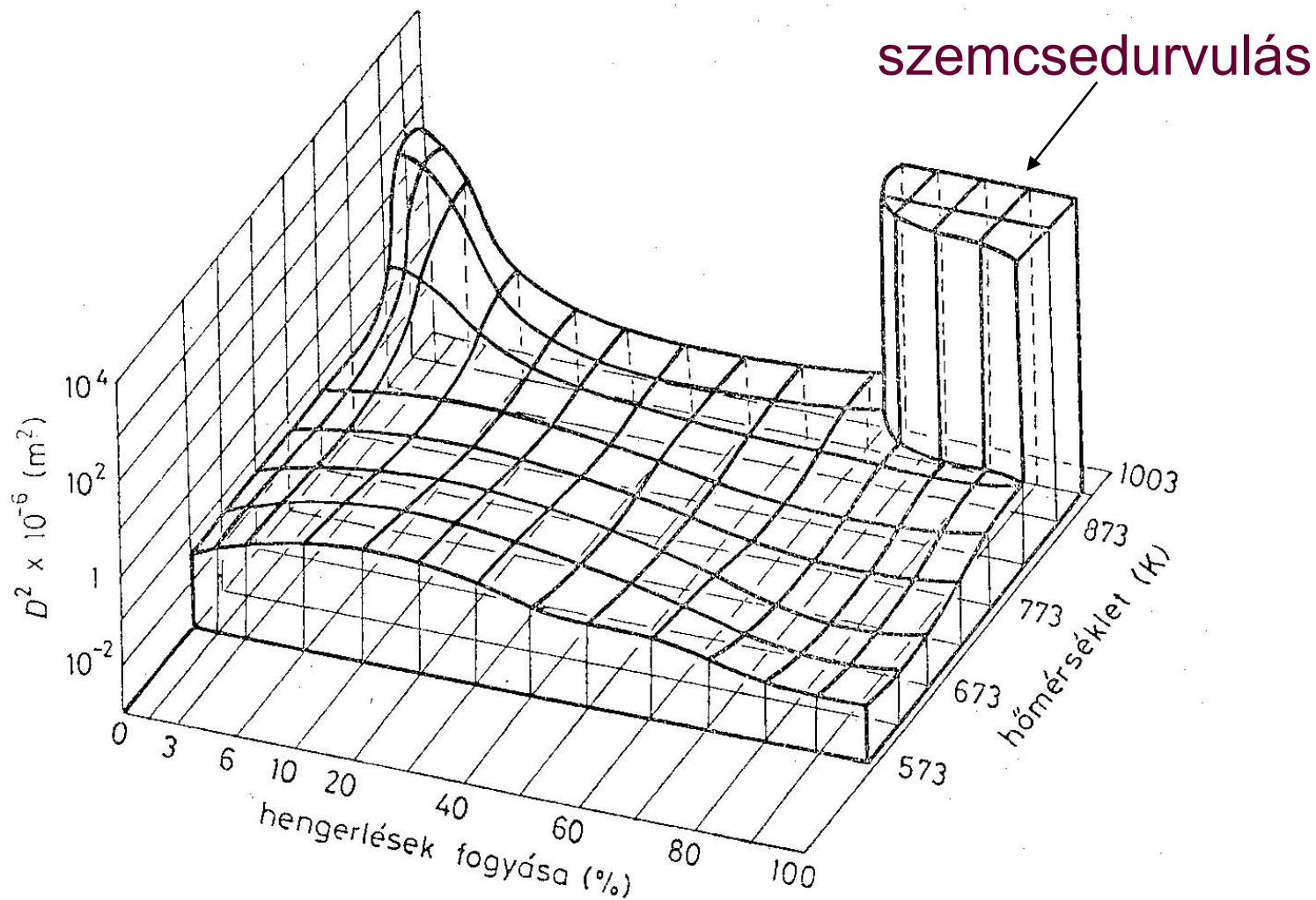


kritikus alakváltozás

Rekrisztallizált hányad, %



Az alakváltózási sebesség növelése a rekrisztallizáció sebességének növelését eredményezi.



- Kritikus (kismértékű) alakváltozás kell a rekrisztallizáció elindításához.
- A rekrisztallizáció hőmérséklete csökken, ha a hevítés időtartama növekszik.
- A rekrisztallizáció hőmérséklete csökken az előzetes alakítás mértékének növekedésével.
- A rekrisztallizált szemcse nagysága az alakváltozás mértékének növekedésével csökken.
- Tiszta fémek könnyebben rekrisztallizálódnak, mint az ötvözetek.
- Adott nagyságú alakváltozás esetén a rekrisztallizáció hőmérséklete nő:
 - a kezdeti szemcsenagyság növekedésével,
 - az alakítás hőfokának növekedésével.

- **Hidegalakítás jellemzői ($T/T_{olv} < 0.3$)**

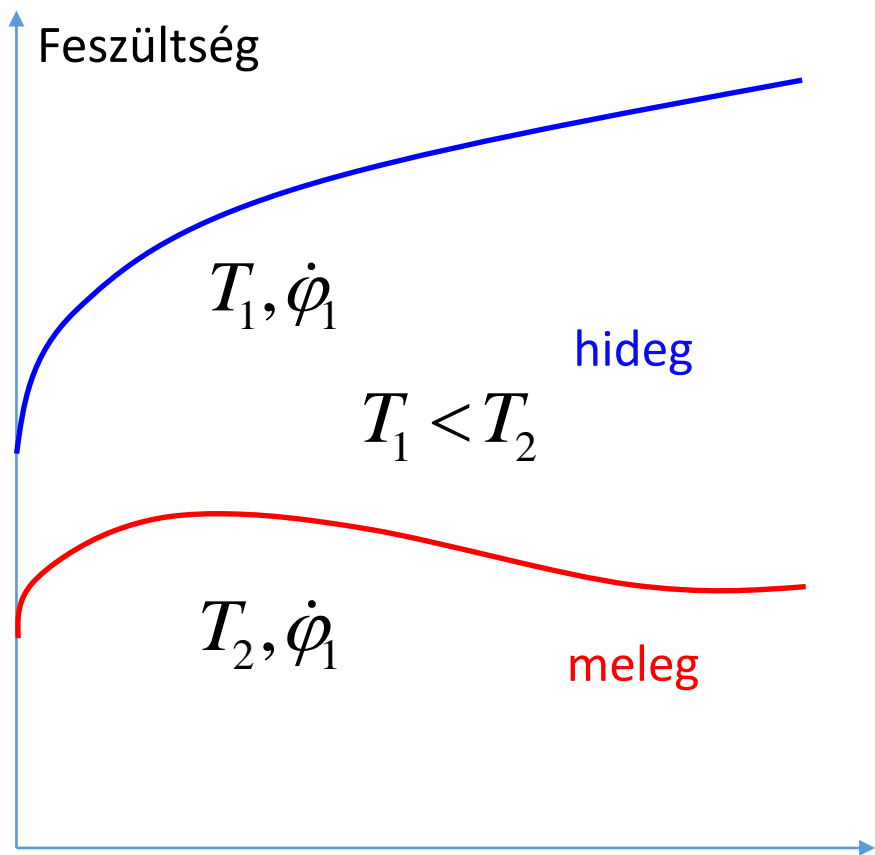
Keményedés, alakváltozási képesség fokozatos kimerülése, szemcsék megnyúlása, diszlokáció sűrűség növekedése. Méretpontosabb termék, jobb felületi minőség, nagyobb fajlagos szerszámterhelés. A nagymértékű hidegalakítás texturát eredményez.

- **Melegalakítás jellemzői ($T/T_{olv} > 0.6$)**

Lágyulási folyamatok (megújulás, rekrisztallizáció) zajlanak, az alakváltozási képesség kevésbé korlátozott, a mikroszerkezet változik. Öntött struktúra átalakítása. Kevésbé méretpontos termékek, rosszabb felületi minőség, hőterhelés, kisebb fajlagos mechanikai terhelés.

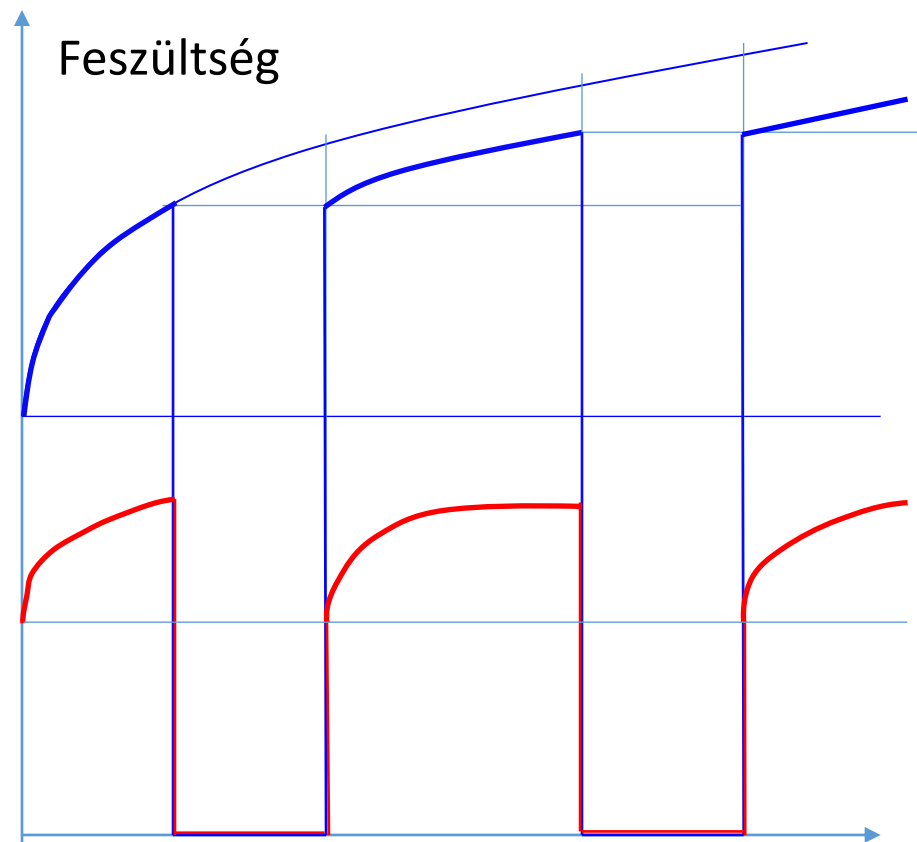
$$T_{\text{hideg}} < T_{\text{újra krist}} < T_{\text{meleg}}$$

Homológ hőmérséklet : (alakítás hőfoka K-ben) / (olvadáspont K-ben)

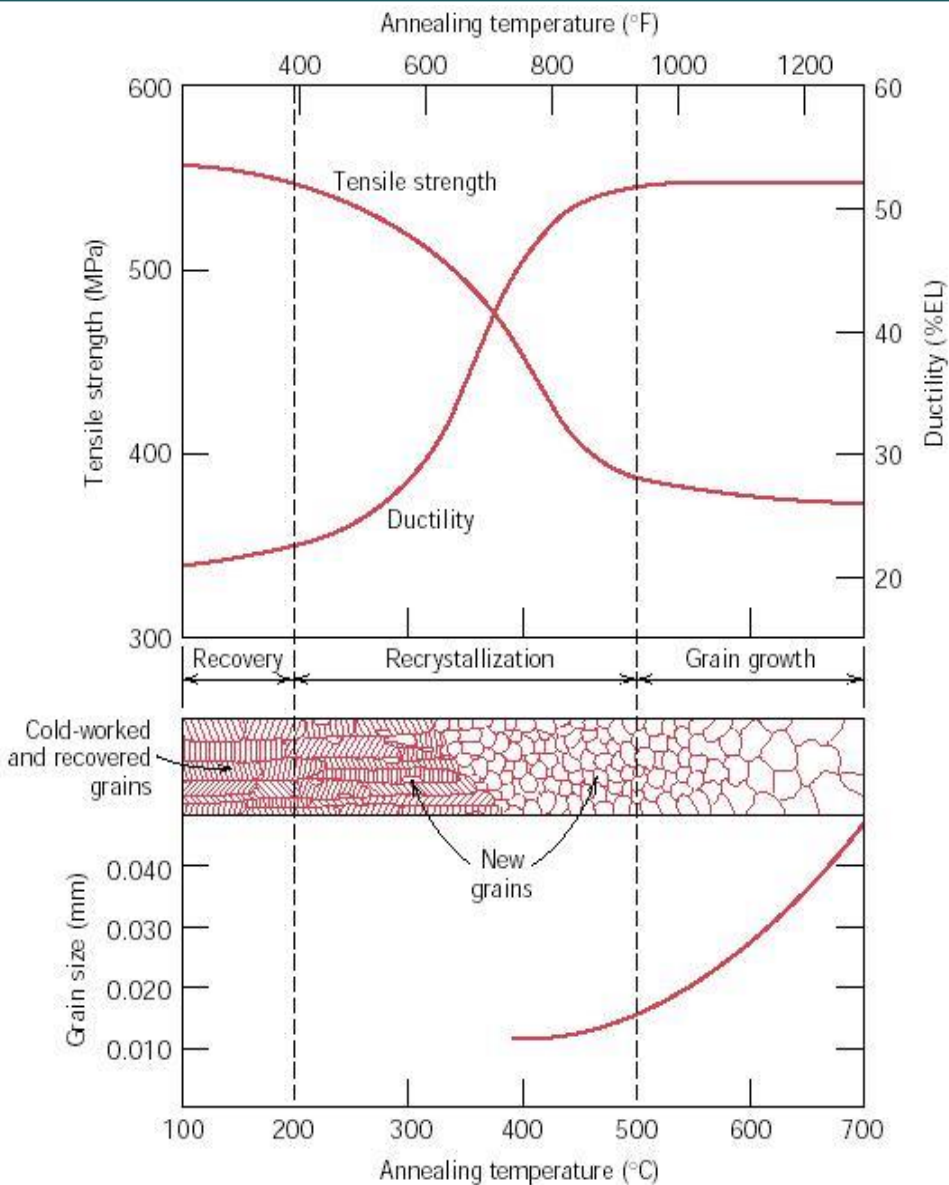


Képlékeny alakváltozás

Egylépéses alakítás



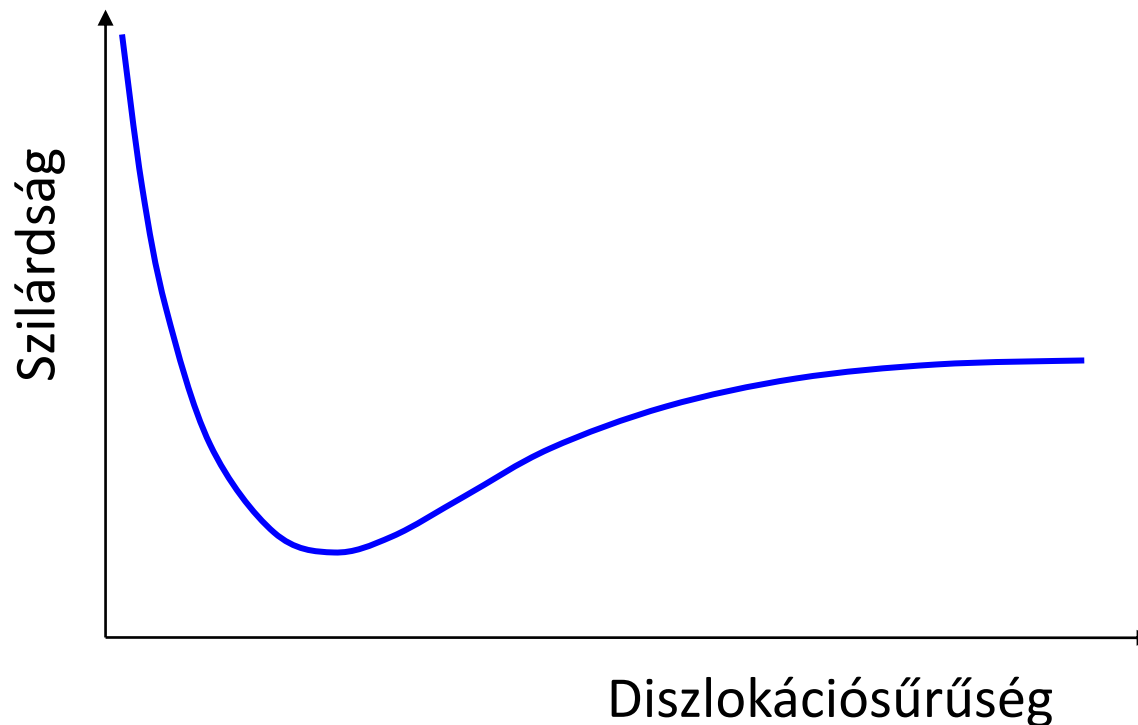
Többlépéses alakítás



Statikus : az alakítás és hőhatás folyamata (rekrisztallizáció) elválik egymástól.

Dinamikus: az alakítás és a hőhatás folyamata (rekrisztallizáció) együtt valósul meg.
Megújulás, poligonizáció és rekrisztallizáció kisebb hőmérsékleten és intenzívebben megy végbe.

- Képlékenyalakítás
- Szemcsefinomítás
- Ötvözés
- Alkalmas hőkezelési eljárások
 - a) kiválásos keményedés
 - b) diszperziós keményedés

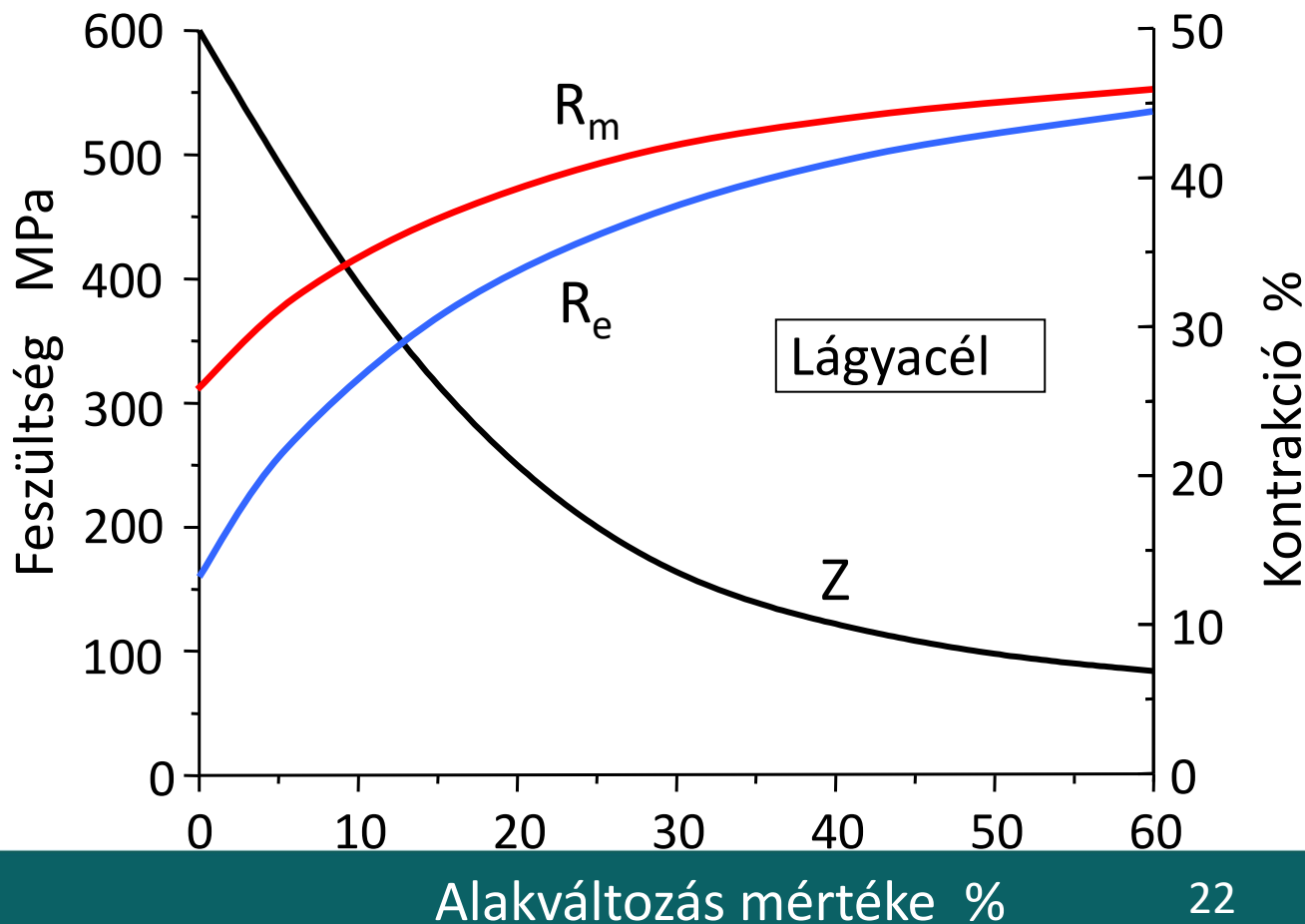


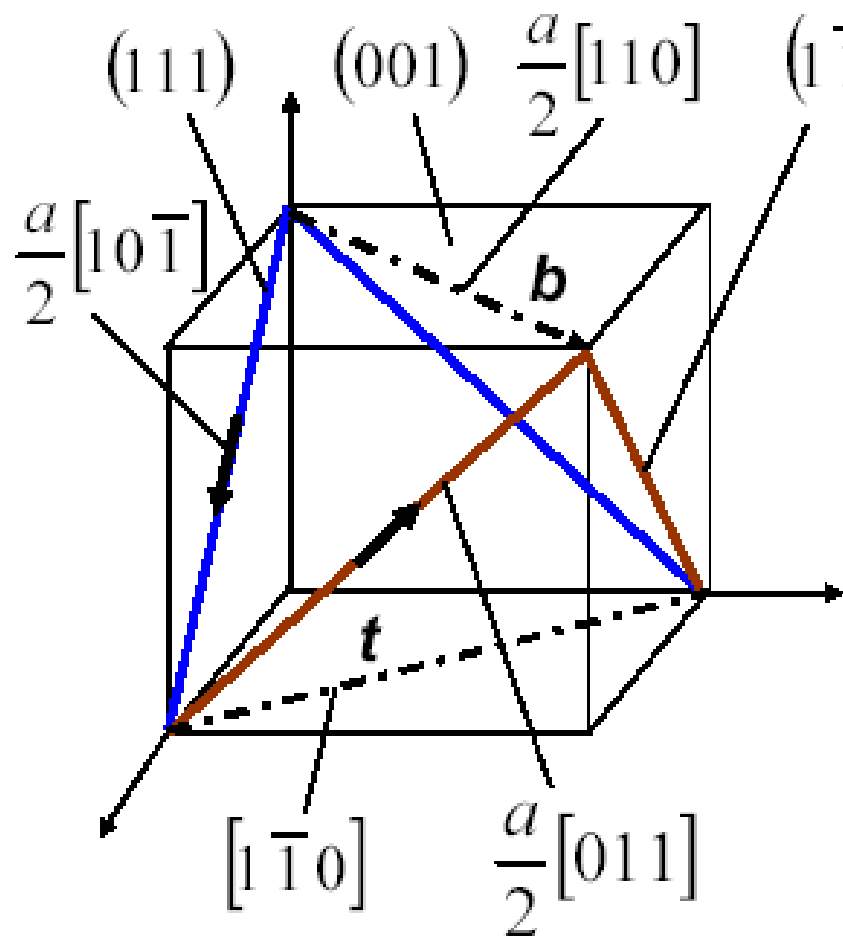
Hidegalakítás során megváltoznak a mechanikai jellemzők. Az anyag szilárdsága nő, képlékenysége és szívóssága csökken. Az aktuális folyáshatár, illetve a feszültség növekedése a következő egyenletekkel írható le:

$$\Delta\sigma = \alpha G b \sqrt{\rho} = \alpha G b \sqrt{\frac{\varepsilon}{bL}}$$

ahol α - keményedési kitevő,
 G – csúsztató rug. modulusz,
 ρ – diszlokációsűrűség
 L – diszlokációk szabad úthossza
 ε - alakváltozás

Mechanikai tulajdonságok változása

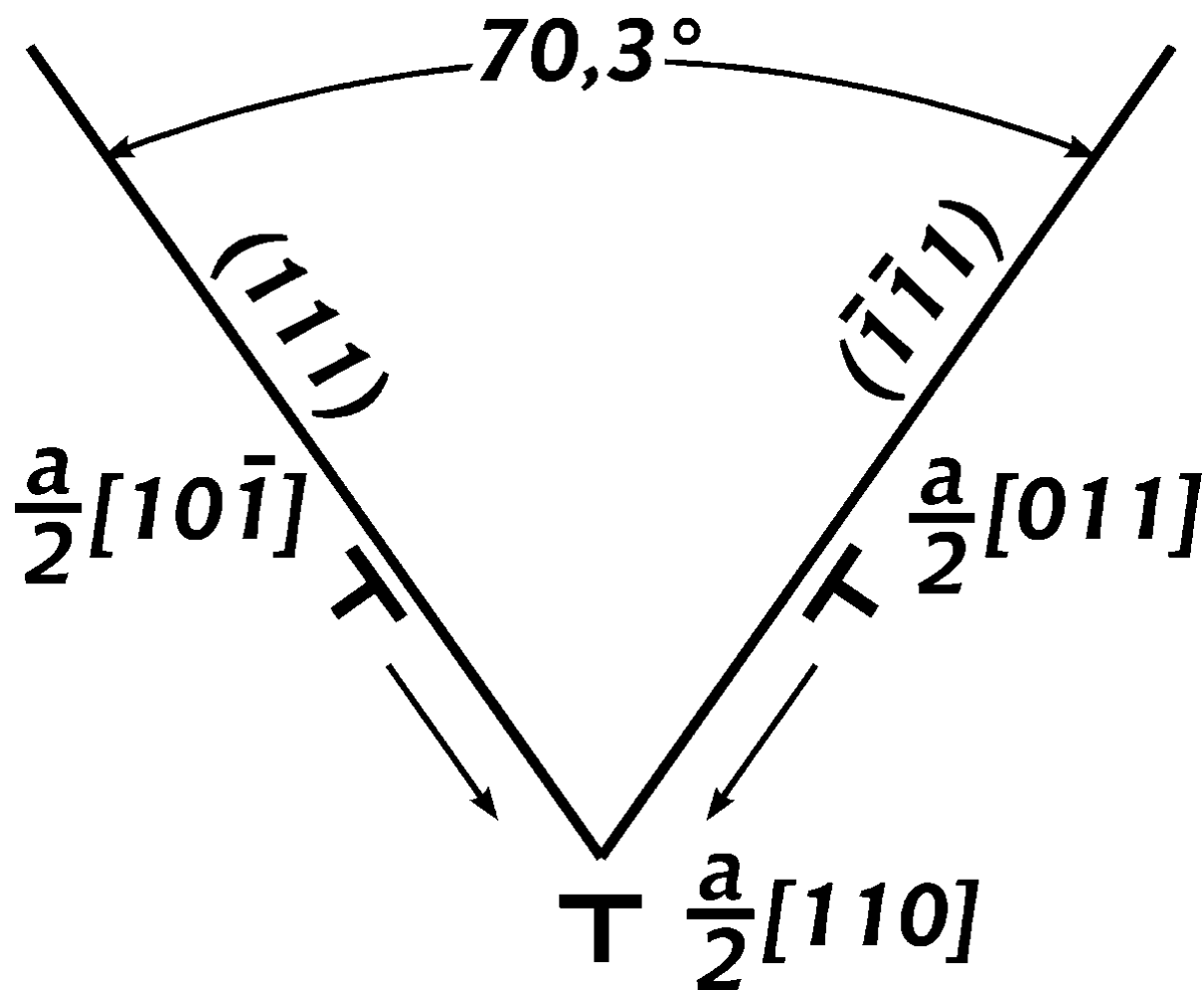




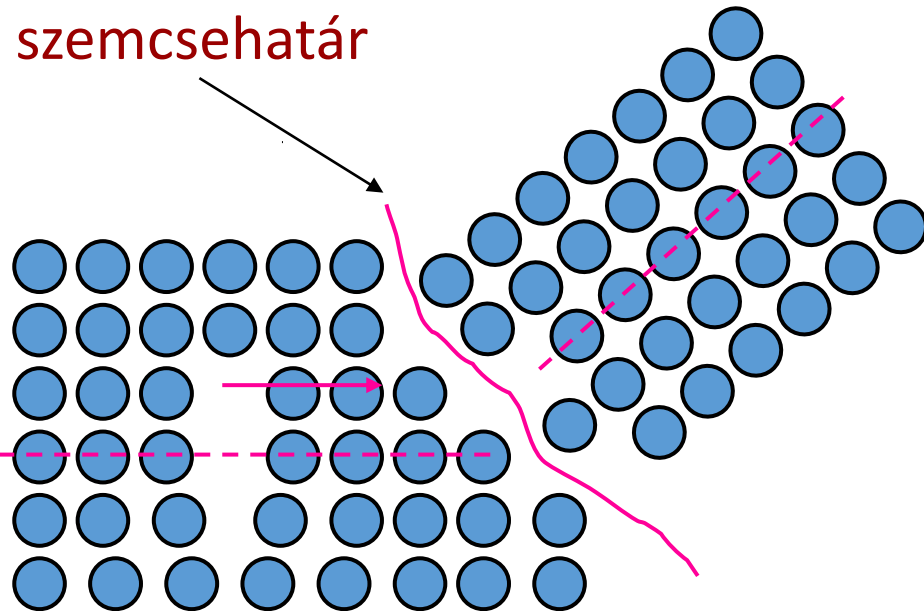
$$\frac{a}{2}[10\bar{1}]_{(111)} + \frac{a}{2}[011]_{(\bar{1}\bar{1}1)} \rightarrow \frac{a}{2}[110]_{(001)}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{t}}{|\mathbf{b} \times \mathbf{t}|}$$

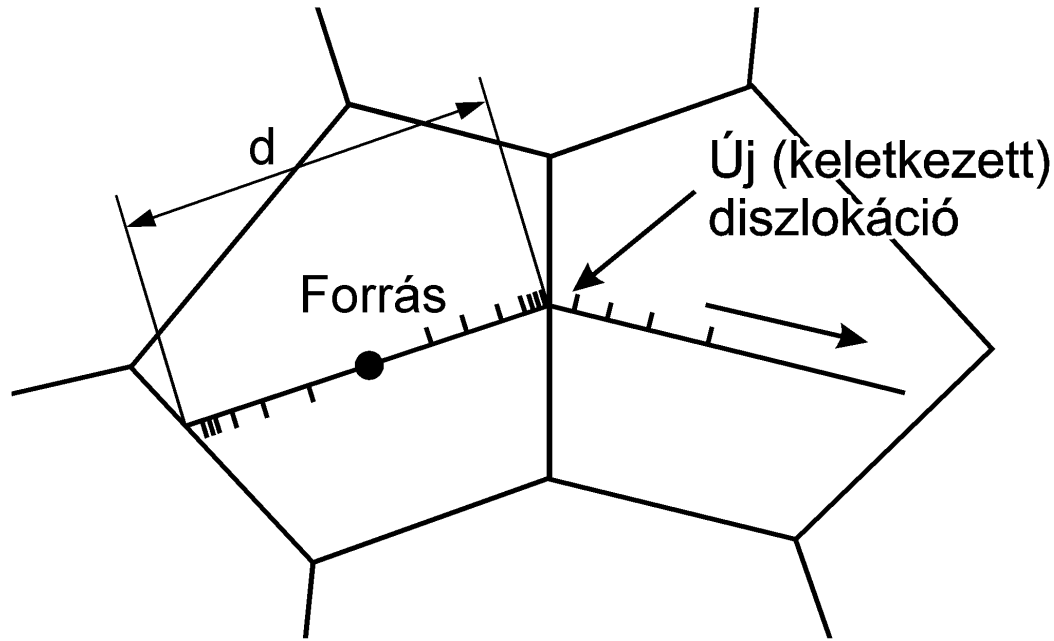
$$\mathbf{n} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ t_1 & t_2 & t_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \frac{2}{2} \mathbf{k}$$



- A keletkezett diszlokáció Burgers-vektora $a/2[110]$
- A keletkezett diszlokáció vonala a két eredeti csúszósík metszésvonala, az $[1-10]$ irány
- Így a keletkezett diszlokáció él típusú, mert a vonala merőleges a Burgers-vektorára
- Éldiszlokáció csúszósíkja a vonala és a Burgers-vektora által meghatározott sík, esetünkben a (001) sík
- A (001) sík nem csúszósík az FKK rendszerben, vagyis az így keletkezett diszlokáció nem lesz mozgásképes



A szomszédos kristallitok egymástól eltérő orientációja miatt a szemcsehatárok akadályozzák a diszlokációk mozgását az egyik szemcséből a másikba.



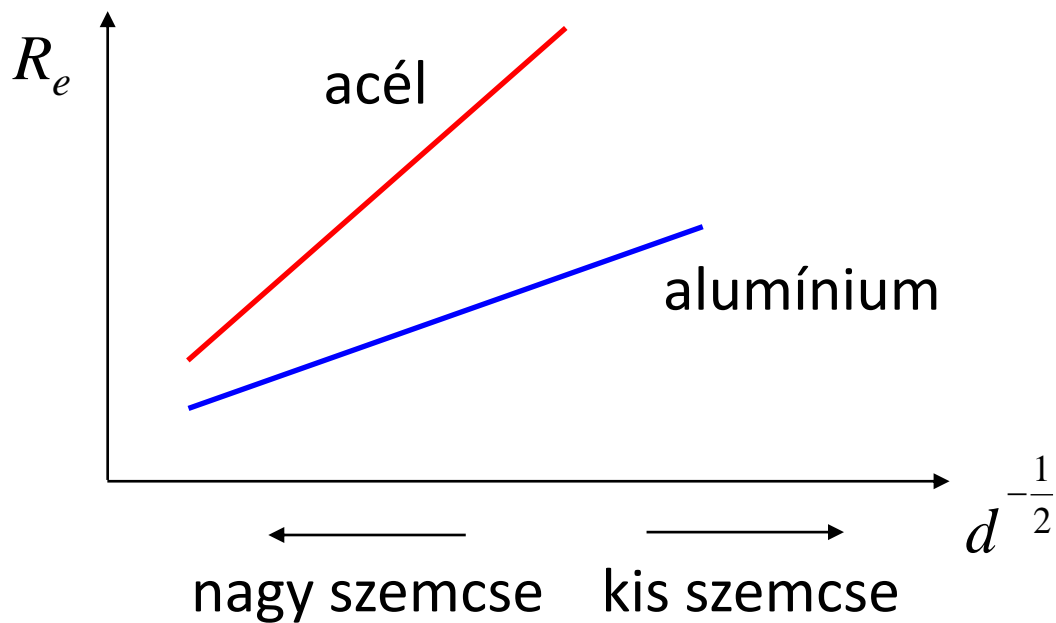
Hall-Petch egyenlet
(alsó folyáshatár)

$$\sigma_{polikr} = \sigma_{egykr} + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

A határon felhalmozódó diszlokációk feszültségtere (feszültségcsúcs) indítja meg az alakváltozást a szomszédos kristallitban.

Szemcseméret $\uparrow \Rightarrow$ szemcsehatáron felhalmozódó diszlokációk száma \uparrow

Inhomogén alakváltozás



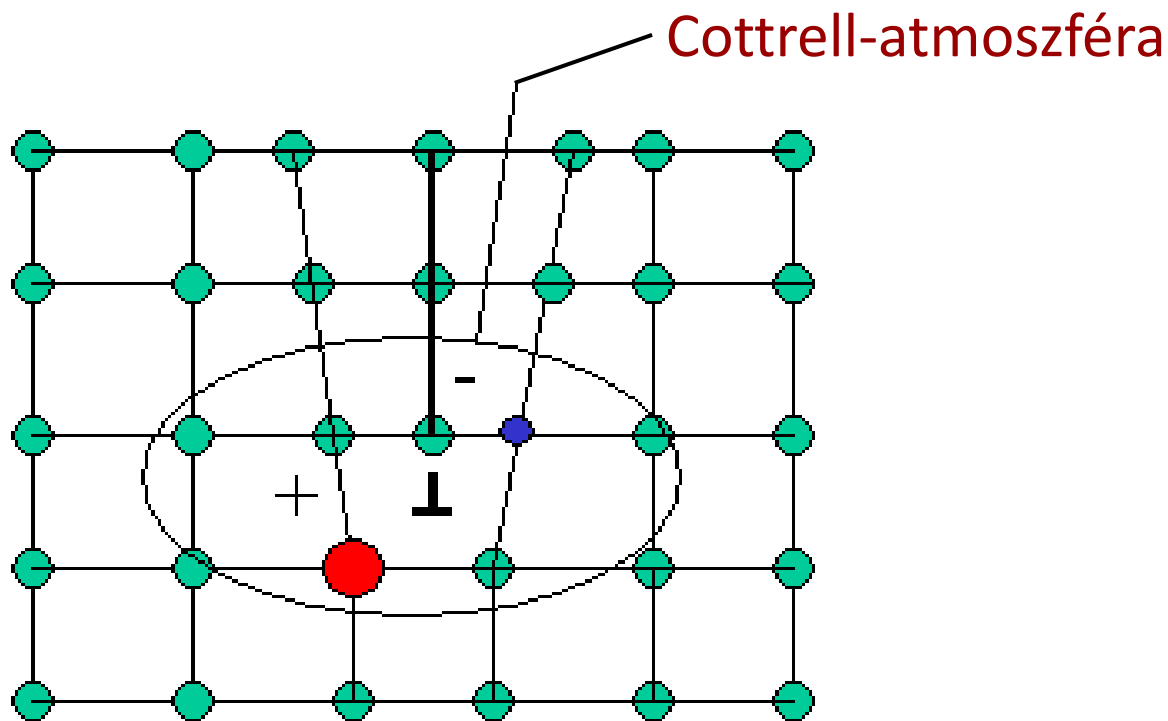
Hall-Petch-egyenlet

$$R_e = R_{e0} + kd^{-\frac{1}{2}}$$

R_{e0} - egykristály folyási határa,

d - szemcseátmérő,

k - anyagtól függő állandó



Szilárdoldatos keményítésnél az ötvözőatomok egy része a diszlokáció környezetében helyezkedik el. Az alapfém atomjainál kisebb atomok a csúszósík felett (a nyomott zónában), a nagyobbak a csúszósík alatt (a húzott zónában) helyezkednek el, ez a Cottrell-atmoszféra.

A szilárdságnövelés alapvető oka, hogy az oldott atomok torzítják a rácsot, ezzel növelik a rács energiatartalmát. További ok, hogy a diszlokációkat nehéz leszakítani a Cottrell-atmoszféráról.

Az ötvözőatomok szilárdságnövelő hatása:

$$\Delta\sigma = G \left(\frac{r - r_0}{r_0} \right)^2 C$$

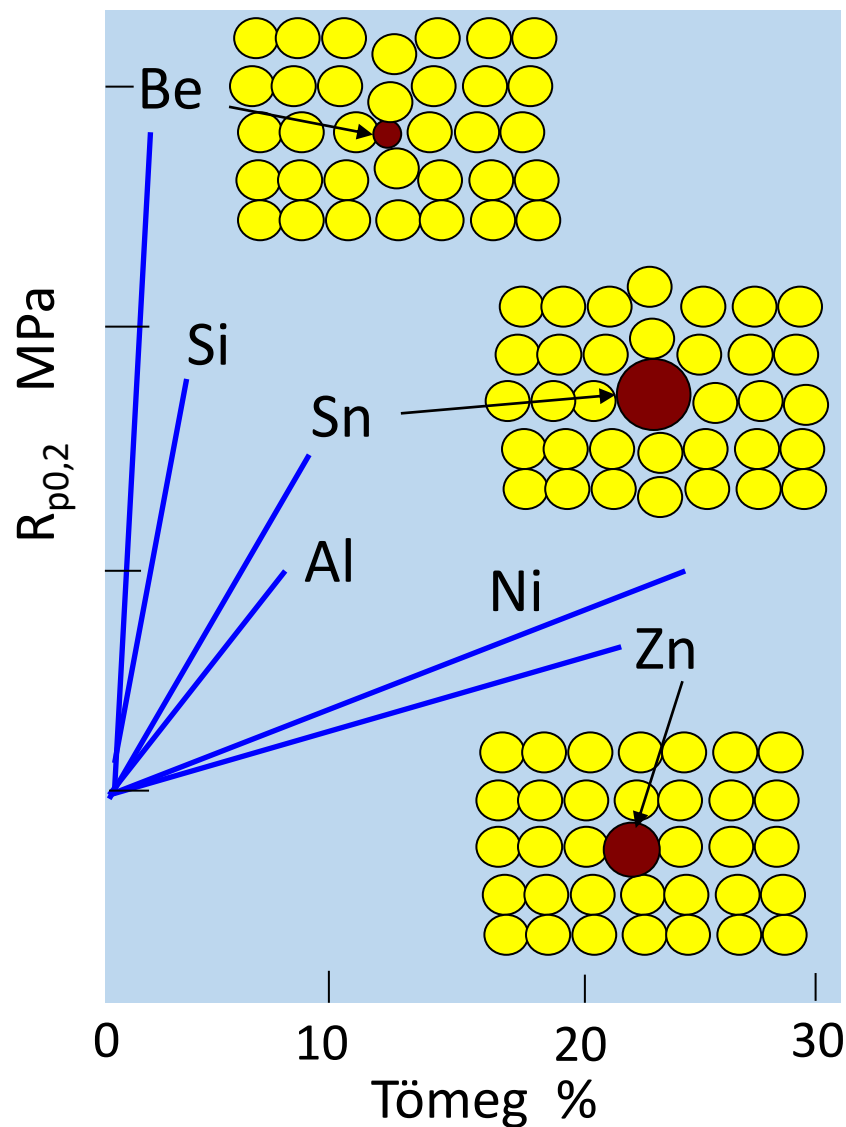
ahol G – a csúsztató rugalmassági modulusz

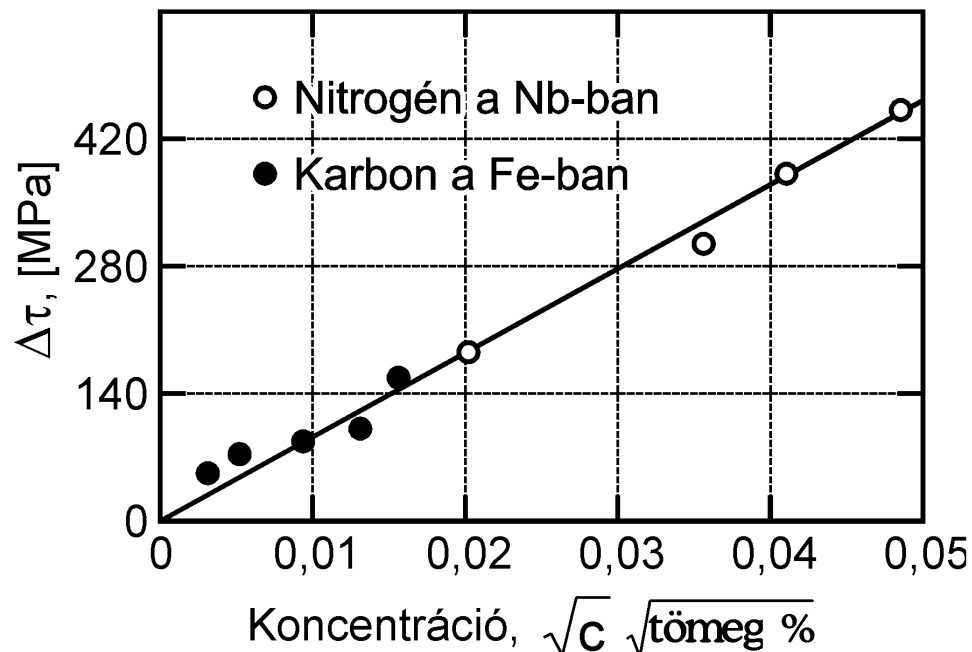
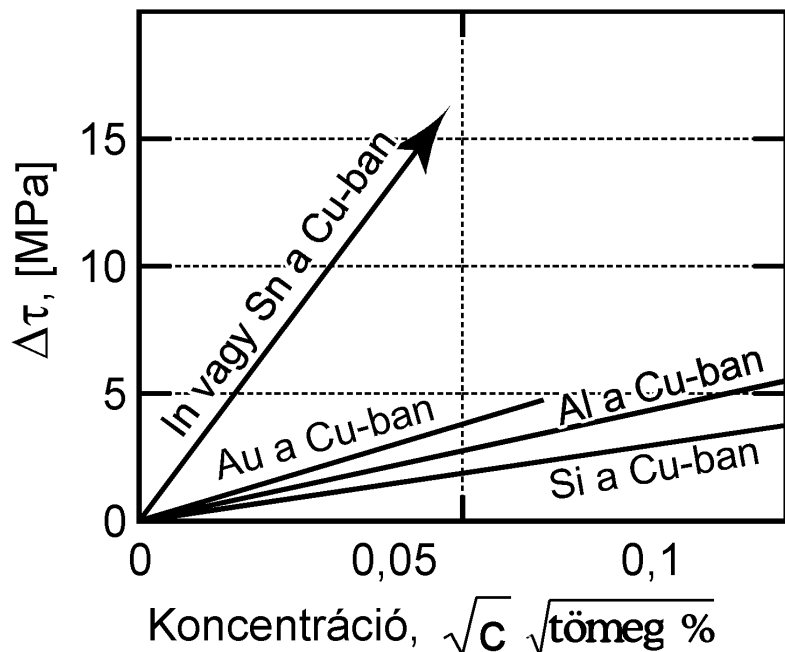
C – az ötvöző atom koncentrációja

r_0 – az alapfém atomsugara

r – az ötvöző fém atomsugara.

Fém	sugár nm	$(r-r_{Cu})/r_{Cu} * 100$
Cu	0.1278	---
Zn	0.1332	4,2 %
Al	0.1432	12,0 %
Sn	0.1509	18,1 %
Ni	0.1243	-2,7 %
Si	0.1176	-8,0 %
Be	0.114	-10,8 %



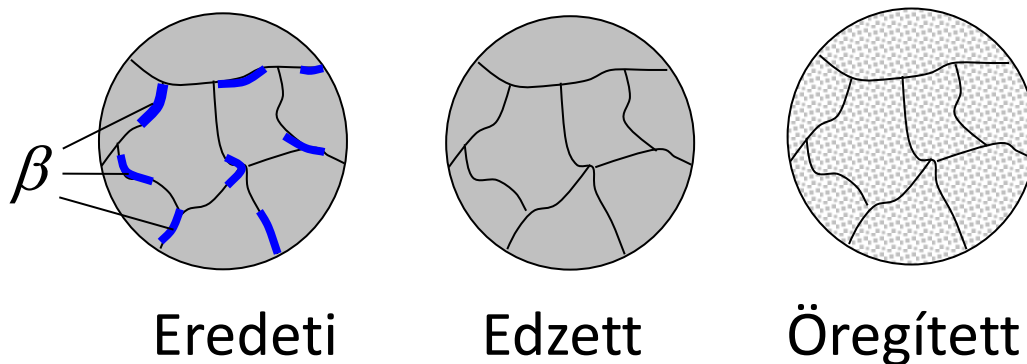
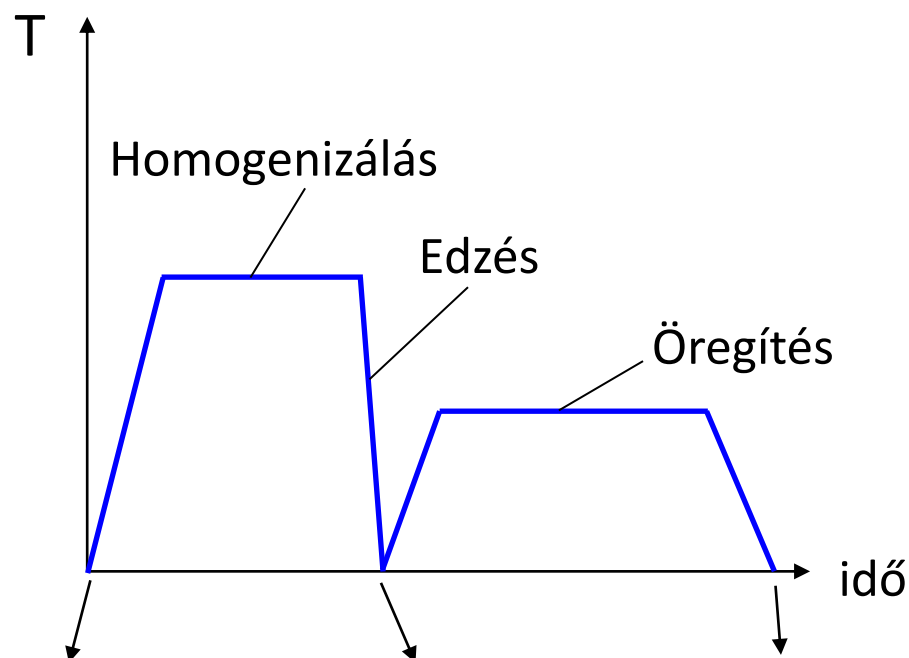
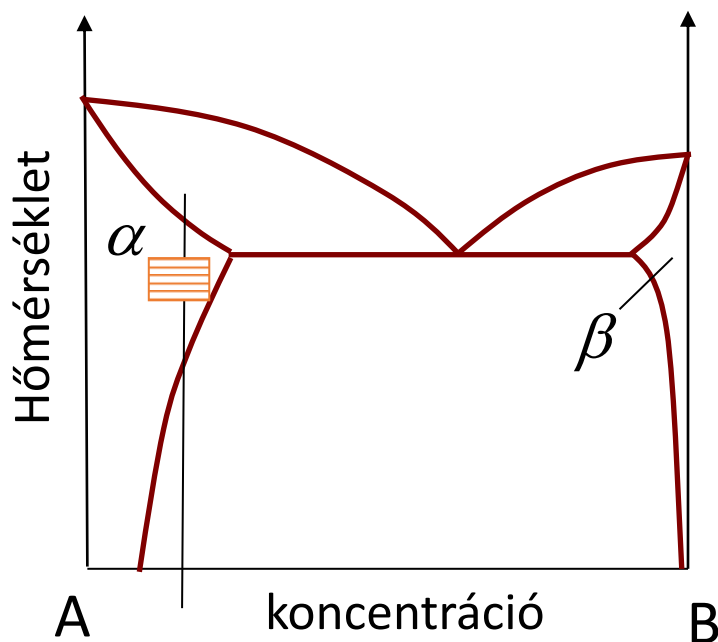


Az interstíciós ötvözők szilárdságnövelő hatása (nagyságrenddel) erősebb, mint a szubsztitúciós ötvözőké.

Feltételek (binér rendszerben)

- Az egyik alkotó szilárd állapotban korlátoltan, de jelentős mértékben oldódik a másikban.
- Az oldódás mértéke a hőmérséklettel csökken.
- Az oldó fém lágy és szívós.
- A kiváló fázis kemény és szilárd.
- A kiválás kezdetben koherens.

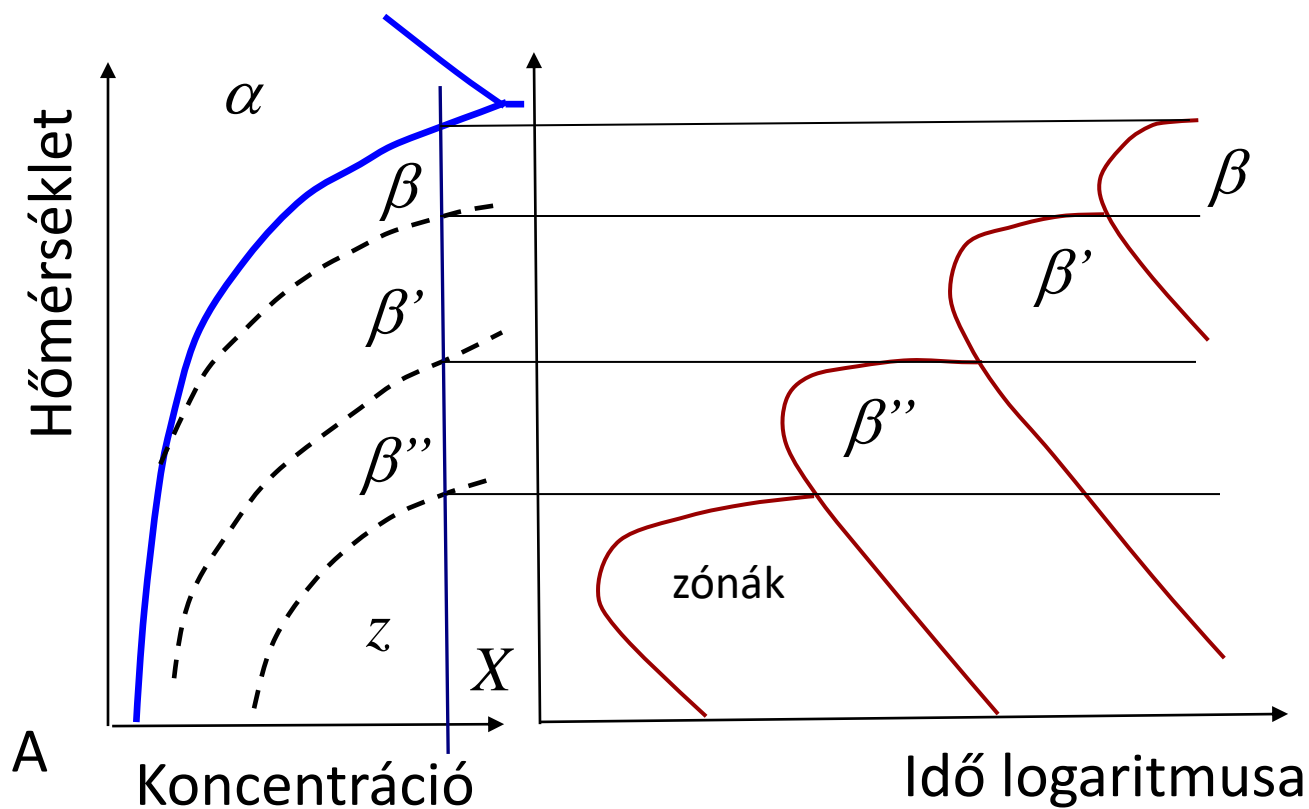
Példák: Cu-Al, Cu-Be, Cu-Sn, Mg-Al, Al-Ag, Ti-Al

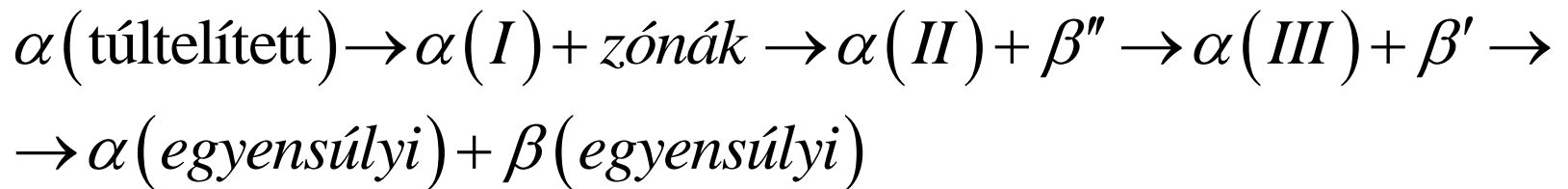
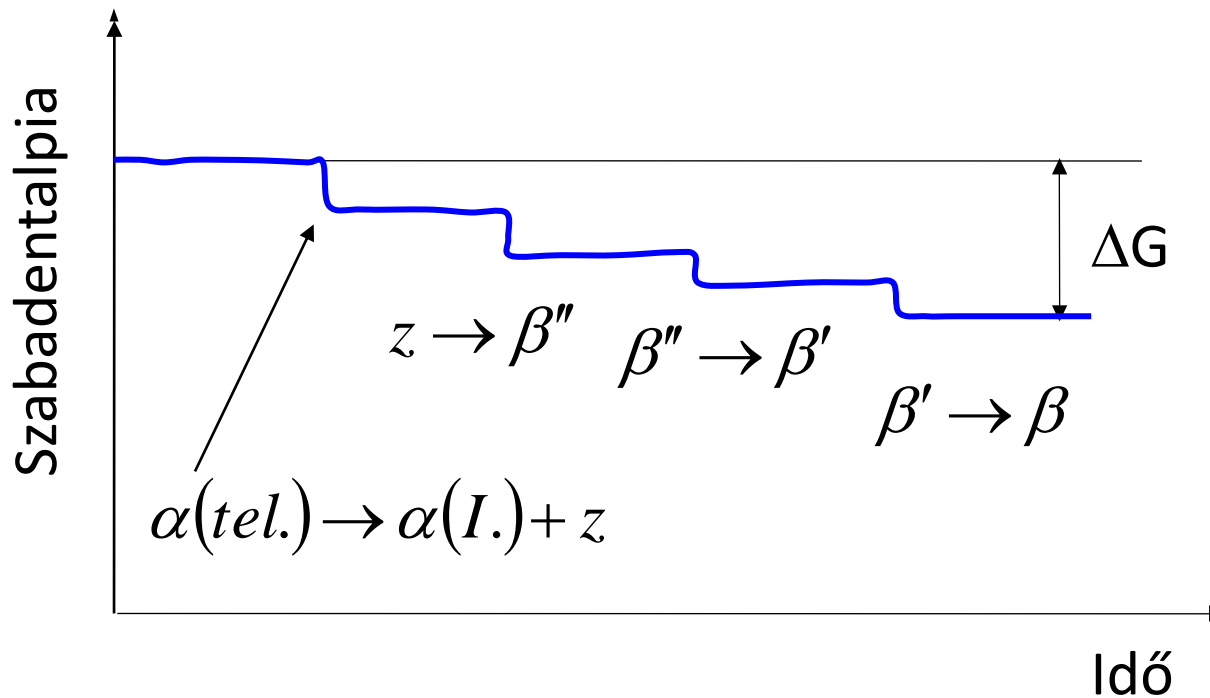


Mesterséges és természetes öregítés

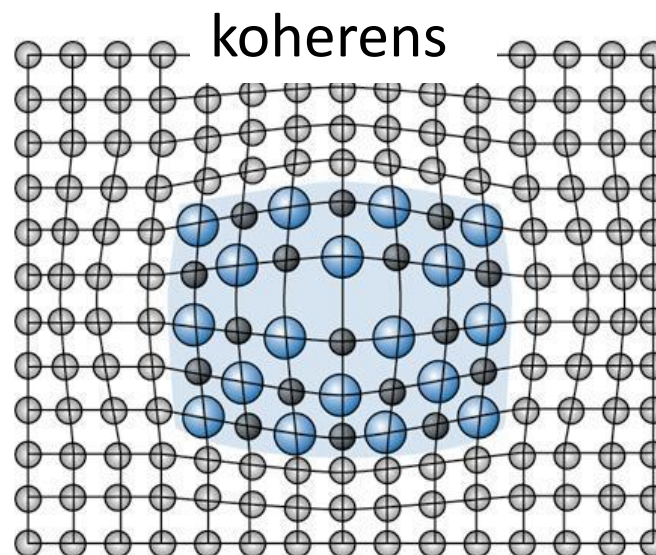
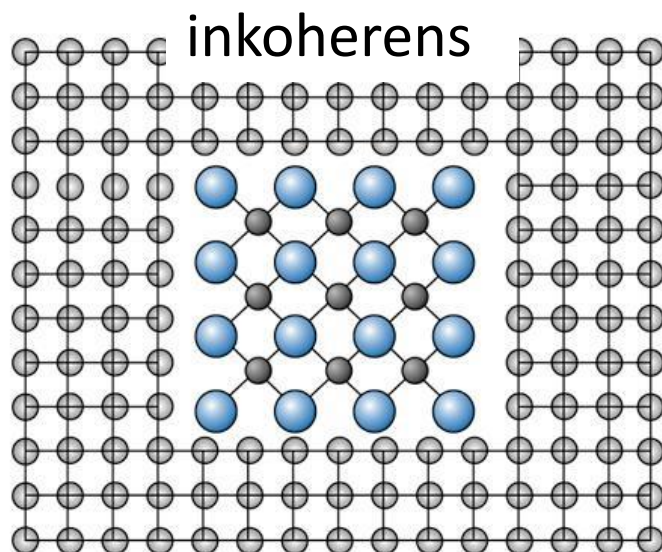
Oldódási görbék

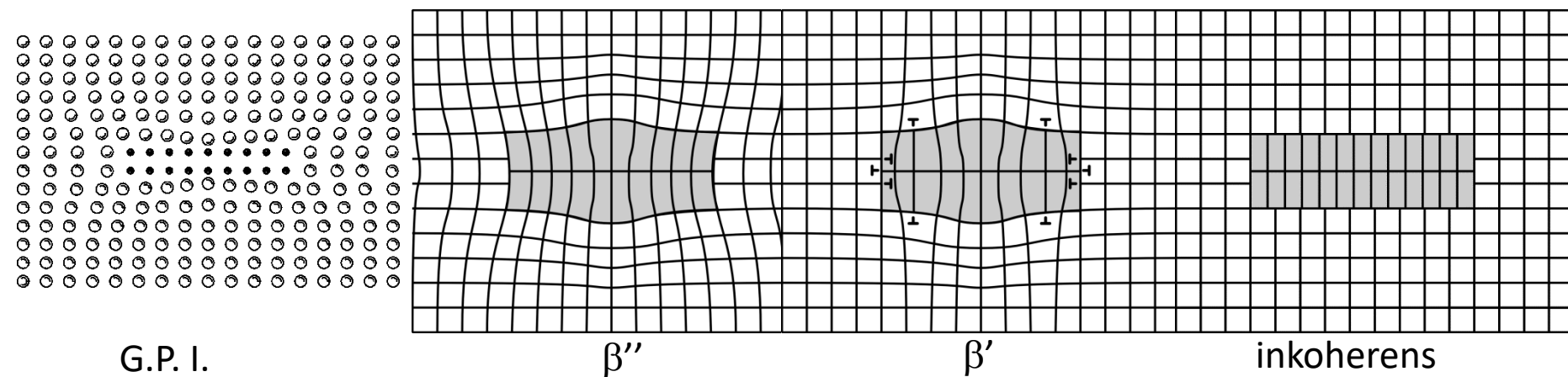
Kiválások kezdeti görbéi

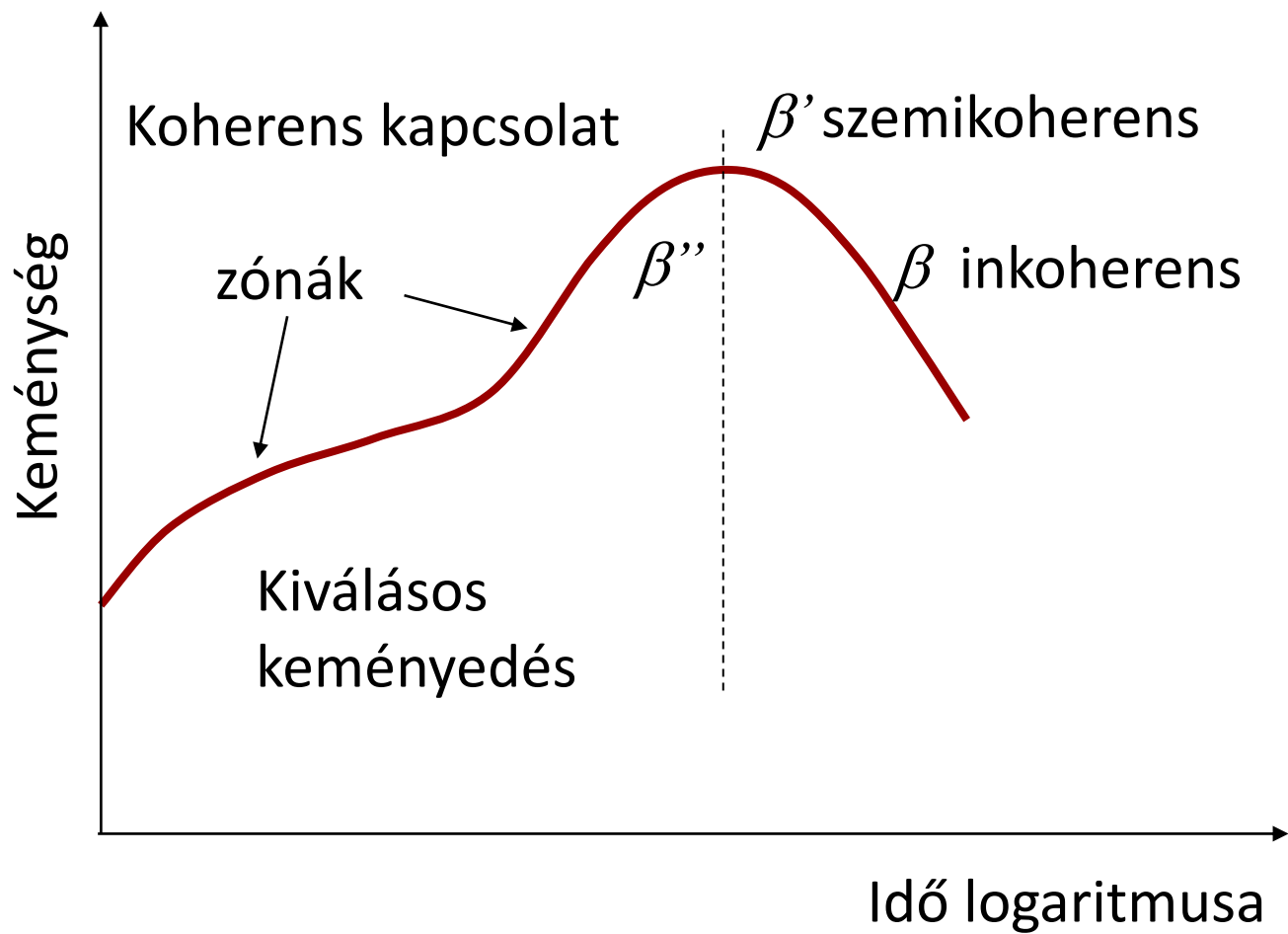




- Zóna** – néhány atom vastagságú oldott atom rétege a mátrixanyag meghatározott kristálytani síkján;
- β'' – vékony, korongszerű, a mátrixhoz koherensen csatlakozó, az egyensúlytól eltérő összetételű fázis;
- β' – korongszerű, a mátrixhoz szemikoherensen csatlakozó, az egyensúlytól eltérő összetételű fázis;
- β – a mátrix kristálytani szerkezetétől eltérő, ahhoz inkoherensen csatlakozó egyensúlyi összetételű fázis.



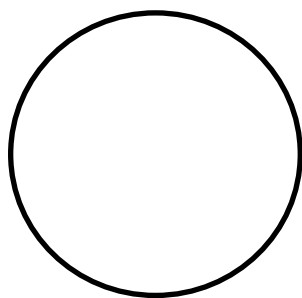




Mérethatás: a mátrix és a kiválás rácsparamétere eltérő, ezért rugalmas feszültségtér jön létre a kiválás környezetében. Elsősorban a zónák létrejöttékor fejt ki a hatását.

Határfelületi hatás: új felület jön létre, ha diszlokáció metszi a kiválást, a diszlokáció mozgatásához szükséges erő megnő.

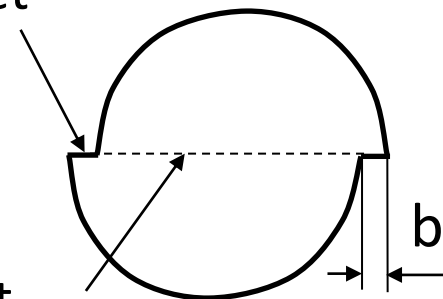
Kezdeti állapot



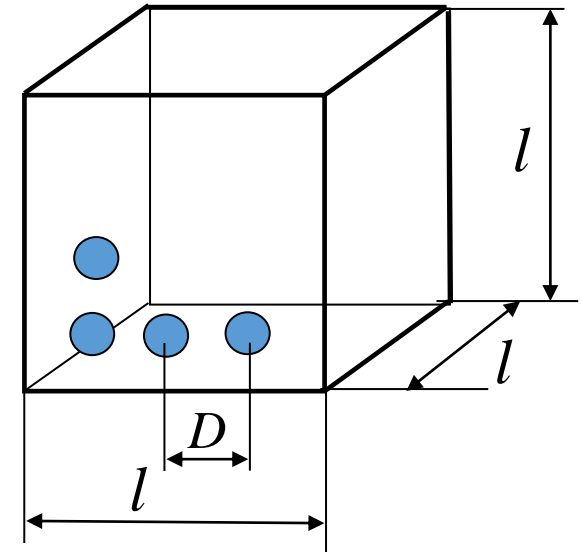
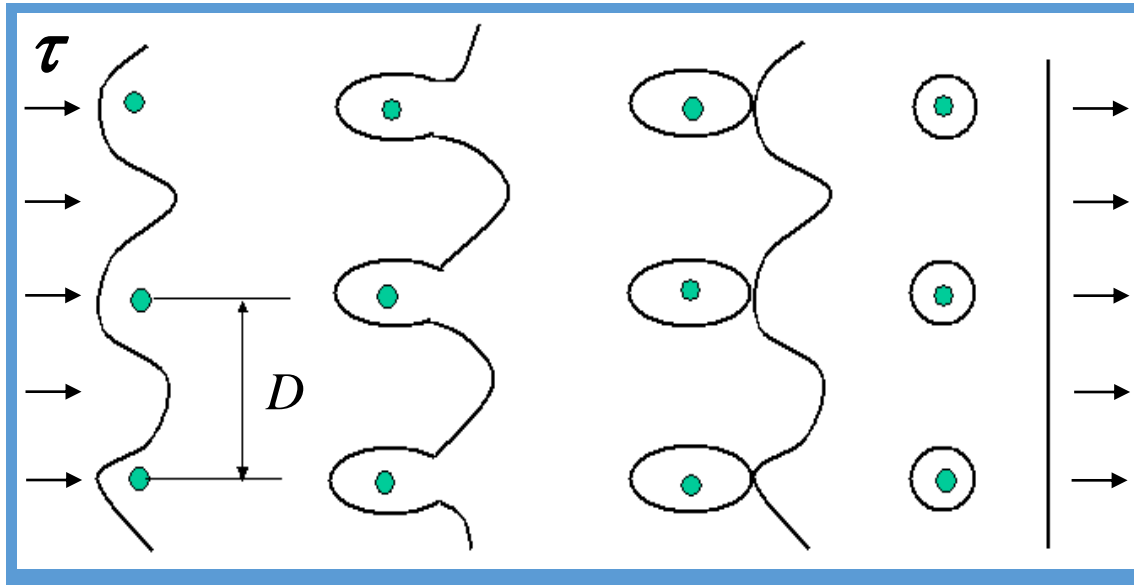
$$\text{Felületi energia} = 2\pi r b \gamma$$

Új felület

Belső felület

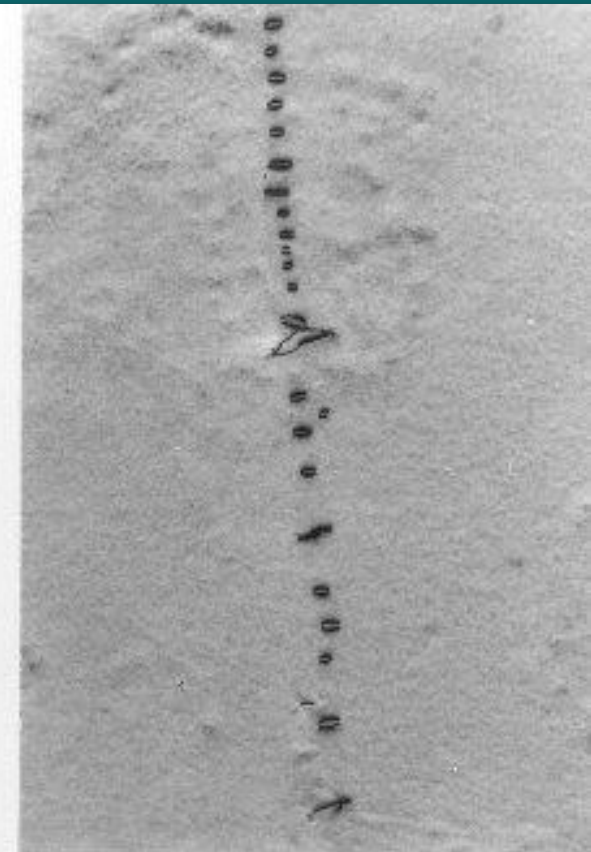


Modulusz hatás: a mátrix és a kiválás rugalmassági modulusza eltérő, ezért nagyobb feszültség szükséges a diszlokáció mozgatásához, ha az megközelíti a kiválást.

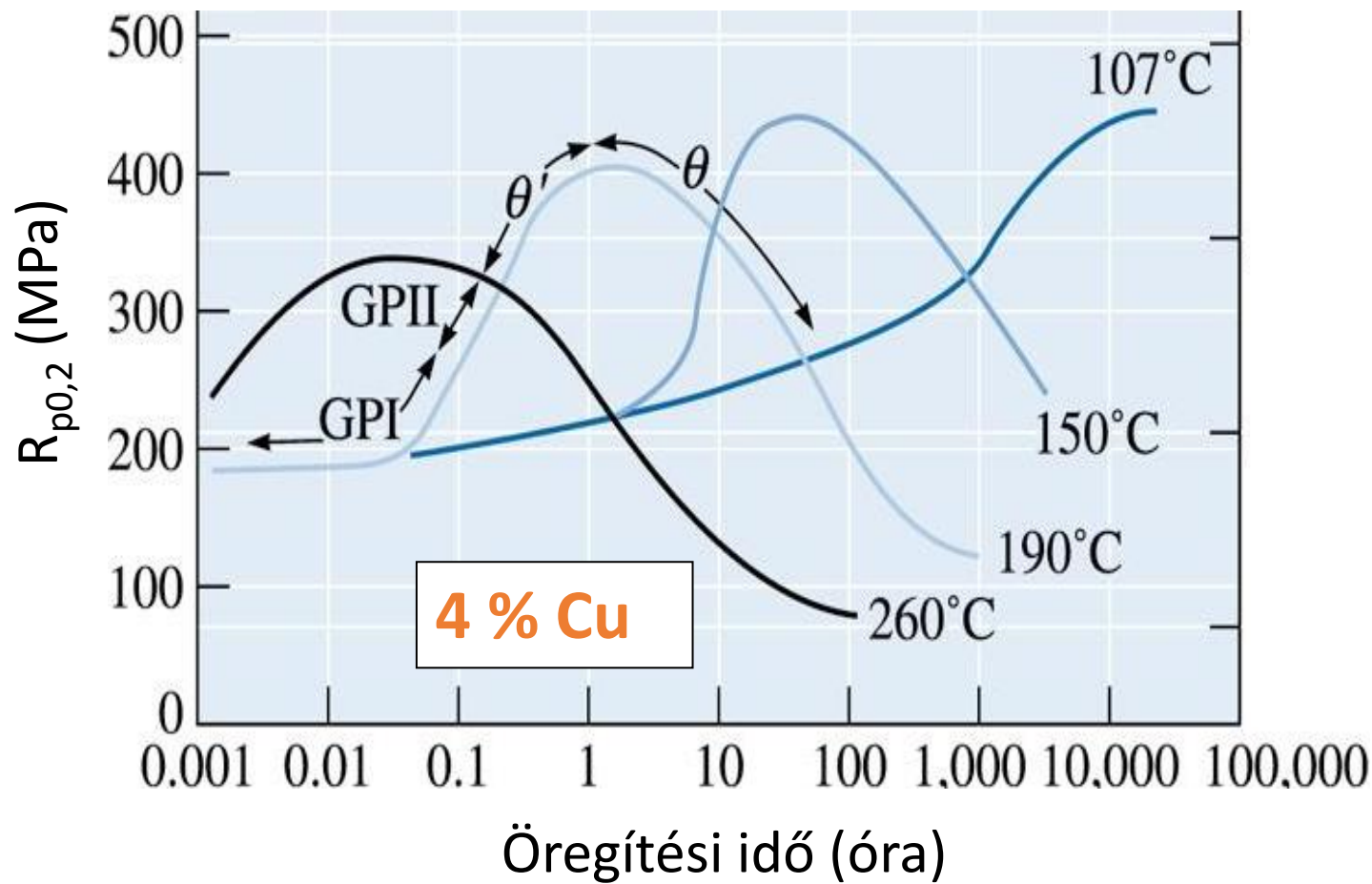


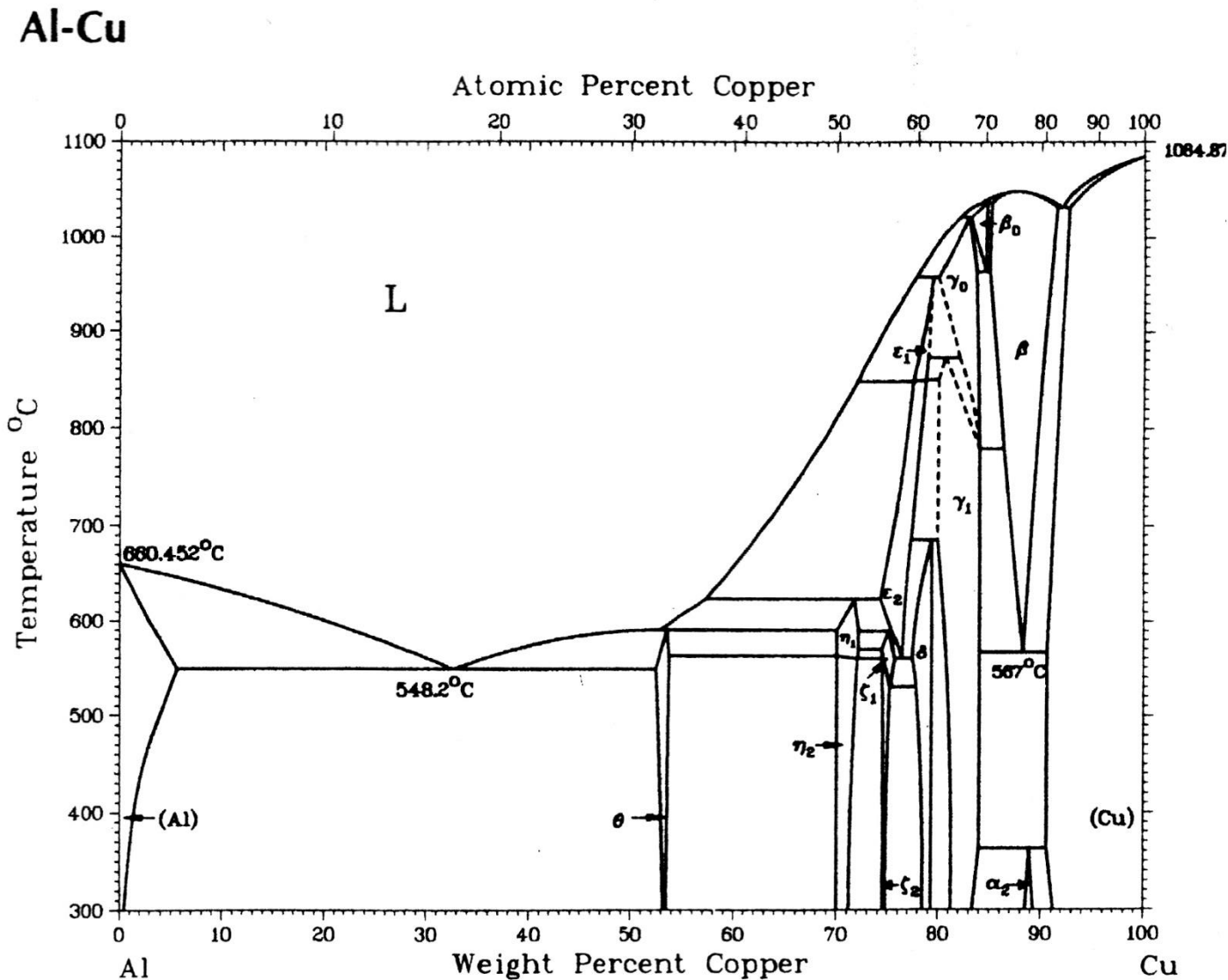
A szilárdság növekedése: $\Delta\sigma = \frac{Gb}{D} \rightarrow \Delta\sigma = K \frac{Gb}{r} \sqrt[3]{C}$

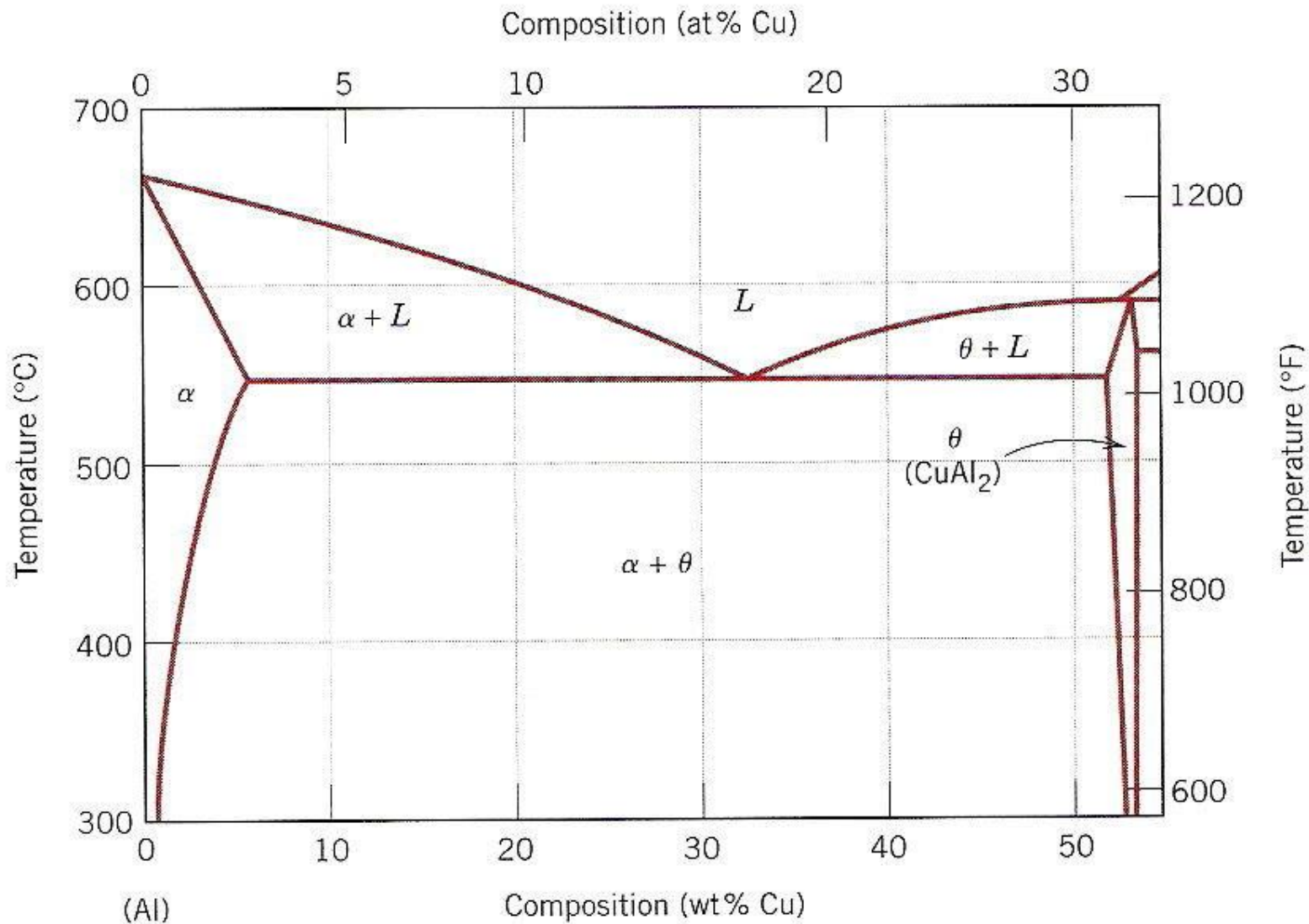
ahol $C = \frac{Nv_k}{V} = \frac{N}{l^3} \frac{4}{3} r^3 \pi$, $N = (l/D)^3$, $D = \left(\frac{4\pi}{3C} \right)^{\frac{1}{3}} r$



Diszlokáció-hurkok létrejötte







- A hőmérséklet növelésével a kiválások mennyisége csökken, mert az ötvözőatomok oldatba mennek
- A szilárdság csökken
- Az ötvözetet csak egy kritikus hőmérsékletig lehet alkalmazni
- Megoldás: a kiválások száma ne függjön a hőmérséklettől

Diszperziós ötvözetek:

- porkohászat (sajtol + izzít, HIP): $\text{Al} + \text{SiO}_2$, $\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$
- belső oxidáció (O_2 atmoszférában izzít): $\text{Al} - \text{Si}$, $\text{Cu} - \text{Al}$
- Előny: fázisarányt (tulajdonságokat) a hőmérséklet nem változtatja meg \leftrightarrow kiválósan nemesített ötvözetek

- Tulajdonságváltozás hidegalakításkor
- Megújulás lépései
- Poligonizáció jelensége
- Rekrisztallizációt befolyásoló folyamat paraméterek
- Rekrisztallizációt befolyásoló mikroszerkezeti paraméterek
- Hideg és meleg alakítás
- Homológ hőmérséklet
- Hideg és melegalakító eljárások

- A képlékenyalakítás szilárdságra gyakorolt hatása
- A szemcsehatár szerepe az anyag szilárdságára
- A szemcseméret hatása, a Hall–Petch-egyenlet
- Cottrell-atmoszféra
- Az ötvözők szilárdságra gyakorolt hatása
- A kiválásos keményedés feltételrendszere
- A kiválások szerkezete
- A keménységváltozás folyamata
- A kiválásos keményedés mechanizmusai
- Természetes és mesterséges öregítés
- Diszperziós keményedés