


 Anyagtudomány és Technológia Tanszék
 

## Fázisátalakulások, hőkezelések II.

(Újrakristályosodás, hideg- és melegalakítás, szilárdságnövelő eljárások)

Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat  
BMEGEMTBGA1

1

---

---

---



---

---

---

---

---


 Az előadás során megismerjük
 

- 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;
- Jellemzőes képlékeny alakító eljárásokat.

2

---

---

---



---

---

---

---

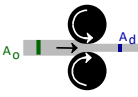
---


 Hidegalakítás
 

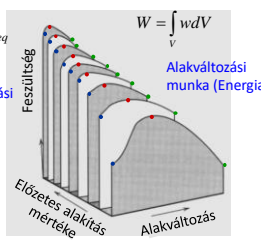
**Hengerlés**

$w = \int_0^{\phi} \sigma_{eq} d\phi_{eq}$

$W = \int_V w dV$



$q = (A_0 - A_d) / A_0 * 100 \%$   
 $q \approx (h_0 - h_d) / h_0 * 100 \%$



A szilárdság nő, a szívósság csökken.  
A rácshibasűrűség és a felhalmozott energia nő.

3

---

---

---

---

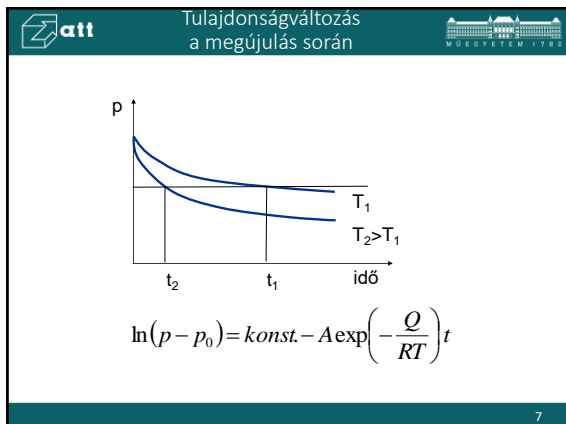
---

---

---

---






---

---

---

---

---

---

---

---

7




---

---

---

---

---

---

---

---

8




---

---

---

---

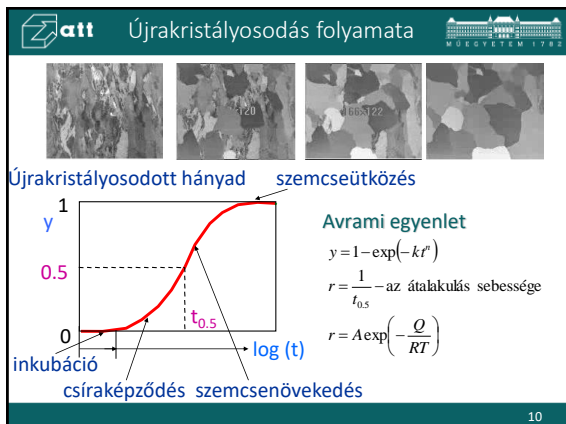
---

---

---

---

9



10

---

---

---

---

---

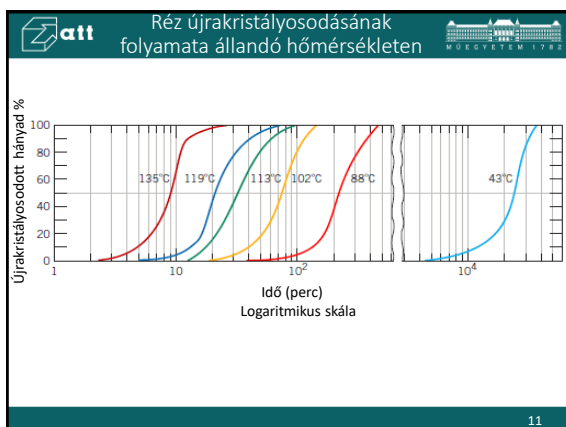
---

---

---

---

---



11

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** A rekristallizációt befolyásoló tényezők MŰSZEREM 1782

- **Folyamat paraméterek**
  - Hőmérséklet (termikusan aktivált folyamat);
  - Hevítés sebessége (nagyobb hevítési sebesség → nagyobb rekristallizáció sebesség);
  - Hevítés ideje;
  - Alakváltozás mértéke;
  - Alakváltozás sebessége.
- **Mikroszerkezeti tényezők**
  - Kezdeti szemcsenagyság (finomabb kiinduló szemcse → finomabb rekr. szemcse, nagyobb rekristallizáció sebesség);
  - Második fázisú részecskék mérete, eloszlása, kapcsolódása az alapszerkezethez;
  - Oldott anyagok mennyisége és minősége;
  - Alakítás előtti és utáni textúra.

12

12

---

---

---

---

---

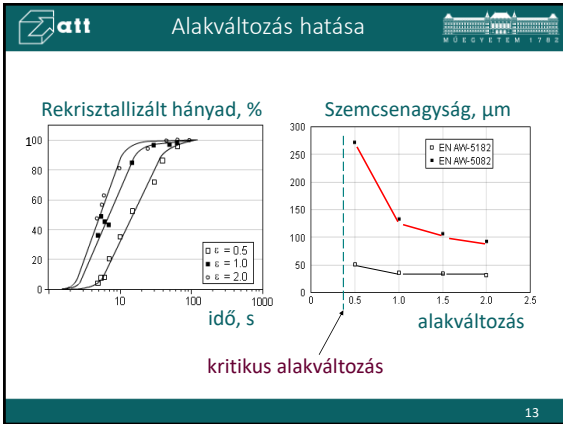
---

---

---

---

---



13

---

---

---

---

---

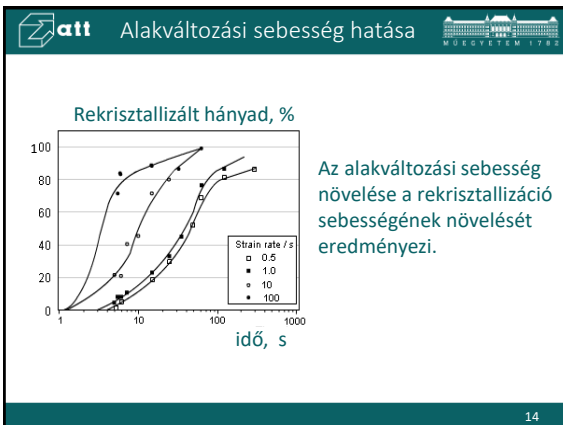
---

---

---

---

---



14

---

---

---

---

---

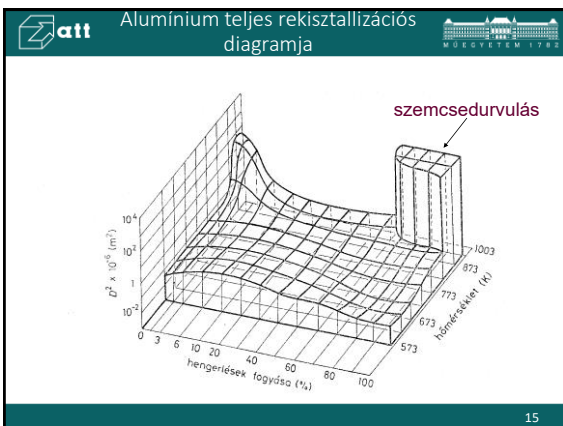
---

---

---

---

---



15

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** A rekrisztallizáció törvényszerűségei 

- 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 szemcse nagyság növekedésével,
  - az alakítás hőfokának növekedésével.

16

16

---

---

---

---

---


---

---

---

---

---

**att** Hideg- és melegalakítás 

- **Hidegalakítás jellemzői** ( $T/T_{olv} < 0.3$ )  
Keményedés, alakváltozási képesség fokozatos kimerülése, szemcsék megnyúlása, diszlokáció sűrűség növekedése. Méret pontosabb 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 mikro szerkezet változik. Öntött struktúra átalakítása. Kevésbé méret pontos termékek, rosszabb felületi minőség, hőterhelés, kisebb fajlagos mechanikai terhelés.

$$T_{\text{hideg}} < T_{\text{újrakrist}} < T_{\text{meleg}}$$

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

17

17

---

---

---

---

---

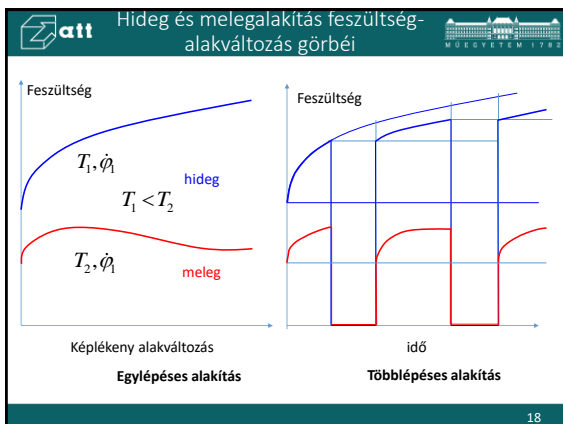
---

---

---

---

---



18

---

---

---

---

---

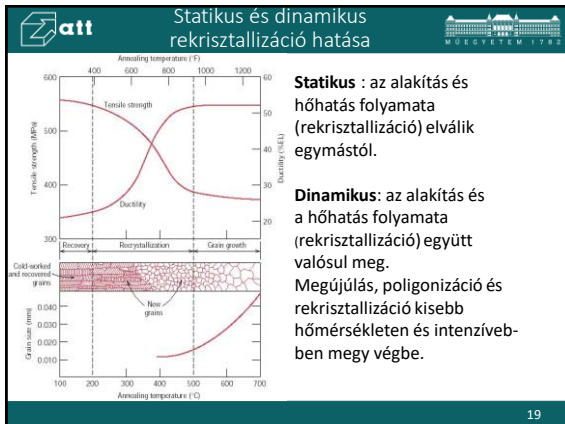
---

---

---

---

---



19

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

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

20

---

---

---

---

---

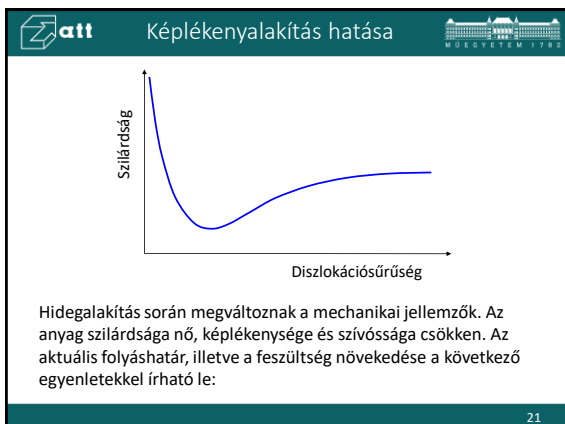
---

---

---

---

---



21

---

---

---

---

---

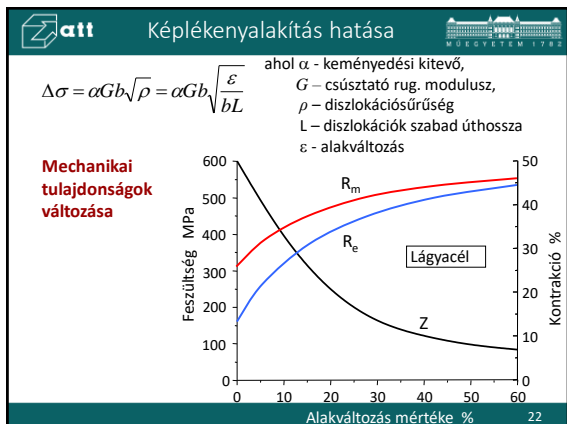
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

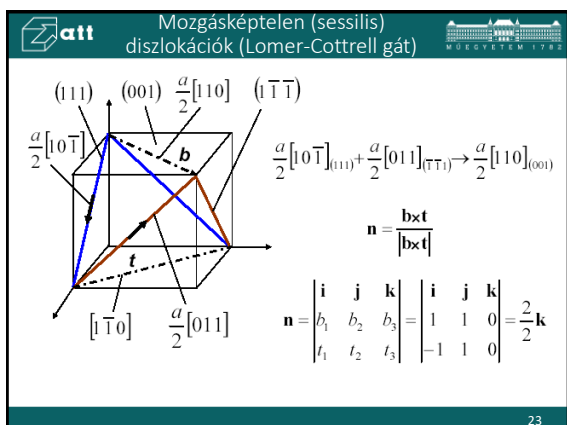
---

---

---

---

22




---

---

---

---

---

---

---

---

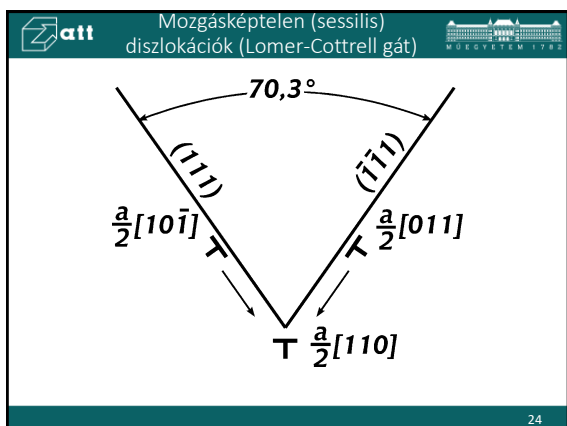
---

---

---

---

23




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

24



**att** Mozgásképtelen (sessilis) diszlokációk (Lomer-Cottrell gát)

- 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

25

25

---

---

---

---

---

---

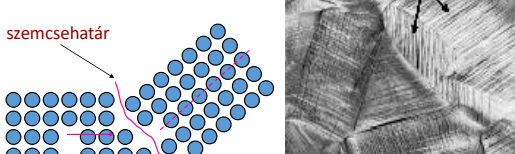
---

---

---

---

**att** Szemcsehatár hatása



A szemcsehatár

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

26

26

---

---

---

---

---

---

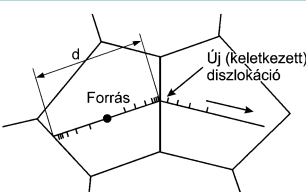
---

---

---

---

**att** Szemcsehatárok hatása



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**

27

27

---

---

---

---

---

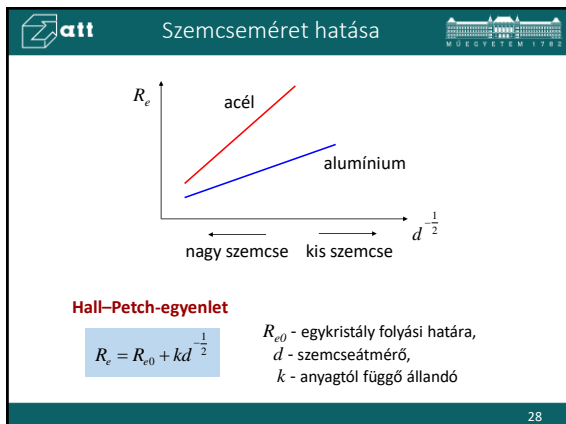
---

---

---

---

---



28

---

---

---

---

---

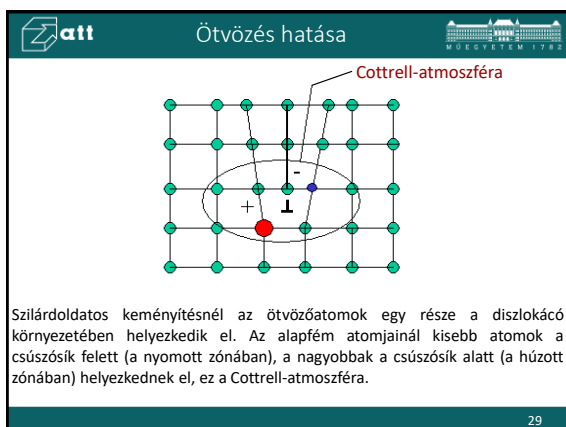
---

---

---

---

---



29

---

---

---

---

---

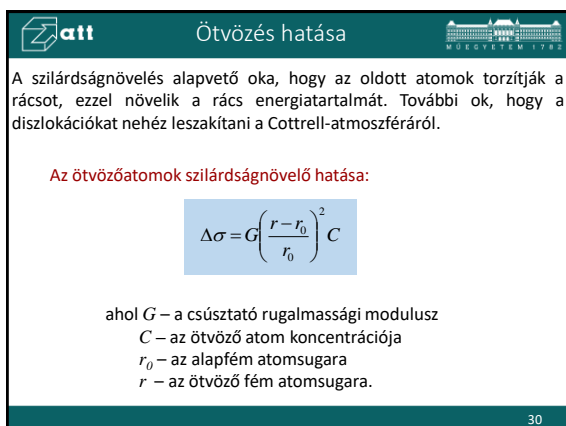
---

---

---

---

---



30

---

---

---

---

---

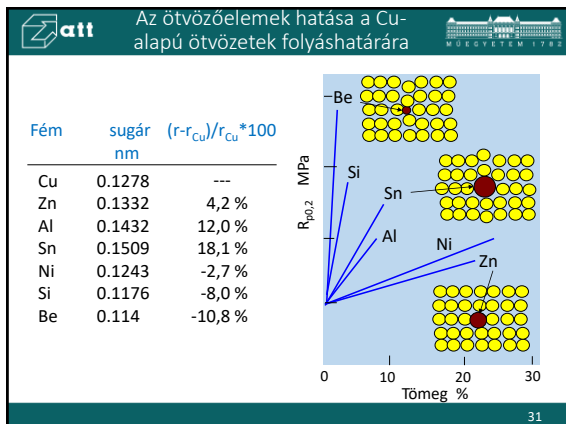
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

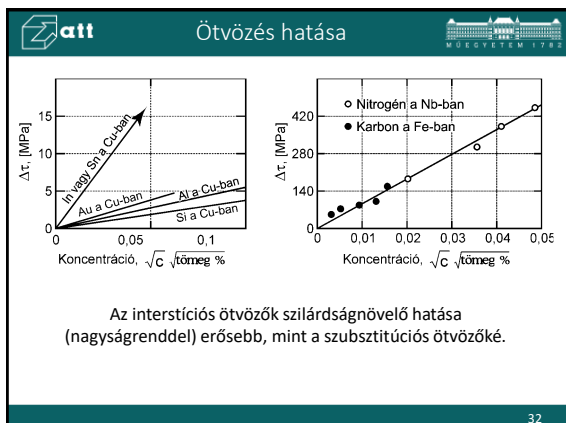
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Kiválásos keményedés

**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

33

---

---

---

---

---

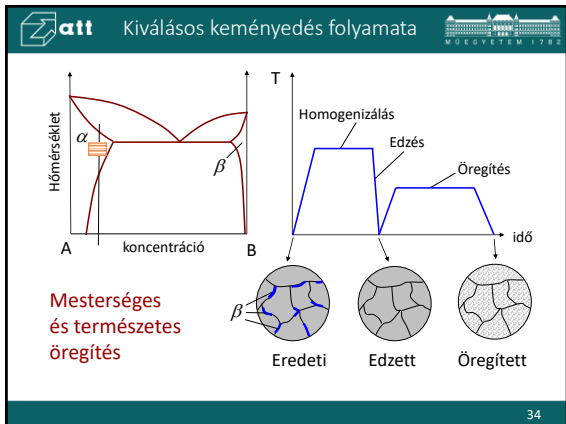
---

---

---

---

---



34

---

---

---

---

---

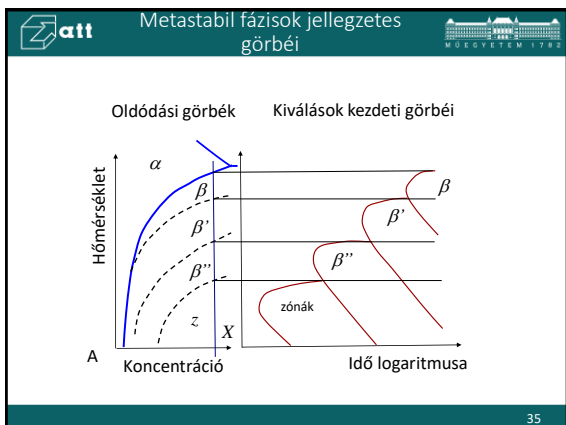
---

---

---

---

---



35

---

---

---

---

---

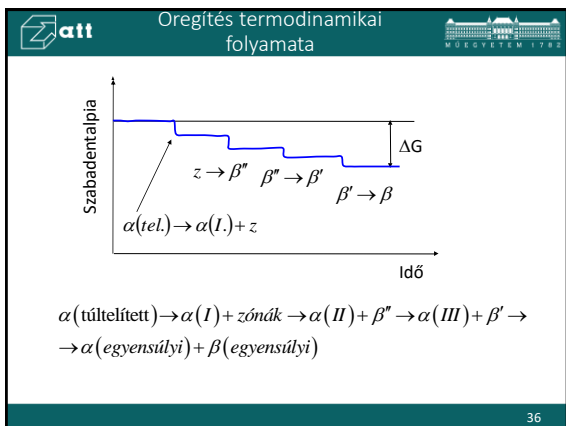
---

---

---

---

---



36

---

---

---

---

---

---


---

---

---


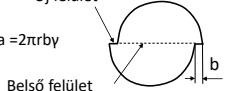
---



**att** Kiválásos keményítés mechanizmusai 

**Méret hatás:** 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  Felületi energia =  $2\pi r b \gamma$  

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

40

40

---

---

---

---

---


---

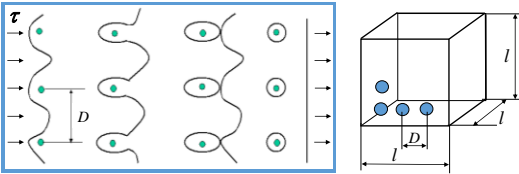
---

---

---

---

**att** Diszlokáció és inkoherens kiválások 



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

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

41

41

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**att** Orowan-mechanizmus 



Diszlokáció-hurkok létrejötte

42

42

---

---

---

---

---

---



---

---

---

---



 A kiválásos keményítés problémája 

- 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

46

46

---

---

---



---

---

---

---

---

 Diszperziós ötvözetek 

**Diszperziós ötvözetek:**

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

47

47

---

---

---


---

---

---

---

---

 Fogalmak 

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

48

48

---

---

---

---



---

---

---

---



 **Fogalmak** 

- 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

49

49

---

---

---

---

---

---

---

---