

 **att**

Anyagtudomány és Technológia Tanszék

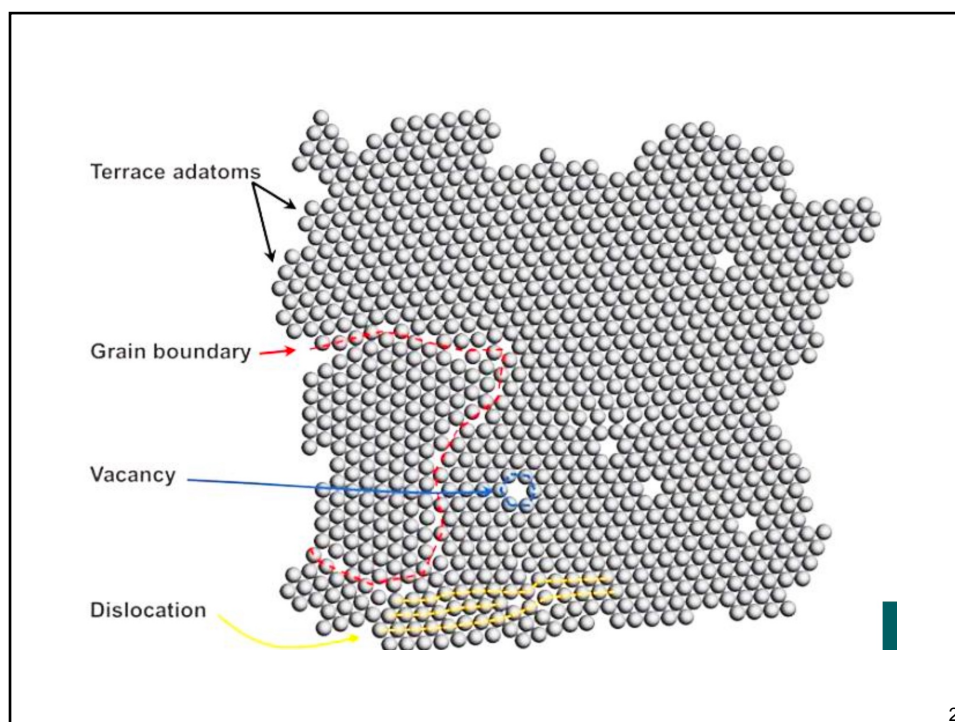
 **M Ü E G Y E T E M 1 7 8 2**

Szilárdságnövelés

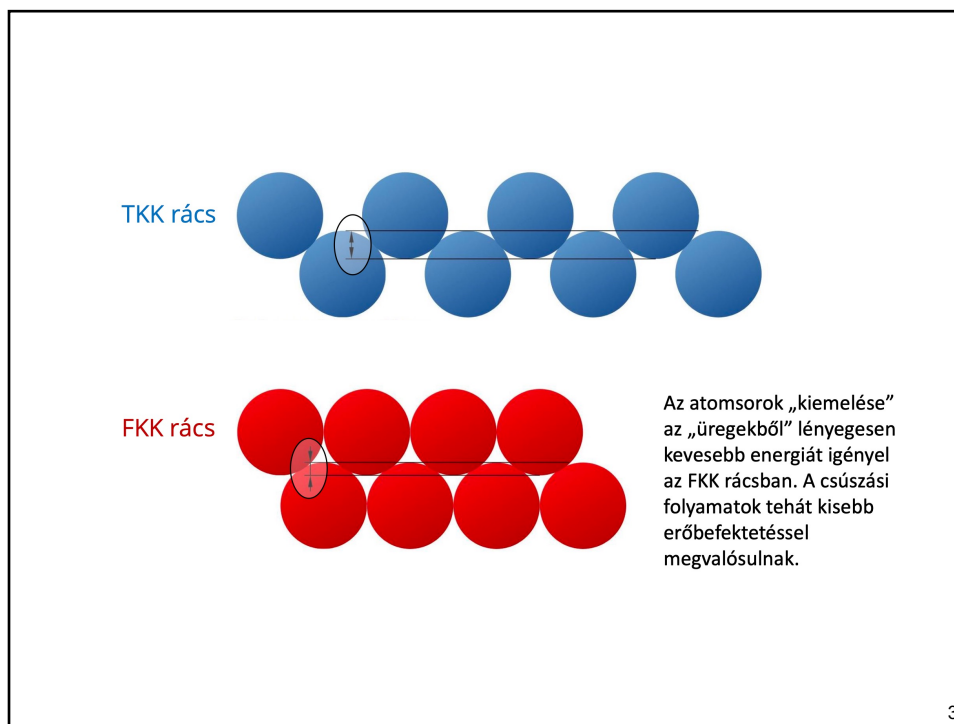
Ötvözetek szilárdságának növelésére alkalmazható technológiák alapjai

Dr. Mészáros István Attila

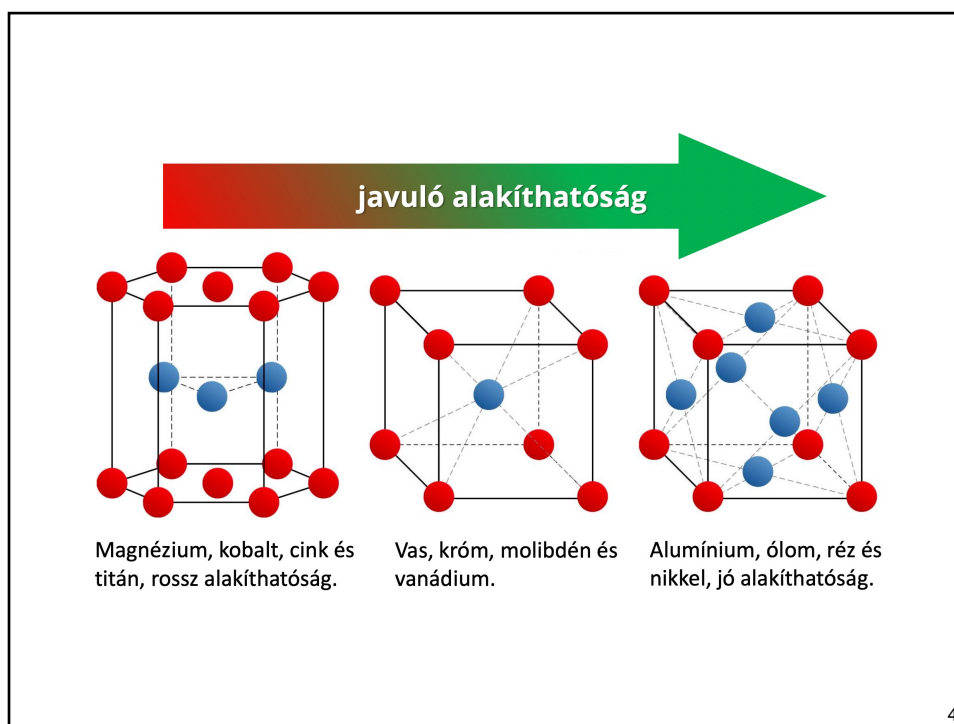
1



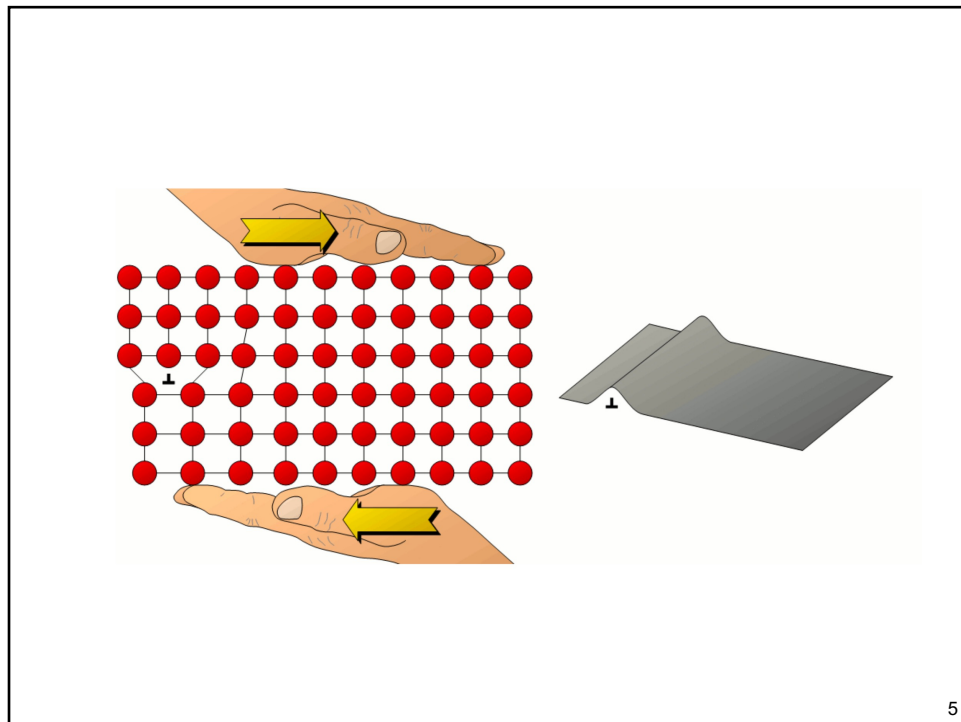
2



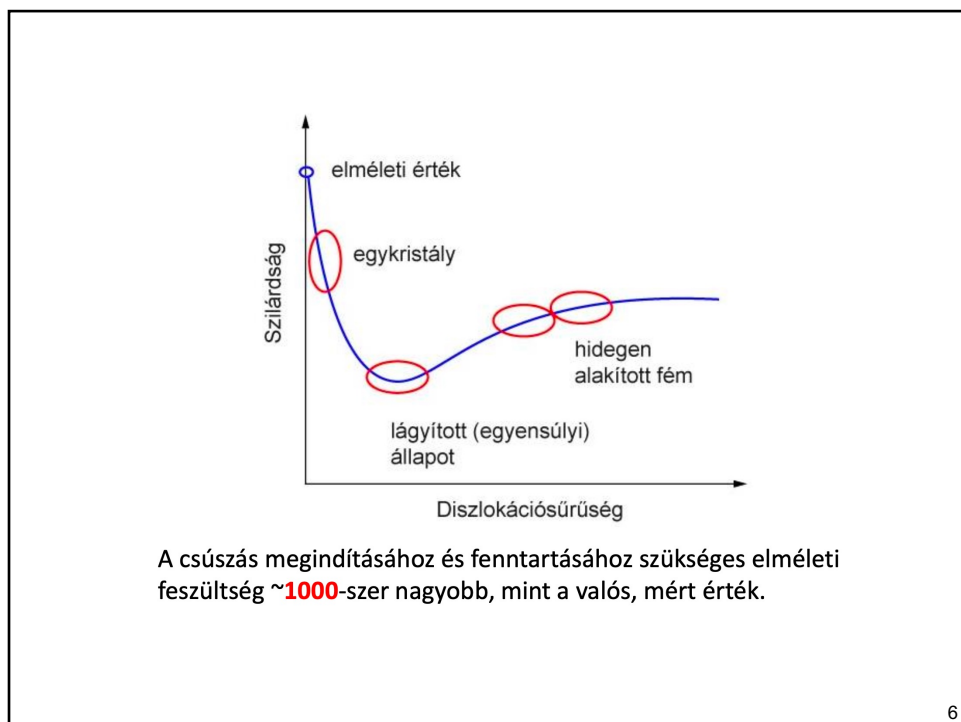
3



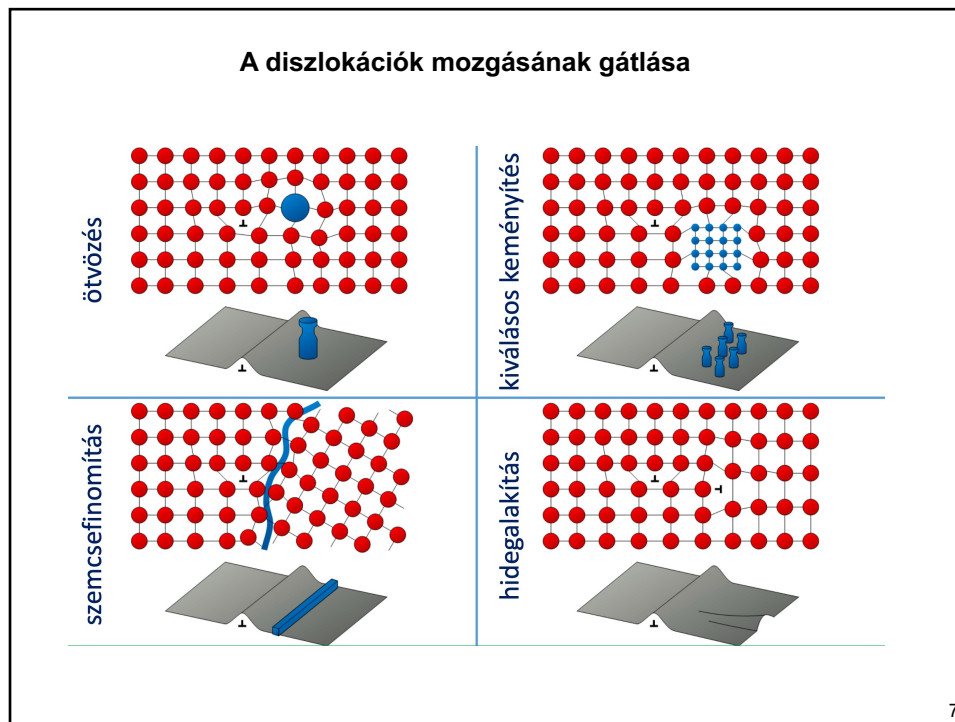
4



5



6



7

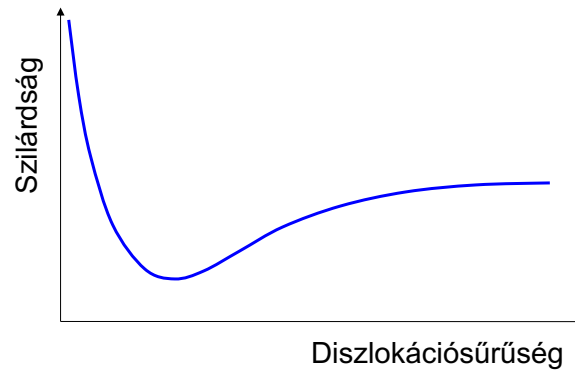
Szilárdságnövelési eljárások

- Képlékenyalakítás
- Szemcseméret csökkentése
- Ötvözés
- Hőkezelési eljárások
 - Allotróp átalakulás nélkül
 - kiválások keményedés
 - diszperziós keményedés
 - Allotróp átalakulással
- Kompozit anyagok

8

8

Képlékenyalakítás hatása



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:

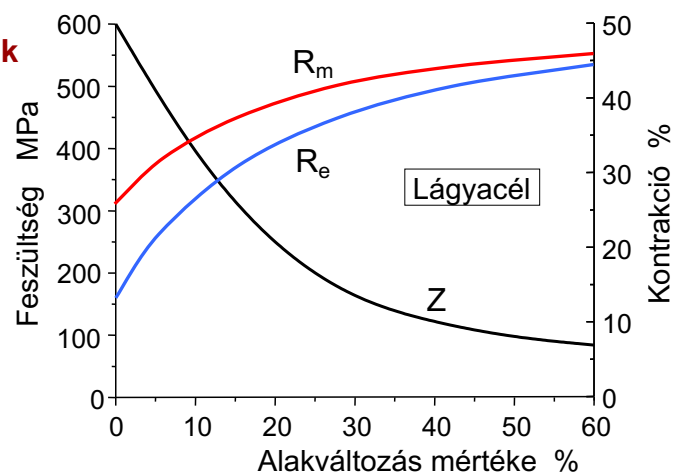
9

9

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

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

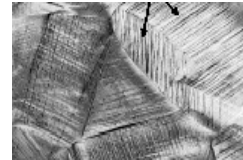
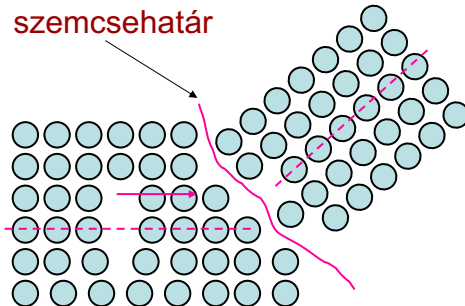
Mechanikai tulajdonságok változása



10

10

Szemcsehatárok hatása

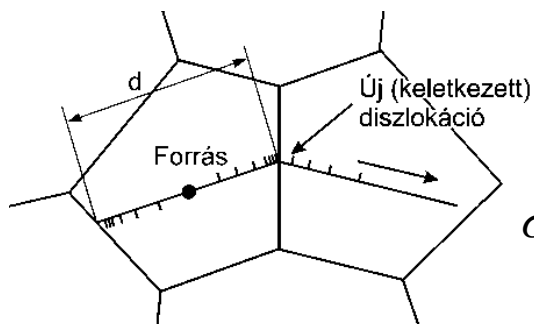


A szomszédos kristallitok egymástól eltérő orientációja miatt a szemcsehatárok akadályozzák a diszlokációk mozgását az egyik szemcséből a másikba.

11

11

Szemcsehatárok hatása



Hall-Petch egyenlet
(alsó folyáshatár)

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

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

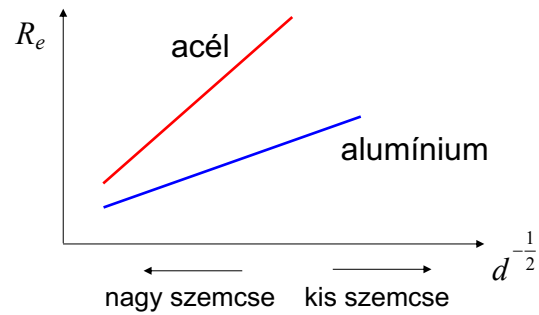
Szemcseméret $\uparrow \Rightarrow$ szemcsehatáron felhalmozódó diszlokációk száma $\uparrow$

Inhomogén alakváltozás

12

12

Szemcseméret hatása



Hall-Petch-egyenlet

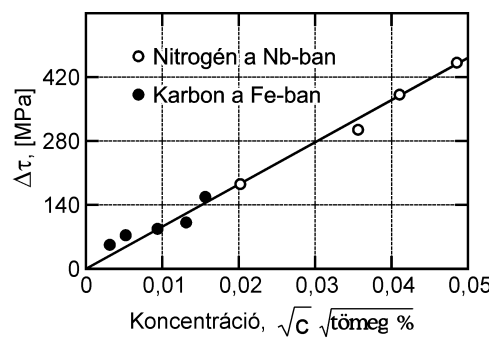
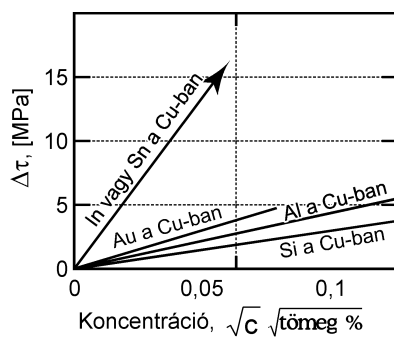
$$R_e = R_{e0} + kd^{-\frac{1}{2}}$$

R_{e0} - egykristály folyási határa,
 d - szemcseátmérő,
 k - anyagtól függő állandó

13

13

Ötvözés hatása

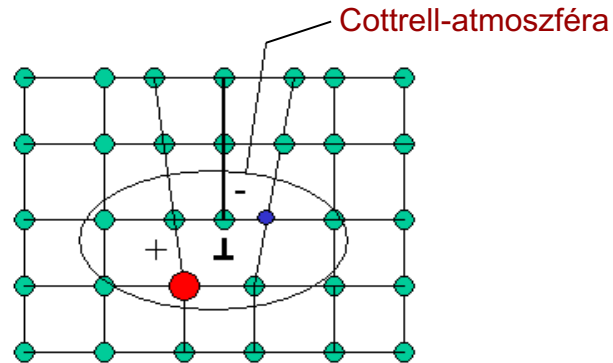


Az intersticiós ötvözők szilárdságnövelő hatása (nagyságrenddel) erősebb mint a szubsztitúciós ötvözőké.

14

14

Ötvözés hatása (szilárd oldatos)



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.

15

15

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

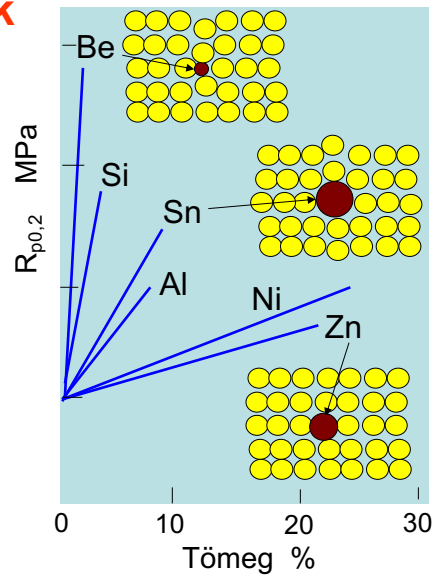
r – az ötvöző fém atomsugara.

16

16

Az ötvözőelemek hatása a Cu-alapú ötvözetek folyáshatárára

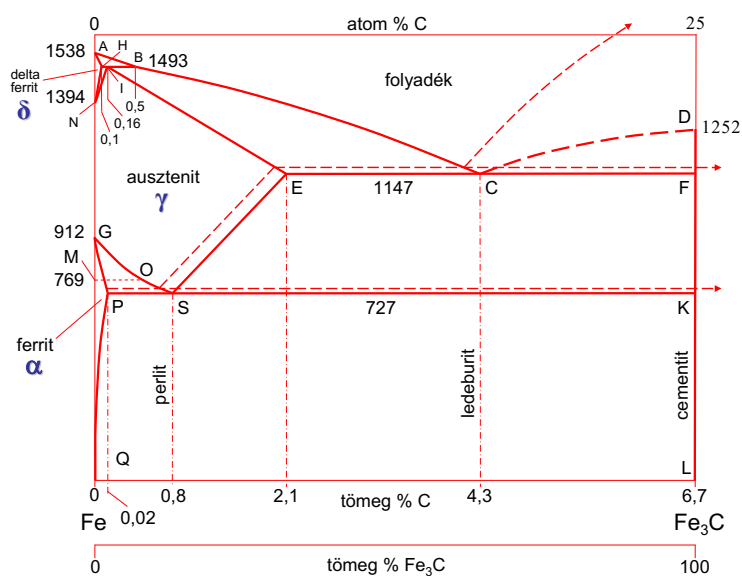
Fém	sugár nm	$(r_{\text{Cu}} - r_{\text{fém}})/r_{\text{Cu}} \cdot 100$
Cu	0.1278	---
Zn	0.1332	4,2 %
Al	0.1432	12,0 %
Sn	0.1509	18,1 %
Ni	0.1243	-2,7 %
Si	0.1176	-8,0 %
Be	0.114	-10,8 %



17

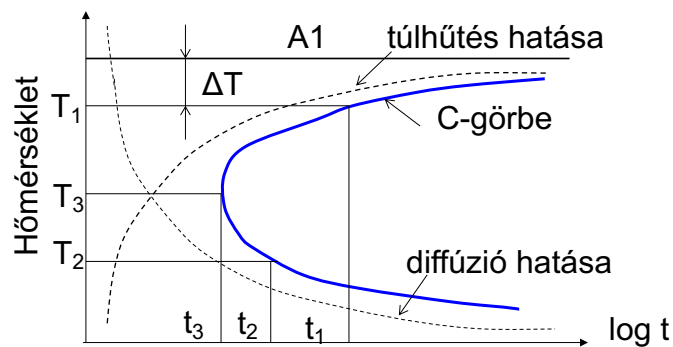
17

Fe-C, Fe₃C ikerdiagram



18

A diffúziós fázisátalakulás időszükséglete (TTT vagy C görbe)

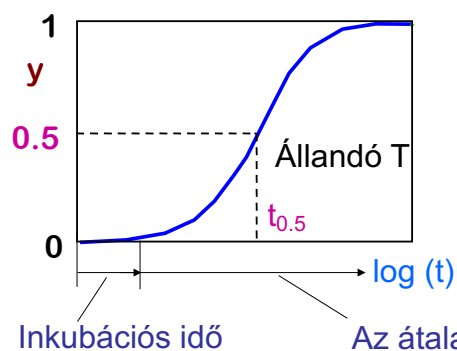


19

19

A fázisátalakulás időbeli lefolyása

Az Avrami egyenlet a fázisátalakulást írja le:



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

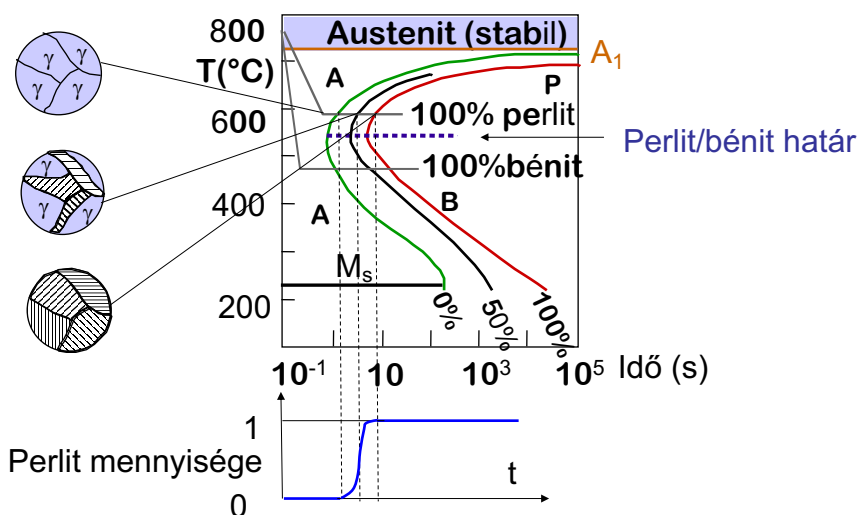
$$r = \frac{1}{t_{0.5}} - \text{az átalakulás sebessége}$$

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

20

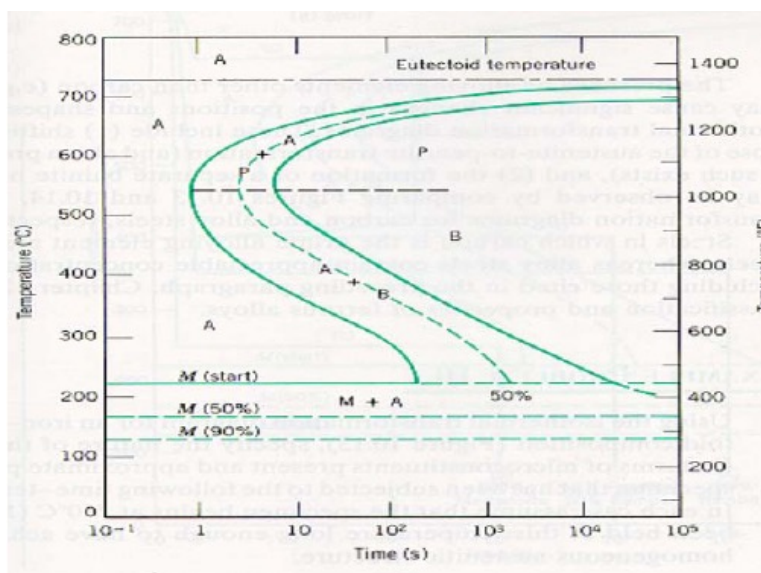
20

Eutektoidos acél (0,8%C) izotermikus átalakulási diagram (TTT)



21

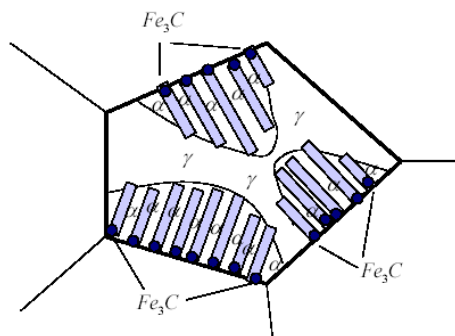
21



Eutektoidos acél TTT diagramja.

22

Perlites (eutektoidos) átalakulás



$\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (nagy T, lassú hűtés)

bomlás (0,8% C, 727 °C)

csíráképződés, **diffúzió**

γ (0,8% C) $\rightarrow$ α + Fe_3C (6,7% C)

$6,7/0,8 = 8,37$!!!

ausztenit határon indul Fe_3C
képződéssel

lemezes szerkezet

hűtési sebesség $\Rightarrow$ finomság

korlátozottan, de alakítható szövet

23

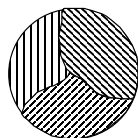
Perlit szerkezete

T_{transf} közvetlenül az A_1
hőmérséklet alatt:
nagyobb T, gyorsabb diffúzió.

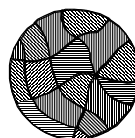
T_{transf} jóval az A_1
hőmérséklet alatt: kisebb T,
lassúbb diffúzió.



10 μm



Kisebb ΔT ,
durvább lemezek

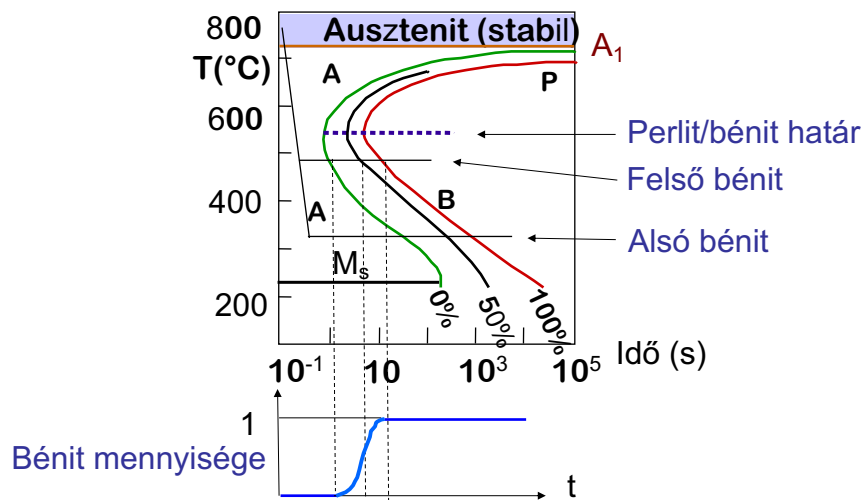


Nagyobb ΔT ,
finomabb lemezek

24

24

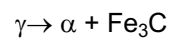
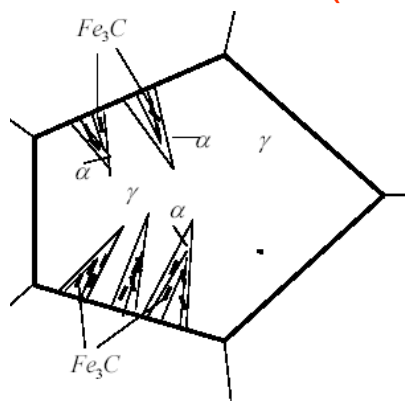
Bénites átalakulás



25

25

Bénites (Bainites) átalakulás



γ (kis T, gyors hűtés, T = 550-230 °C)

bomlás

csíráképződés, **diffúzió (korlátozott)**

auszténit határon indul (α képződéssel)

α (< 0,3% C) !!! (0,02% C egyensúlyi)

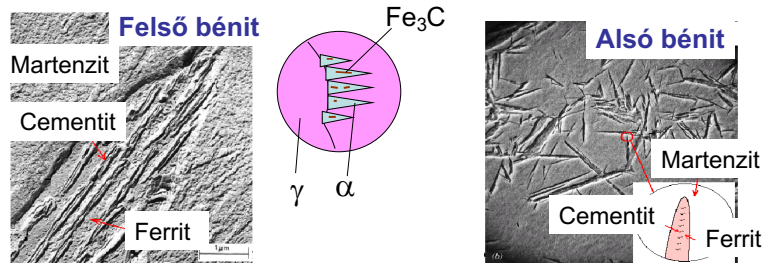
Fe_3C korongok, tűs szerkezet

felső - alsó bénit

rosszul alakítható szövet

26

Bénit szerkezete



350-550 °C

Ferritűk és hosszú
cementit szemcsék elegye

200-350 °C

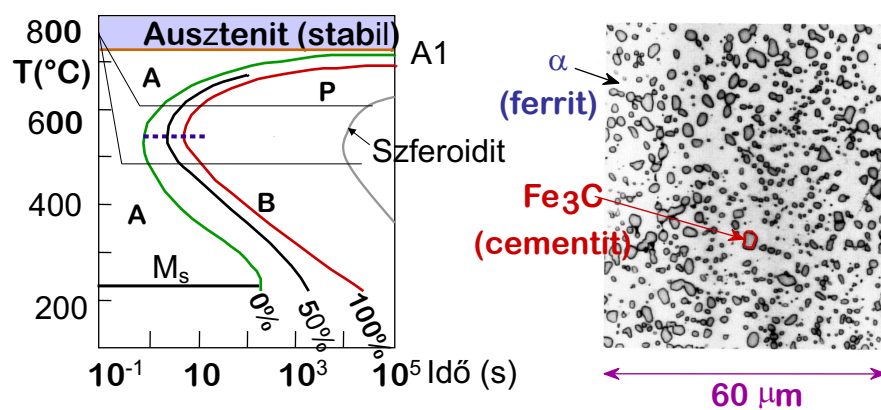
Vékony ferrit lemezek és nyújtott
cementit szemcsék elegye

Az átalakulás sebességét alapvetően a diffúzió (kevésbé a csíráképződés) befolyásolja. A viszonylag kis hőmérséklet miatt nagyon finom struktúra jön létre.

27

27

Szferoidit keletkezése



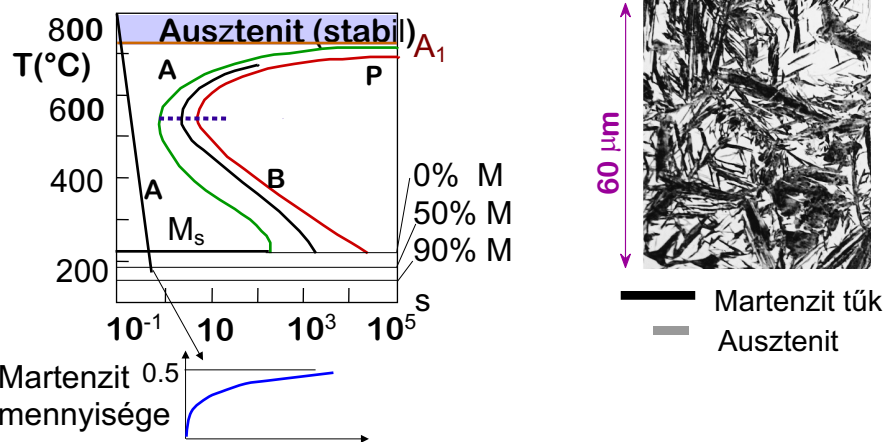
Hosszú idő alatt a perlit/bénit szerkezete átalakul (diffúzió) és apró Fe_3C gömbök jönnek létre a ferrit mátrixban.

28

28

Martenzites átalakulás

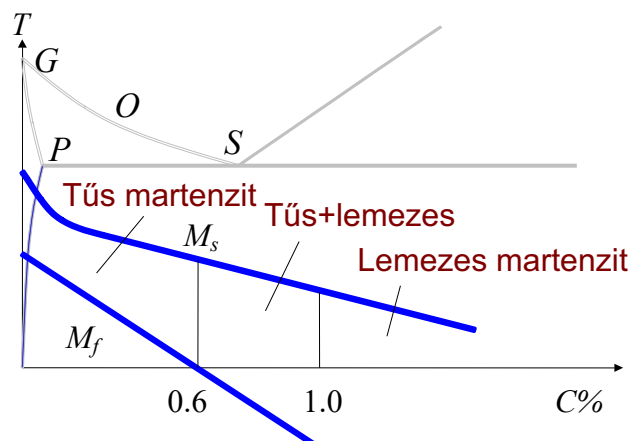
A kezdeti homogén fázisból (γ) az átalakulás során homogén fázis (m) keletkezik, csíráképződés nélkül. Nagy lehűlési sebesség esetén jön létre. Diffúzió nélküli átalakulás, a másodperc tötrésze alatt megy végbe.



29

29

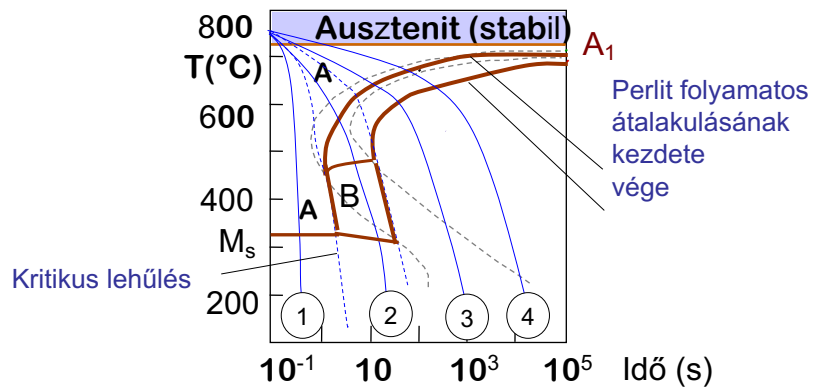
M_s és M_f hőmérséklet széntartalom függése



30

30

Eutektoidos (C=0,8%) acél folyamatos átalakulása

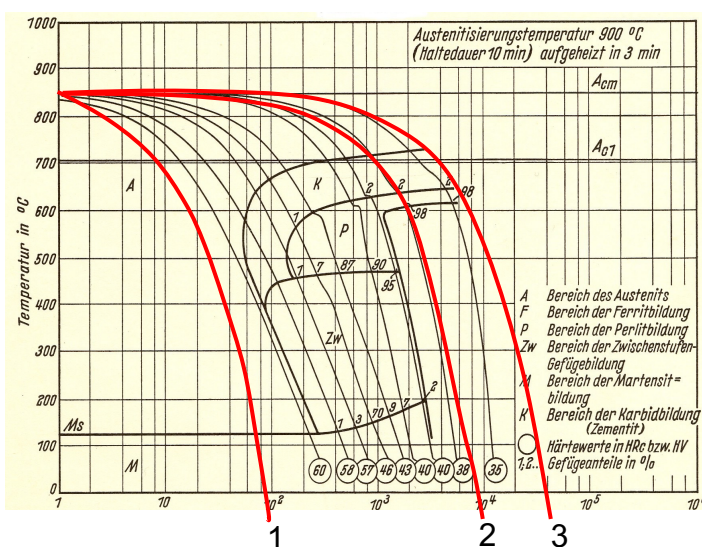


- | | |
|------------------|----------------------------------|
| 1. Edzés (víz): | martenzít |
| 2. Edzés (olaj): | perlit és/vagy bénit + martenzít |
| 3. Normalizálás: | finom perlit |
| 4. Lágýtás: | durva lemezes perlit |

31

31

Hipereutektoidos acél folyamatos átalakulása

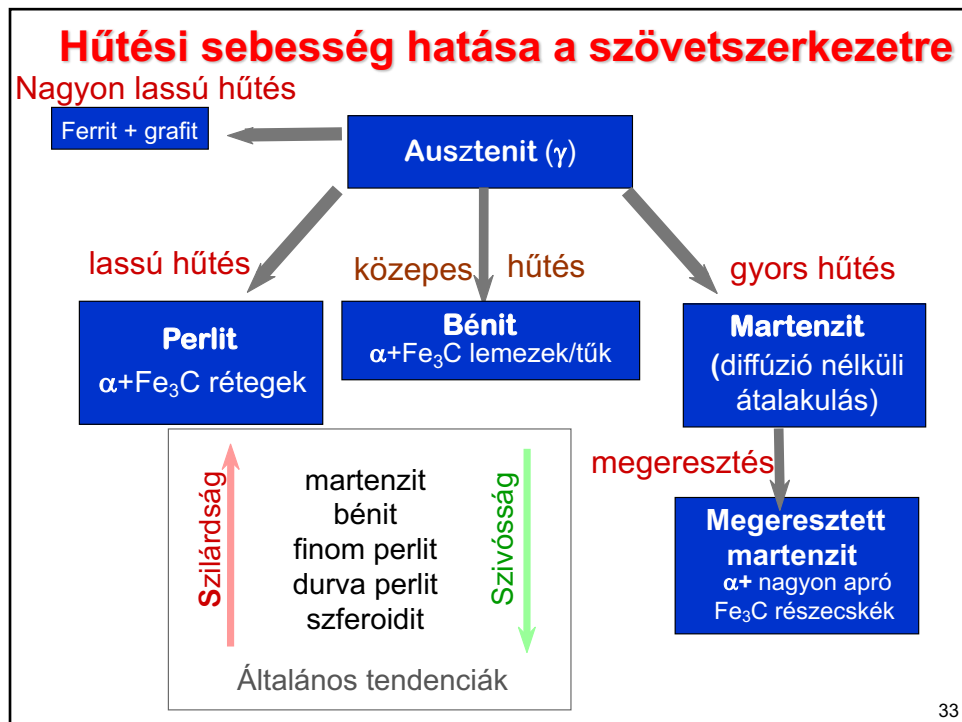


C = 1 %

- 1-edzés
2-normalizálás
3-lágýtás

32

32



33

Acél alapvető hőkezelési eljárásai

1. Edzés
2. Megeresztés
3. Nemesítés (edzés+ megeresztés)
4. Normalizálás
5. Lágyítás
6. Feszültségcsökkentő hőkezelés
7. Betétedzés

34

34

- **1. Edzés**

Auszténitesítés + hőntartás + gyors hűtés (víz vagy olaj)
Martenzites szövetszerkezet előállítása.

- **2. Megeresztés**

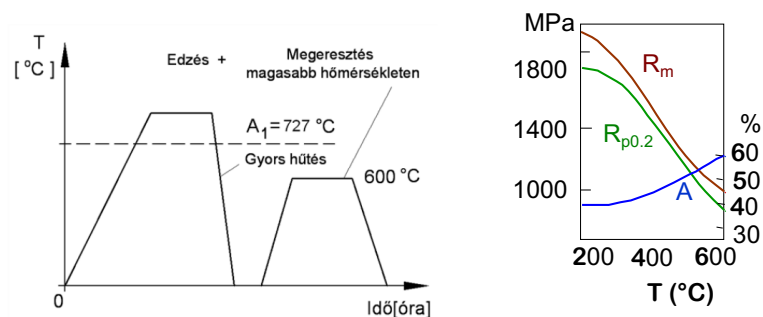
Martenzites szövetszerkezet hőntartása A_1 -nél (727 °C)
kisebb hőmérsékleten, majd lehűtése. Finom
szövetszerkezetű perlit előállítása.

35

35

- **3. Nemesítés**

Edzés, megeresztés nagy hőmérsékleten.
Szívós szövet előállítása.



36

36

- **5. Lágycítés**

- Egyszerű lágycítés**

- Auszténitesítés + hőntartás + lassú hűtés (kemencével).

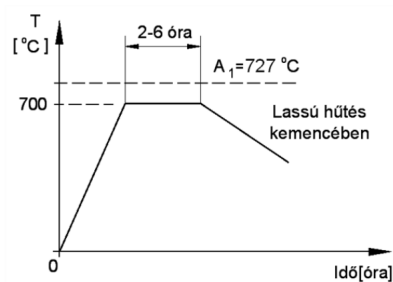
- Durva, lemezes perlit.

- Lágy, szívós anyag előállítása.

- **Szferoidizálás**

- Hőntartás + nagyon lassú hűtés.

- Lágy, szívós anyag előállítása.



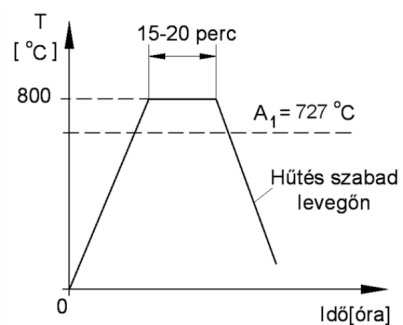
37

37

- **4. Normalizálás**

- Auszténitesítés + hőntartás + levegőn való lehűtés.

- Finom perlites szövetszerkezet előállítása.

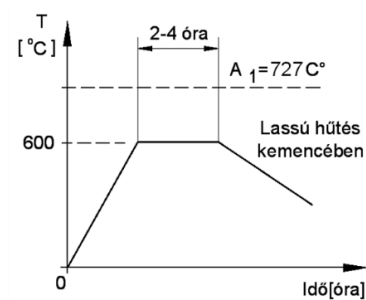


38

38

• 6. Feszültségcsökkentő hőkezelés

500-600 °C hőntartás + lassú hűtés (kemencével)
Maradó feszültségek csökkentése.



39

39

• 7. Betétedzés

1. Cementálás, izzítás karbon tartalmú közegben 900 °C-on 8-24 óráig
2. Edzés
3. Megeresztés.

Kéregben martenzites, belül ferrit/perlit/bainit-es szövet.

Fogaskerek, tengelyek, csapágyak, fárasztó terhelésnek kitett alkatrészek esetén.

40

40

Acélok hőkezelésének alapvető típusainak áttekintése

Feszültségcsökkentő hőkezelések

Lágyító hőkezelések

Egyszerű lágyítás

Szferoidizálás

Keménységet növelő hőkezelések

Edzés

Betétedzés

Szívósságot fokozó hőkezelések

Nemesítés

Normalizálás

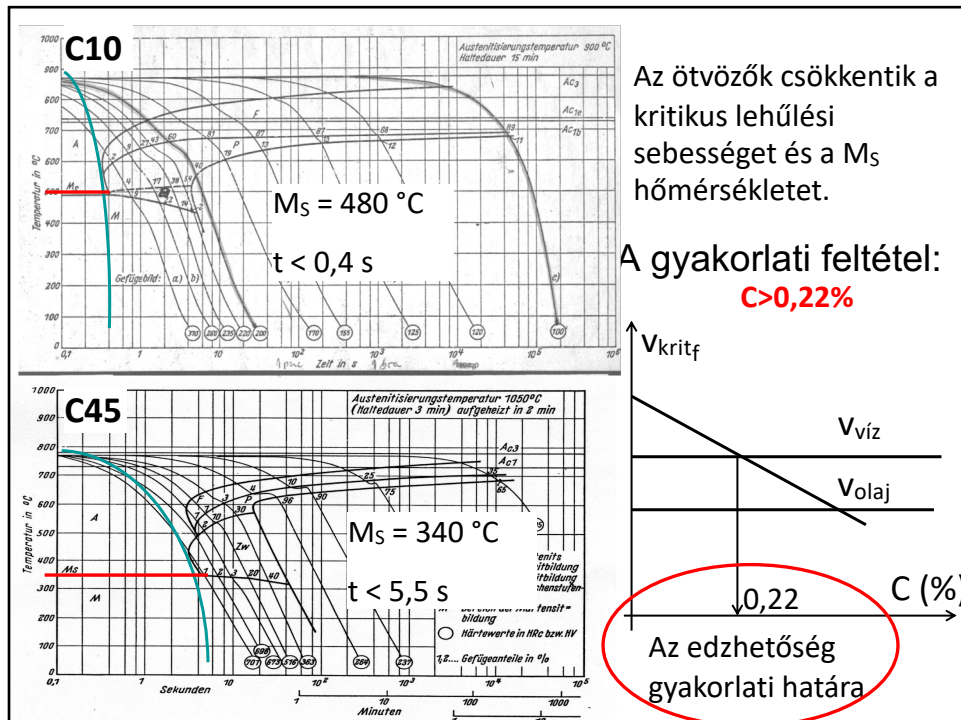
41

41

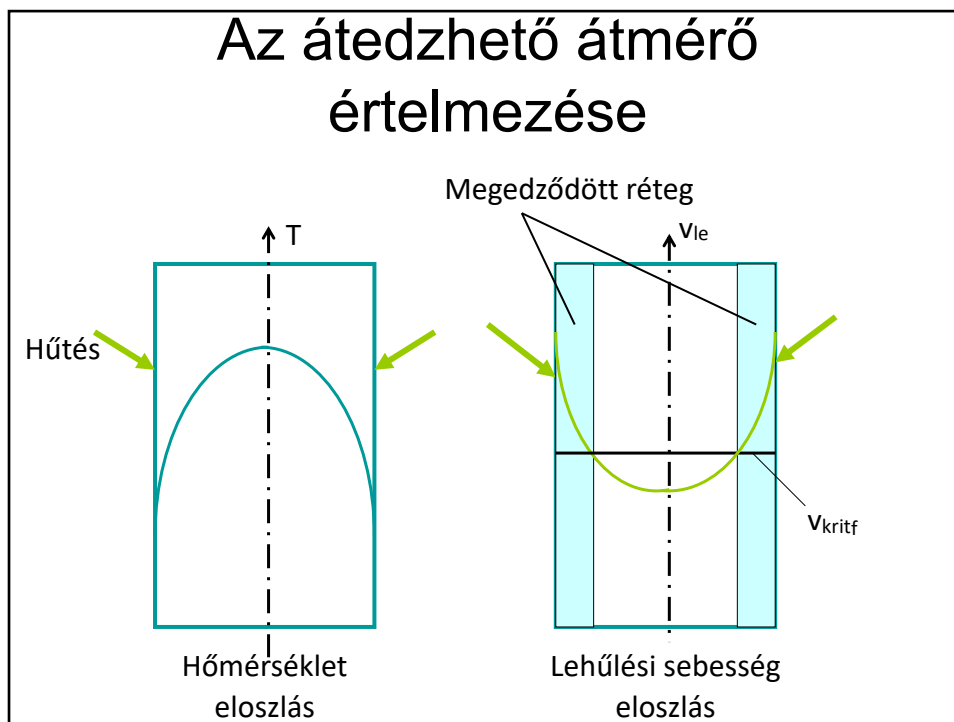
Az edzés feltételei

- Az edzés nagyon fontos, mert nemesítéssel (edzés+megeresztés), allotróp átalakulással a tulajdonságok tág határok között befolyásolhatók
- Edzés lépései
 - Hevítés A_3 + $\sim 50^\circ\text{C}$ hőmérsékletre
 - Hőntartás teljes ausztenitesítésig
 - Lehűtés a kritikus lehűtési sebességnél gyorsabban

42

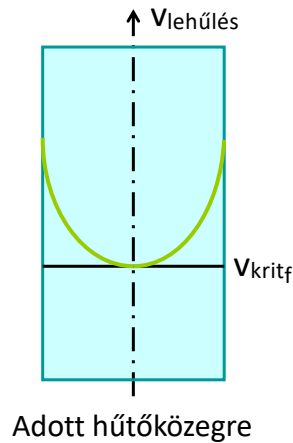


43



44

Az átedzhető szelvényátmérő definíciója



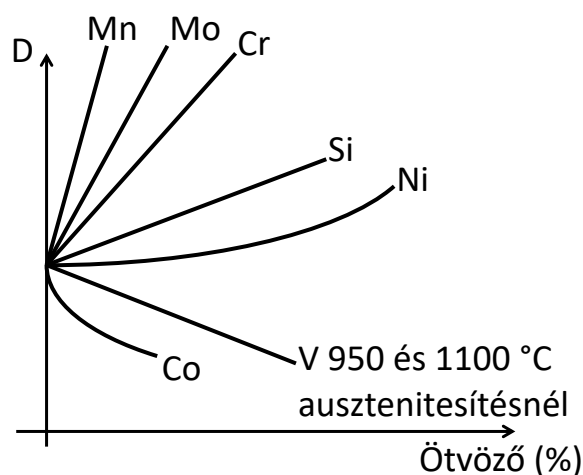
Az átedzhető szelvény-átmérő az az átmérő, amelynél az adott hűtőközeg esetében, **a darab legbelső pontja is legalább a kritikus (felső) lehűlési sebességgel hűl le.**

D (kémiai összetétel, hűtőközeg, szemcseméret, kívánt martenzit mennyiség)

Martenzit + bénit, a gyakorlatban **50% martenzit**

45

Az ötvözők hatása az átedzhető szelvényátmérőre



46

Számítás

- Grossmann szerint az ideális átedzhető szelvényátmérő 50% martenzit tartalomnál

$$D_{id} = 8 \sqrt{C} 1,08^{8-n} \prod_{i=1}^m (1 + Me_i f_{Me_i})$$

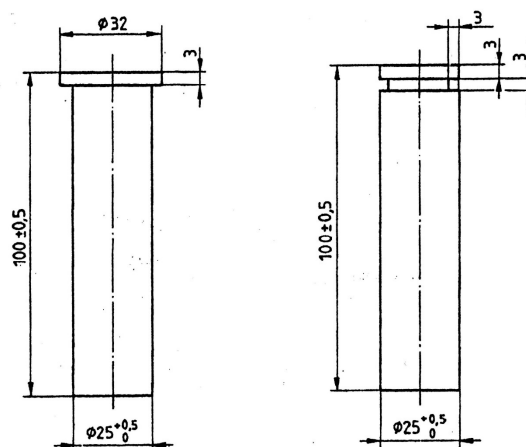
- Ahol:
 - C a karbontartalom (t%)
 - n: szemcsefinomsági mérőszám
 - Me_i: az i-dik fém mennyisége (t%)
 - f_{Mei}: az i-dik fém állandója

Elem vegyjele	f _{Mei}
Mn	4,10
Cr	2,33
Si	0,64
Cu	0,27
Mo	3,14
Ti	5,70
Ni	0,52
P	2,83
V	1,73
S	-0,62

47

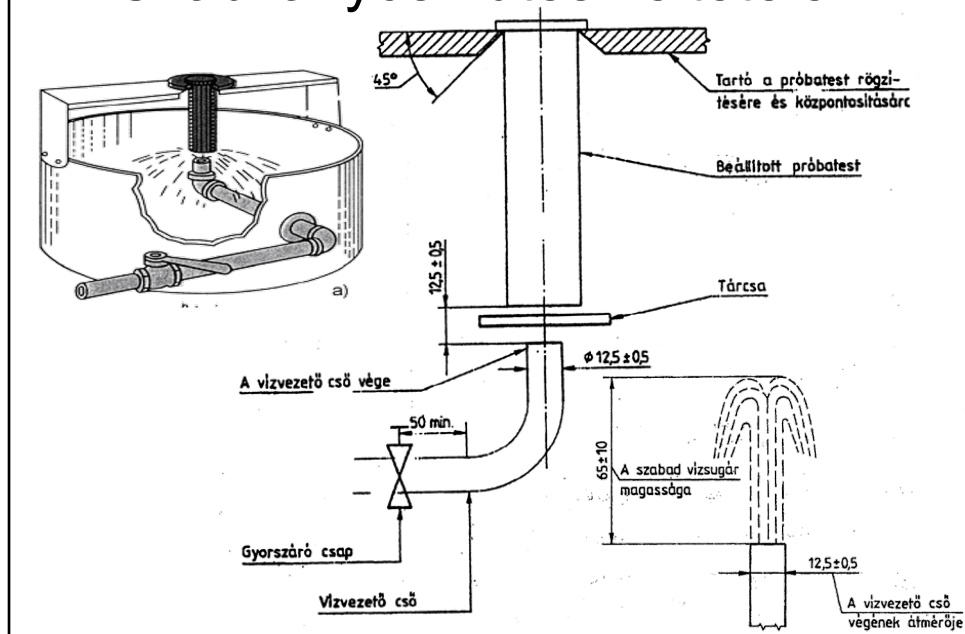
Mérés

- Véglapedzési próba, vagy Jominy-próba
- Szabványosított
 - Próbatest
 - Hűtési feltételek
- Menete
 - Ausztenitesítés (300 °C)
 - Hűtés véglapról
 - Keménységmérés
 - Kiértékelés



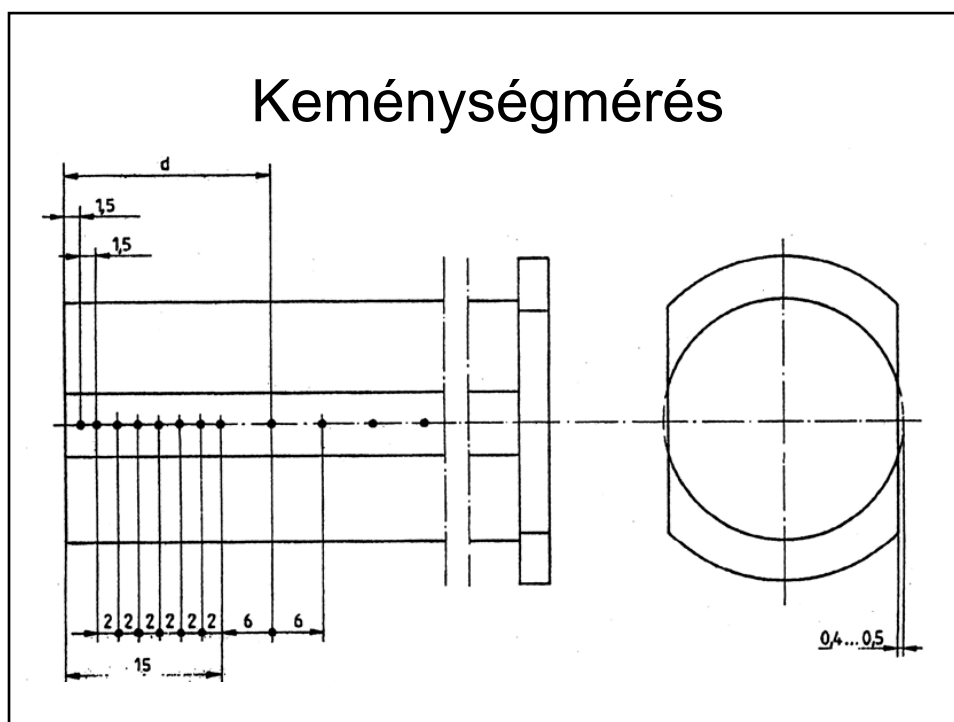
48

Szabványos hűtési feltételek



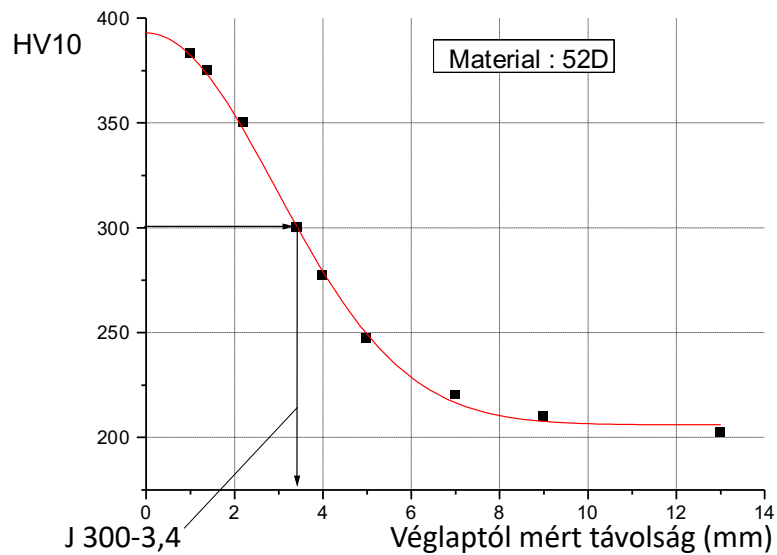
49

Keménységmérés



50

Példa: mérési eredmény



51

Kiválásos keményedés

Feltételek (binér rendszerben)

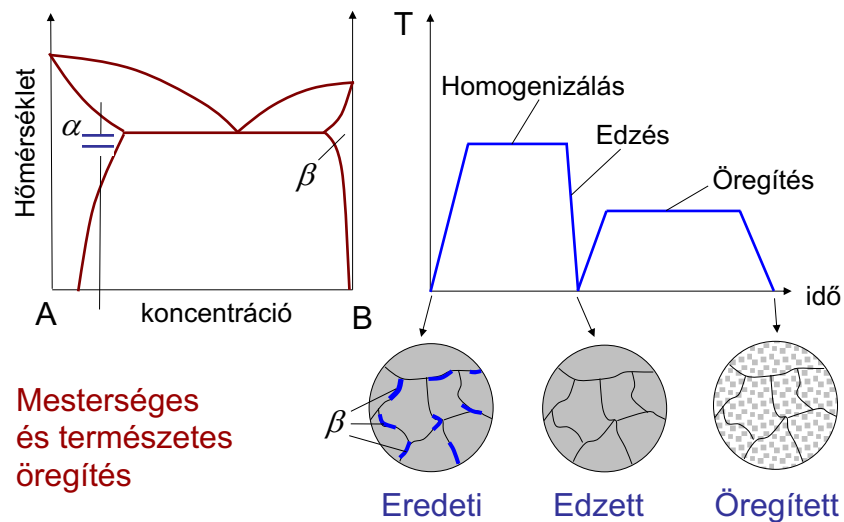
- Az egyik alkotó szilárd állapotban korlátoltan, de jelentős mértékben oldódik a másikban.
- A oldódás mértéke a hőmérséklettel csökken.
- Az oldó fém lágy és szívós.
- A kiváló fázis kemény és szilárd.
- A kiválás kezdetben koherens.

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

52

52

Kiválásos keményítés folyamata



53

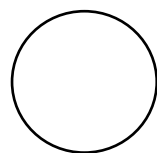
53

Kiválásos keményítés mechanizmusai

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.

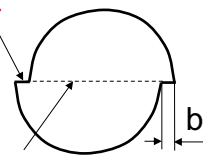
Kezdeti állapot



Felületi energia $= 2\pi r b \gamma$

Új felület

Belső felület



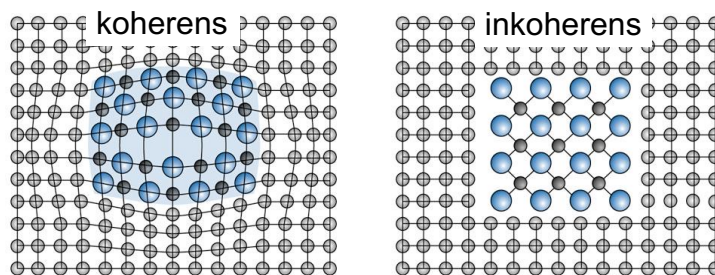
Modulusz hatás: a mátrix és a kiválás rugalmassági modulusza eltérő, ezért nagyobb feszültség szükséges a diszlokáció mozgatásához, ha az megközelíti a kiválást.

54

54

Kiválások szerkezete

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



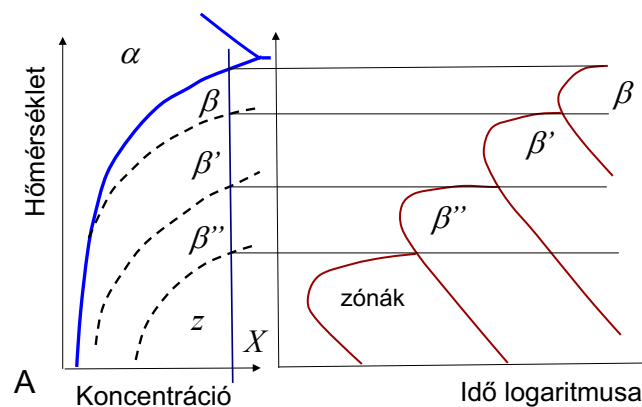
55

55

Metastabil fázisok jellegzetes görbéi

Oldódási görbék

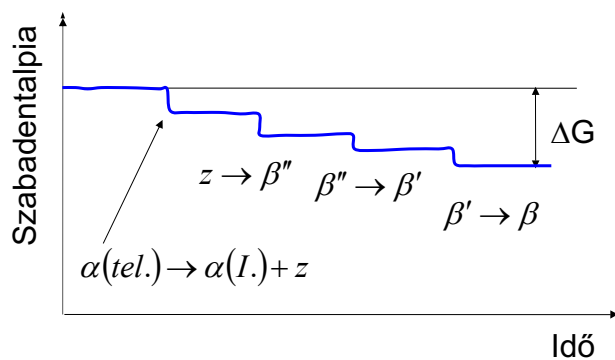
Kiválások kezdeti görbéi



56

56

Öregítés termodinamikai folyamata

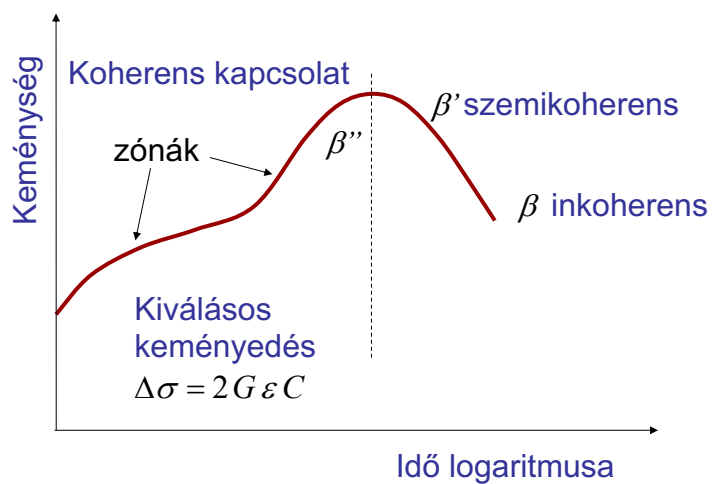


$\alpha(\text{tútelített}) \rightarrow \alpha(I) + \text{zónák} \rightarrow \alpha(II) + \beta'' \rightarrow \alpha(III) + \beta' \rightarrow$
 $\rightarrow \alpha(\text{egyensúlyi}) + \beta(\text{egyensúlyi})$

57

57

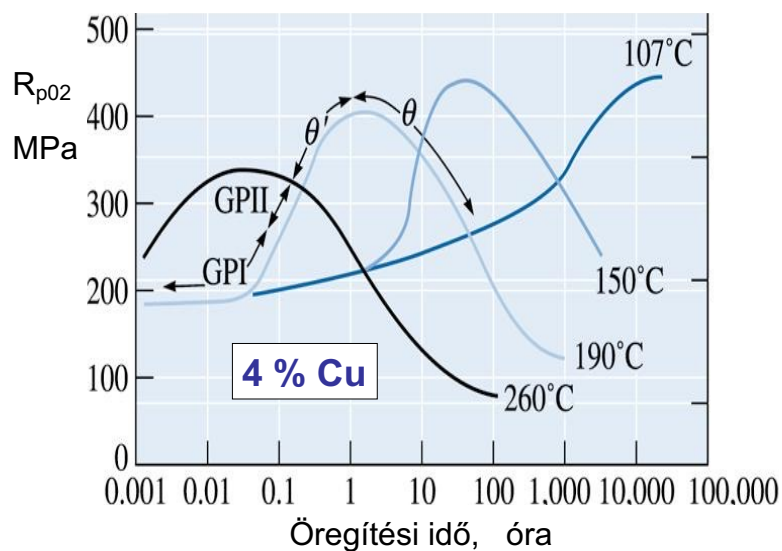
Keménységváltozás folyamata



58

58

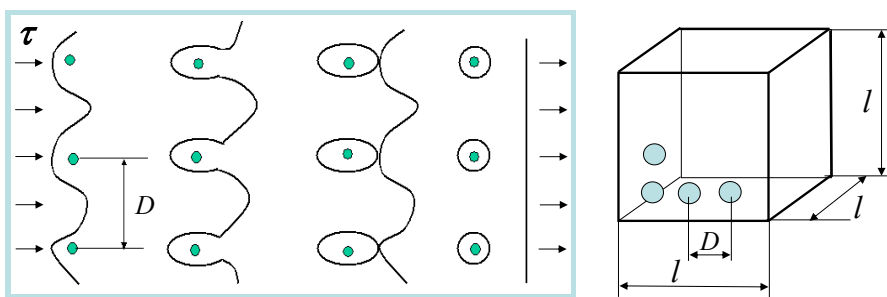
Al-Cu ötvözet kiválásos keményítése



59

59

Diszlokáció és inkoherens kiválások



A szilárdság növekedése:

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

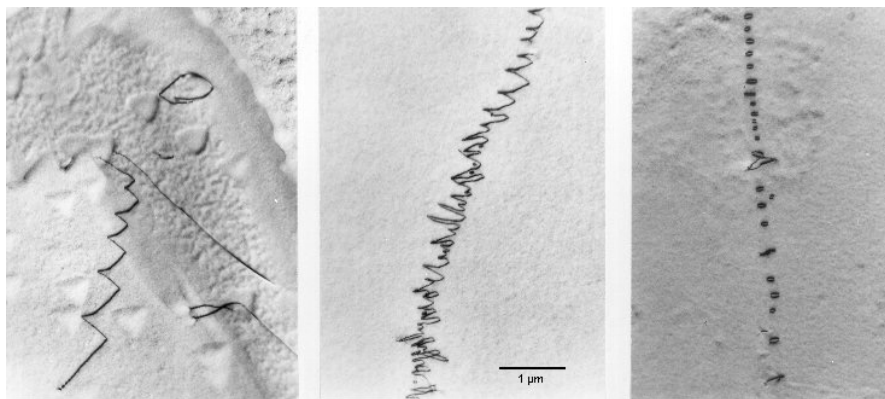
ahol

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

60

60

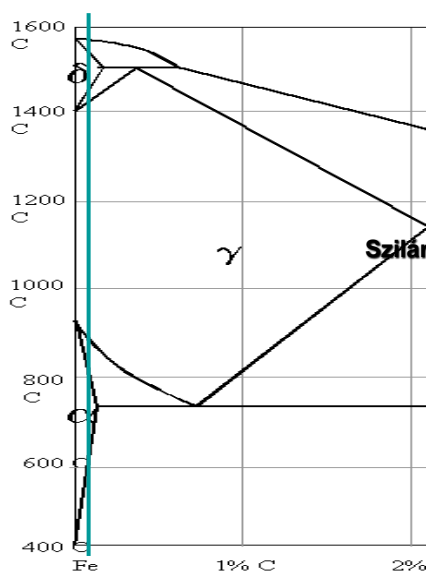
Orowan-mechanizmus



Diszlokáció-hurkok létrejötte

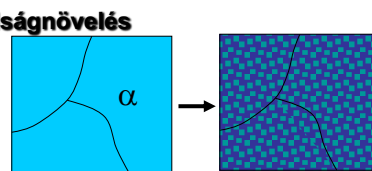
61

Acél diszperziós keményítése



- Az adott ötvözetnél diszperziós keményítés történik

- Az α szilárd oldatból α + cementit keletkezik



α + cementit

(Ebben az esetben az elérhető szilárdságnövekedés kicsi, a kis mennyiségű cementit miatt.)

62

62

Diszperziós ötvözetek

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 $\leftrightarrow$ kiválásosan nemesített ötvözetek

63

63

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

64

64