Figyelem!

A következő előadás a koronavírus miatt elrendelt távoktatáshoz készült segédanyagként a Villamosipari anyagismeret kurzust a 2020/21-es tanév őszi félévében felvett hallgatók számára.
A felvétel sokszorosításához és terjesztéséhez az előadó nem járul hozzá.

Villamosipari anyagismeret



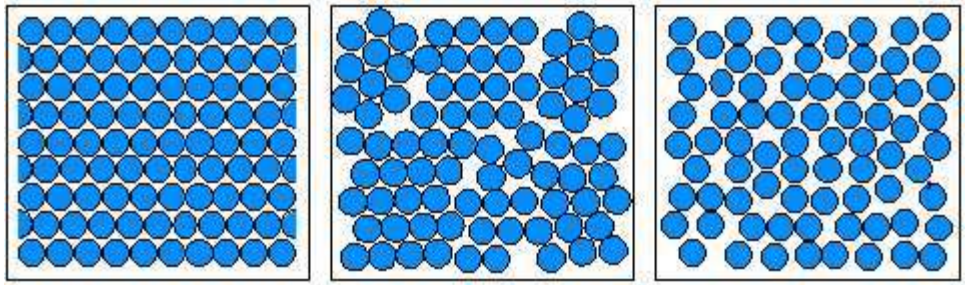
KRISTÁLYTANI ALAPISMERETEK

GERZSON MIKLÓS

Szilárd szerkezeti formák

szilárd anyagok megjelenési formái:

- amorf: nincs szabályos kristályszerkezet, „megszilárdult” folyadékok
- polikristályos anyagok: szabályos kristályszerkezetű részek „keveréke”
- egykristályos anyagok: szabályos kristályszerkezet a teljes térfogatban



Amorf anyagok

a határ nem éles:

- amorf anyagban (pl. üvegben) is tartalmazhat kristályszerkezetet)
- polikristályos anyagok is mutathatnak amorf jelleget

tulajdonságaik:

- nincs éles olvadáspont – nincs fázisváltozás
- jó áram- és hőszigetelők: elektronok nem tudnak elmozdulni, nincsenek delokalizált π-kötések
- amorf fémek jól mágnesezhetők, korrózió és kopásállóságuk nagyon jó

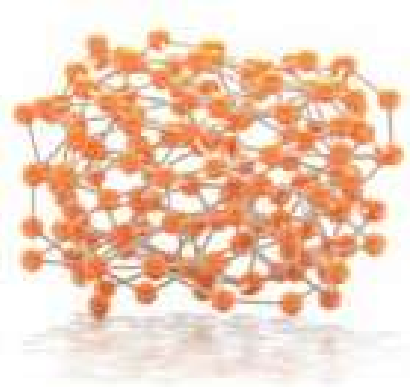
Amorf anyagok

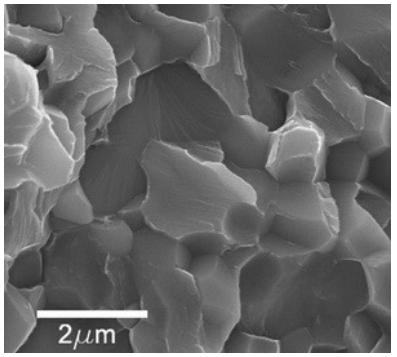
amorf anyagok:

- szurok, viasz, bitumen, műanyagok többsége, borostyán, gumi
- üvegfélék: obszidián, tektit, faopál
- fémüvegek (amorf fémek):
  - olvadáspontra hevített fémet vagy fémötvözetet 10^5-10^6 °C/s sebességgel hűtenek le
  - kisebb zsugorodás lehűléskor
  - nincsenek szemcsék – nincsenek szemcsehatárok
  - keményebbek, de kevésbé ridegek, mint szilikátos üvegek

Amorf anyagok

fémüvegek szerkezetek





ipari felhasználás 90-évektől

bizonyos ötvözeteknél elegendő az 1 °C/s hűtési sebesség

alkalmazásuk:

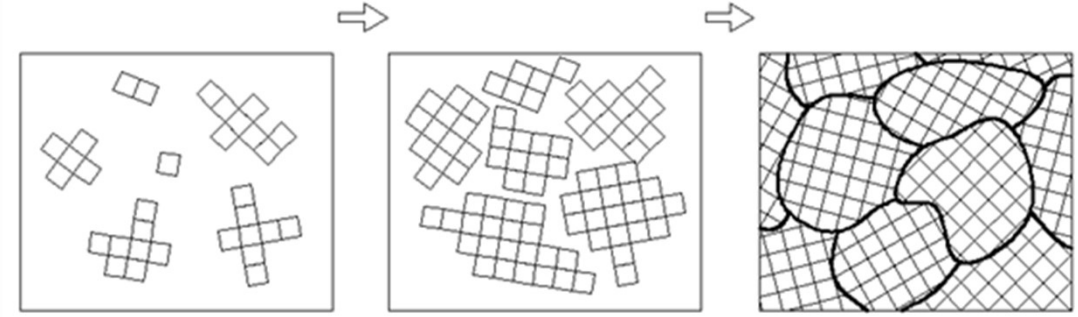
- lágy mágneses eszközökben (kis hiszterézis veszteség, nagy permeabilitás): transzformátor vasmagok, magnetofonfejek
- forraszanyagok, korrózióálló bevonatok

Polikristályos anyagok

apró egykristály szemcsékből álló kristály, a kristály-határokon idegen anyagok lehetnek

tulajdonságaik eltérnek az egykristályos anyagokétól

kristályosodás folyamata:



lehetnek anizotrópok: tulajdonságaik, viselkedésük iránytól függhet

Egykristályos anyagok

folytonos rácsszerkezetű kristály, amelyben az atomok szabályos geometriai rendben helyezkednek el

egyedülálló tulajdonságaik vannak, különösen elektromos, mechanikai és optikai szempontból

a természetben ritka az egykristályok előfordulása, laboratóriumban elvégezhető megfelelő ellenőrzés mellett

mesterségesen előállított Si egykristályok



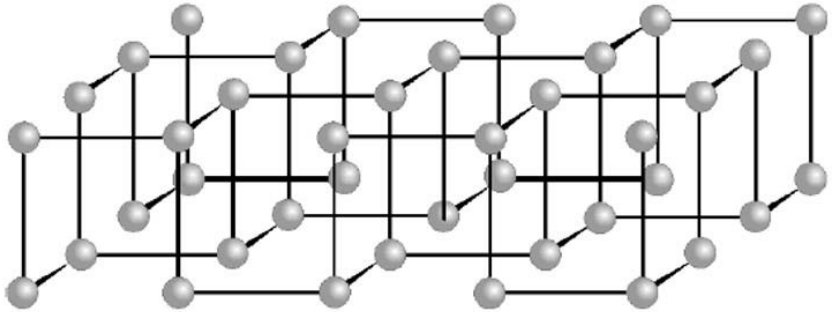
Kristálytan

kristály: szilárd anyagok, amelyekben az anyag részecskéi térrácsszerkezettel rendelkeznek

részecskék: atomok, ionok, molekulák

a részecskék a térbeli rács rácspontjain helyezkednek el

a részecskék közötti kötés jellege alapján lehetséges kristálytípusok atom-, ion-, molekula- és fémrács



Alapfogalmak

térrács: kiterjedés nélküli pontok (rácspontok) szabályos rendje a térben

- megadása:

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + n_i\bar{a}_1 + n_j\bar{a}_2 + n_k\bar{a}_3$$

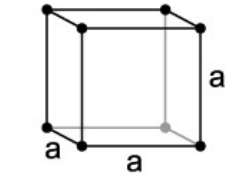
ahol n_i, n_j, n_k egész számok (pozitív, negatív, 0)
$\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3$ transzlációs vektorok

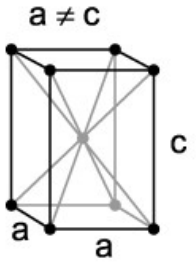
- a $\bar{r}_0$ a térrács tetszőleges pontjára mutat, akkor $\bar{r}$ is pontosan azonos környezetű pontra illeszkedik
- ha a transzlációs vektor két rácspontot köt össze, akkor transzlációs egységvektornak hívjuk

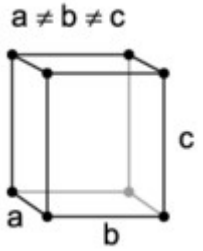
Alapfogalmak

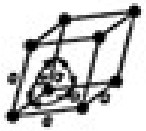
a transzlációs vektorok tetszőleges megválasztásával hét, egymástól eltérő rácsszerkezet adható meg:

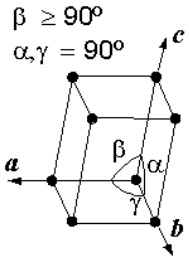
- köbös
- tetragonális
- rombos (ortorombos)
- romboéderes
- monoklin (egyhajlású)
- hexagonális (hatszöges)
- triklin (háromhajlású)

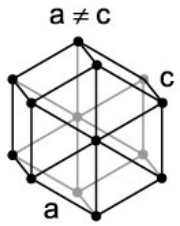


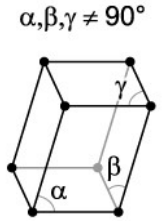










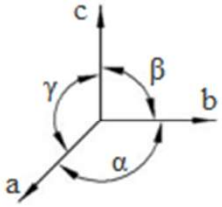


Kristályrács típusok

leírásához alkalmazandó tengelykeresztek

merőlegesek

1. Köbös: (szabályos)

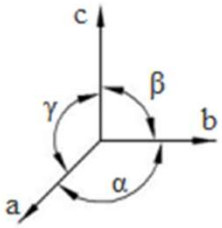


$a=b=c$

$\alpha=\beta=\gamma=\frac{\pi}{2}$

Pl.: Cu, Ni, Fe, V, Cr, Pb, st

2. Tetragonális: (négyzetes)

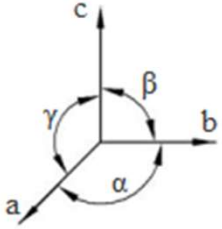


$a=b\neq c$

$\alpha=\beta=\gamma=\frac{\pi}{2}$

Pl.: In, Sn
ha $13°C < t < 161°C$

3. Rombos: (ortorombos)

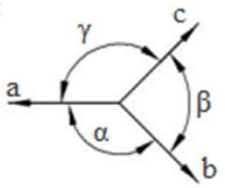


$a\neq b\neq c$

$\alpha=\beta=\gamma=\frac{\pi}{2}$

Pl.: Ga, U α módosulata

4. Romboéderes: (trigonális)

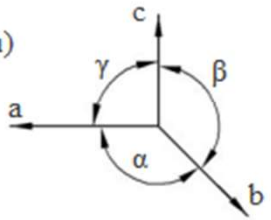


$a=b=c$

$\alpha=\beta=\gamma\neq\frac{\pi}{2}<120°\left(\frac{2\cdot\pi}{3}\right)$

Pl.: Hg, Bi, As

5. Monoklin: (egyhajlású)

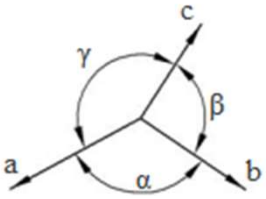


$a\neq b\neq c$

$\alpha\neq\frac{\pi}{2}\quad\beta=\gamma=\frac{\pi}{2}$

Pl.: S

6. Triklin:

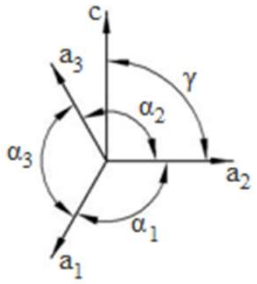


$a\neq b\neq c$

$\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq\frac{\pi}{2}$

Pl.: Se, Te

7. Hexagonális: (hatszöges)



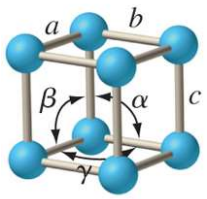
$a_1=a_2=a_3\neq c$

$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\frac{2\cdot\pi}{3}\qquad\gamma=\frac{\pi}{2}$

Pl.: Cd, Mg, Zn

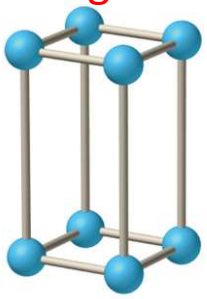
Kristályrács típusok

köbös



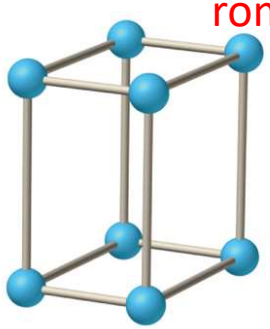
Simple cubic
$a = b = c$
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

tetragonális



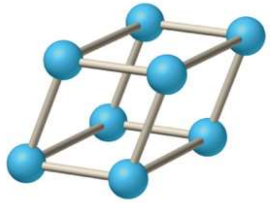
Tetragonal
$a = b \neq c$
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

rombos



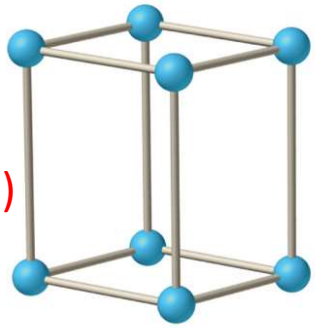
Orthorhombic
$a \neq b \neq c$
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

romboéderes



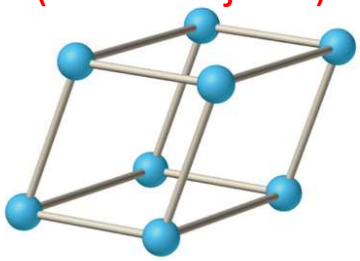
Rhombohedral
$a = b = c$
$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

monoklin
(egyhajlású)



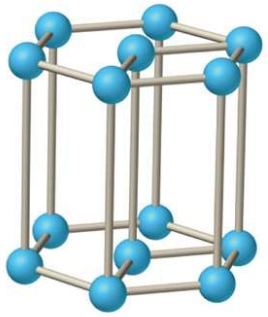
Monoclinic
$a \neq b \neq c$
$\gamma \neq \alpha = \beta = 90^\circ$

triklin
(háromhajlású)



Triclinic
$a \neq b \neq c$
$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

hexagonális
(hatszöges)



Hexagonal
$a = b \neq c$
$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

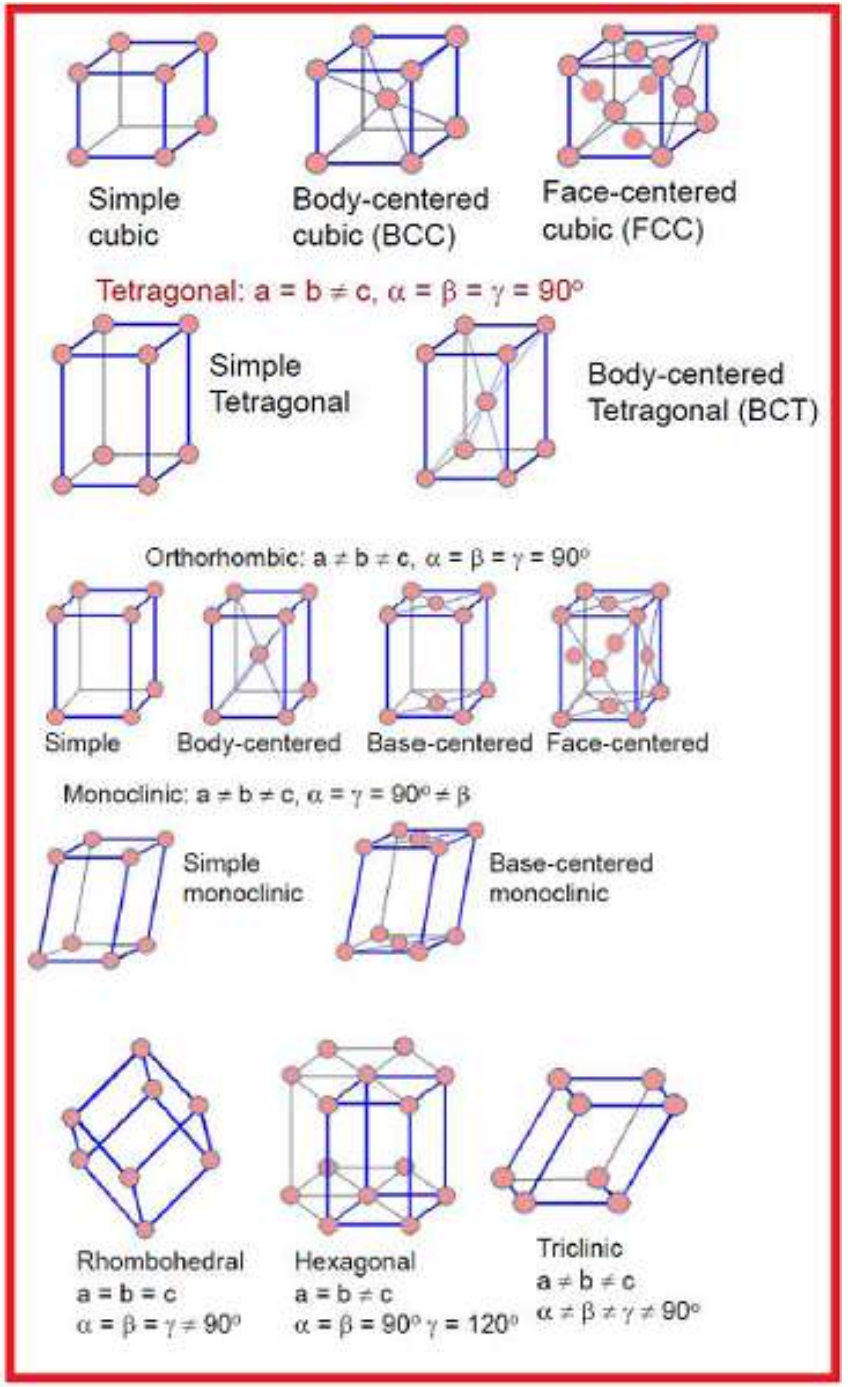
Kristályrács típusok

Bravais kimutatta nemcsak az elemi cellák sarkain lehetnek részecskék, hanem a lapátlók, testátlók metszéspontjaiban is

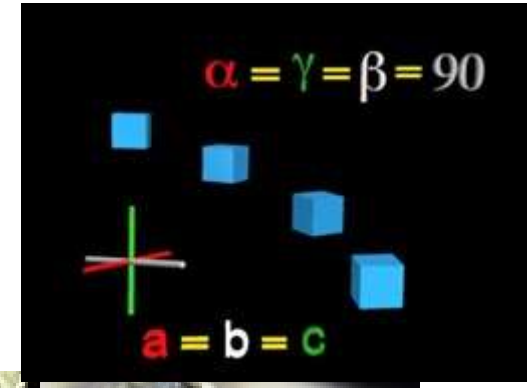
így összesen 14 különböző elemi cella lehetséges

Bravais-cellák

TRANSZLÁCIÓS VEKTOROKKAL KÉPZETT KRISTÁLYRENDSZEREK	
KÖBÖS	$\lvert a_1\rvert=\lvert a_2\rvert=\lvert a_3\rvert$ $a_1 a_2 = a_2 a_3 = a_1 a_3 = 0$
TETRAGONÁLIS	$\lvert a_1\rvert=\lvert a_2\rvert\neq\lvert a_3\rvert$ $a_1 a_2 = a_2 a_3 = a_1 a_3 = 0$
ORTOROMBOS	$\lvert a_1\rvert\neq\lvert a_2\rvert\neq\lvert a_3\rvert$ $a_1 a_2 = a_2 a_3 = a_1 a_3 = 0$
HEXAGONÁLIS	$\lvert a_1\rvert=\lvert a_2\rvert\neq\lvert a_3\rvert$ $a_1 a_2 = -1/2 \neq a_2 a_3 = a_1 a_3 = 0$ (ha $\lvert a_1\rvert = 1$)
MONOKLIN	$\lvert a_1\rvert\neq\lvert a_2\rvert\neq\lvert a_3\rvert$ $a_2 a_3 \neq a_1 a_2 = a_1 a_3 = 0$
ROMBOÉDERES	$\lvert a_1\rvert=\lvert a_2\rvert=\lvert a_3\rvert$ $a_1 a_2 = a_2 a_3 = a_1 a_3 \neq 0$
TRIKLIN	$\lvert a_1\rvert\neq\lvert a_2\rvert\neq\lvert a_3\rvert$ $a_1 a_2 \neq a_2 a_3 \neq a_1 a_3 \neq 0$



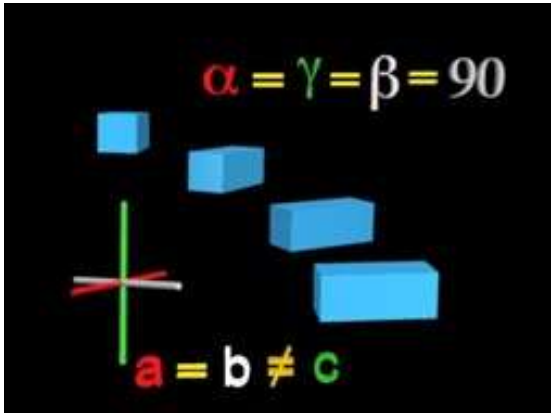
Köbös kristályrácsú anyagok





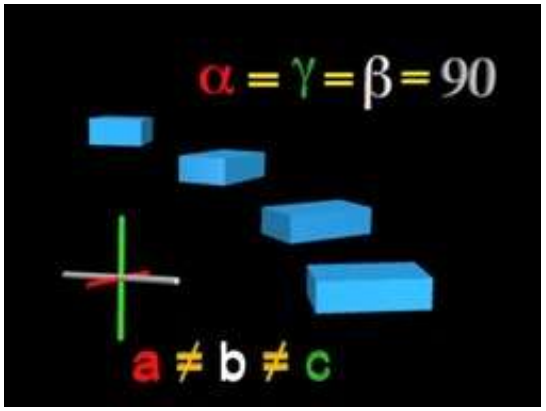
forrás: http://www.theimage.com/crystalinfo

Tetragonális kristályrácsú anyagok





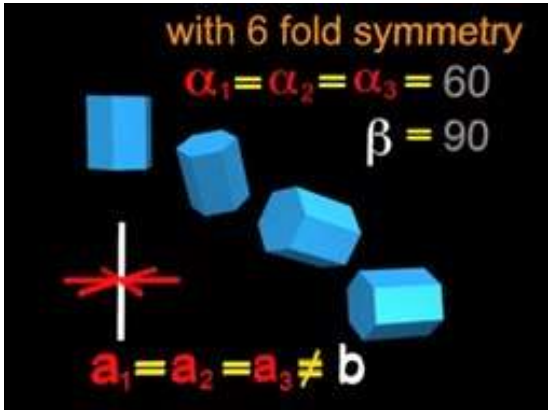
Ortorombos kristályrácsú anyagok







Hexagonális kristályrácsú anyagok











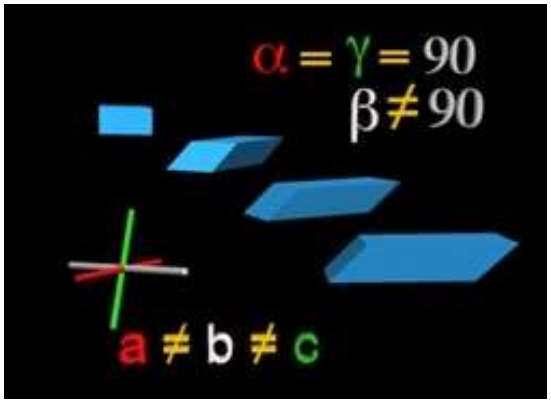








Monoklin kristályrácsú anyagok





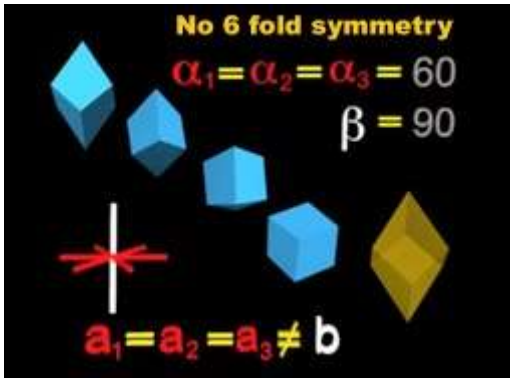


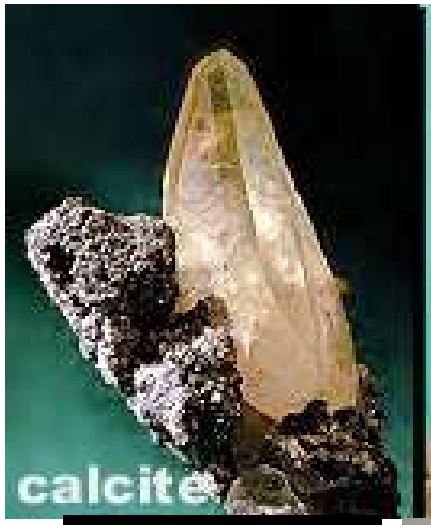




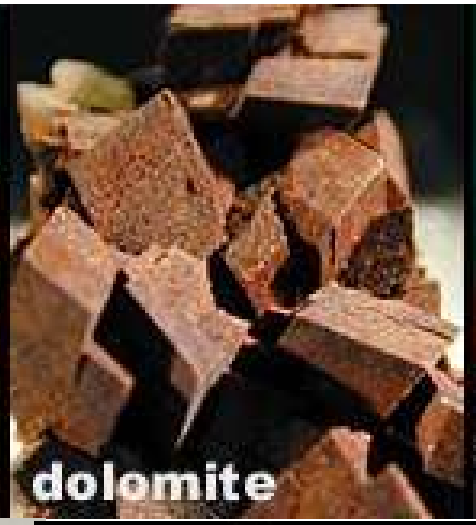


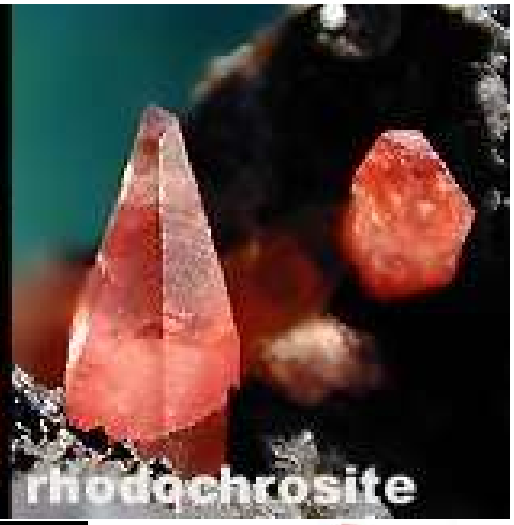
Romboéderes kristályrácsú anyagok











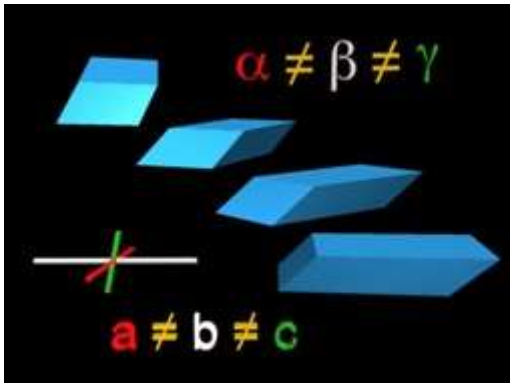








Triklin kristályrácsú anyagok















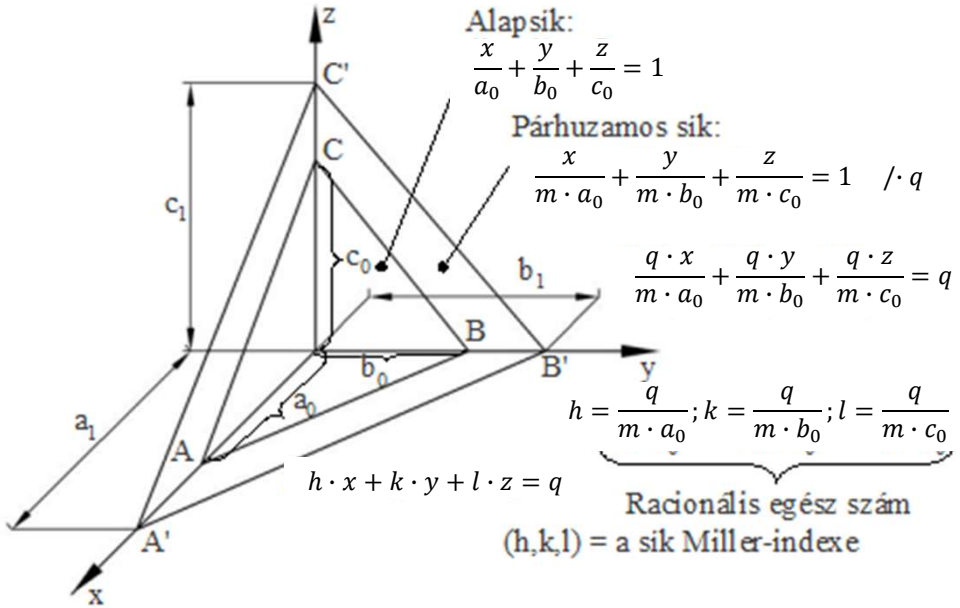
Kristálysíkok, irányok

legyen adott az xyz koordinátarendszer

legyenek adottak az A, B, C pontok az egyes tengelyeken

a pontok által kifeszített sík egyenlete:

$$\frac{x}{a_0}+\frac{y}{b_0}+\frac{z}{c_0}=1$$



írjuk át az egyenletet:

$$h'x+k'y+l'z=1$$

ahol az együtthatók általában tört számok

Kristálysíkok, irányok

szorozzuk meg egy olyan q számmal az egyenletet, hogy valamennyi együttható egész szám legyen:

$$h'qx + k'qy + l'qz = q \quad \text{vagy} \quad hx + ky + lz = q$$

a (h,k,l) kifejezés lesz a sík Miller-indexe

pontosabban egy azzal párhuzamos síké

a kristályokban a párhuzamos síkok egymással egyenértékűek

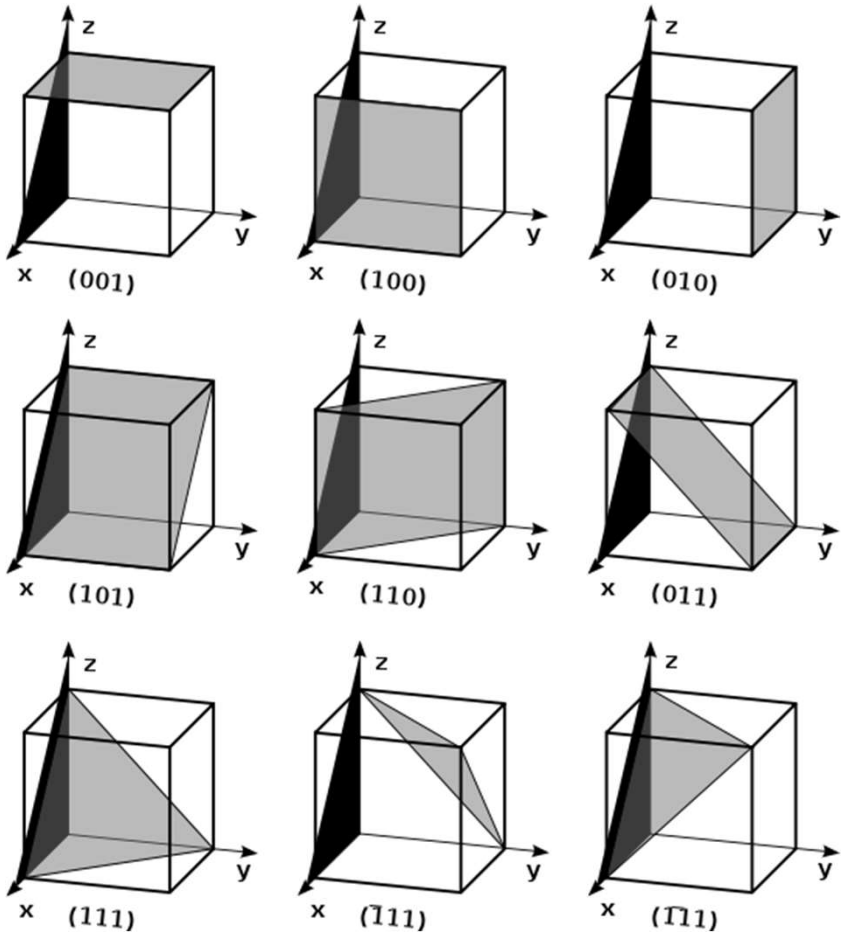
így a Miller-index egy síksereg jellemzését adja

kristályban a párhuzamos síkok távolsága 0,1 nm = 10^{-10} m

Kristálysíkok, irányok

néhány kristálysík
és Miller-indexe

- ha lap a tengelyt egységnyi távolságban metszi, akkor az index értéke 1
  ha lap párhuzamos a tengellyel, akkor az index értéke 0
- ha a sík a tengelyt negatív értéknél metszi, akkor az $\bar{1}$-sal (vagy `1) jelölik



Kristálysíkok, irányok

Miller-index segítségével adható meg:

- törésfelület
- legnagyobb terhelhetőség iránya
- legnagyobb mágneses indukció értéke

- a Fe hasadási síkja valamelyik kockalap, azaz az (100), a (010) vagy a (001), röviden ezt {100}-val jelölik
- a Si vagy Ge félvezetőeszközök lapjainak az {111} síkok valamelyikével kell párhuzamosnak lennie

Kristálysíkok, irányok

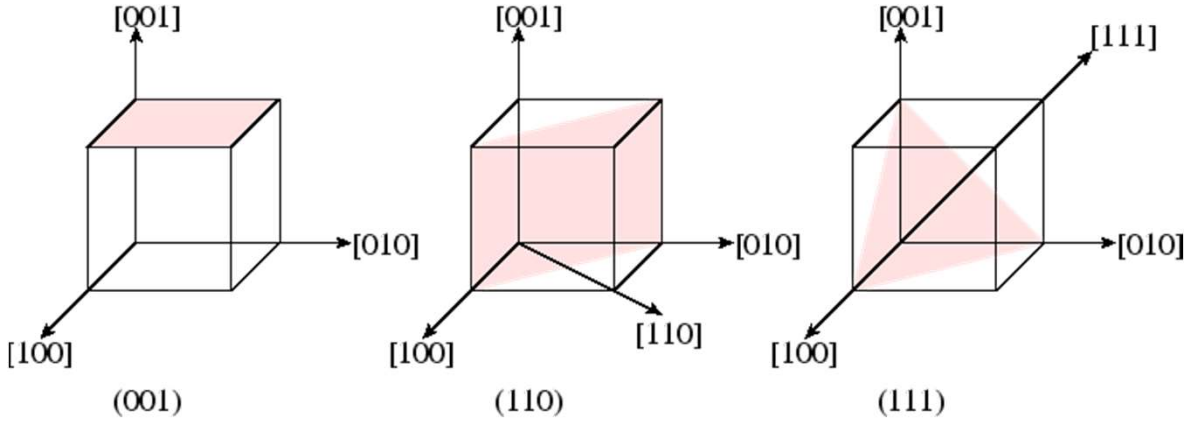
kristályirány

$$\bar{T} = n_i \bar{a}_1 + n_j \bar{a}_2 + n_k \bar{a}_3$$

a T transzlációs vektorban a három (egész) együttható egyértelműen megszab egy irányt a kristályban

a kristályirány Miller-indexe $[n_i n_j n_k]$

összevont irányok jelölése $\langle n_i n_j n_k \rangle$



Kristálytani adatok

kristályok jellemzésére használt adatok:

- koordinációs szám
- atomátmérő
- térkitöltés
- kristály legnagyobb hézagainak nagysága
- egy elemi cellában található atomok száma
- legszorosabb illeszkedésű kristálysík és irány

Kristálytani adatok

koordinációs szám

- egy atom legközelebbi szomszédjainak száma

atomátmérő (ionátmérő)

- névleges mutatószám, a legközelebbi szomszédok távolsága
- nem a tényleges fizikai méret!
- egy meghatározott fajtájú atomnak csak egy adott átmérője lehet

térkitöltés

- az elemi cellában a gömböknek feltételezett atomok és a cella térfogatának hányadosa

Kristálytani adatok

kristály legnagyobb hézagainak nagysága

- az a rés az atomok között, ahová a legnagyobb átmérőjű gömböt lehet beilleszteni
- ötvözés, szennyezés miatt van jelentősége

az elemi cellában található atomok száma

- függ a cella milyenségétől
- a sarkokon levő atomokat megfelelő arányban kell figyelembe venni!

legsűrűbb illeszkedésű sík

- a felületegységre eső atomok száma a legnagyobb
- irány: hosszegységre jutó atomok száma legnagyobb

Elemi cellák

köbös kristályrács

- az alapcella kocka
- változatai:
  - egyszerű
  - térben középpontos
  - felületen középpontos
  - gyémánt

Elemi cellák – egyszerű köbös

csak a Po

koordinációs száma 6

1 atom van a cellában

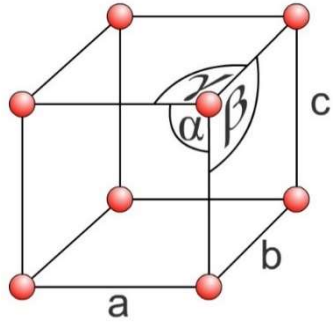
atomátmérő (d) = rácsállandó = elemi cella élhosszúsága (a)

térkitöltés $V_a = \frac{d^3\pi}{6} = 0{,}52d^3$ $\frac{V_a}{V_c} = \frac{0{,}52d^3}{a^3} = 0{,}52$

hézag a kocka közepén $l = a\sqrt{3} - a = 0{,}73a$

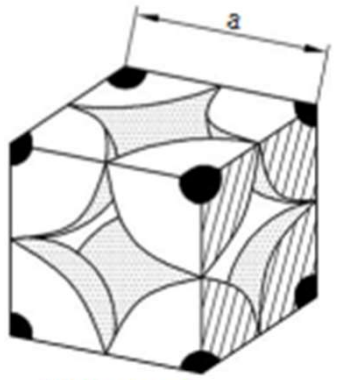
legsűrűbb sík: lapok {100};

legsűrűbb irány: élek ⟨100⟩



a = b = c

α = β = γ = 90°



(Polonium)

Elemi cellák – térben középpontos

Li, K, Na, Ba, V, Ta, Cr, Mo W,
Fe (<911°C és >1392 °C)

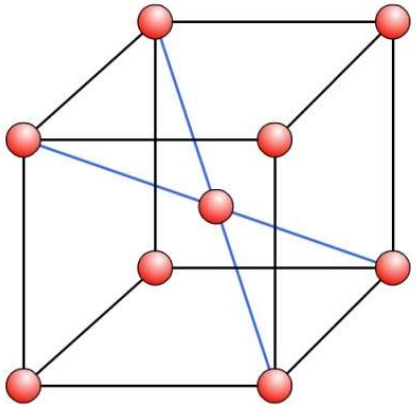
nagy az affinitásuk az oxigénhez

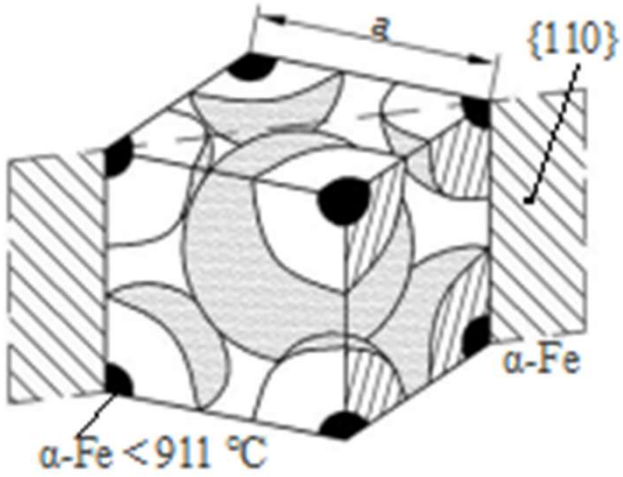
koordinációs szám 8

az atomok a testátlón érintik egymást,

atomátmérő a testátló fele: $d = \frac{\sqrt{3}}{2} a$

egy elemi cellában 2 atom van





Elemi cellák – térben középpontos

egy atom térfogata

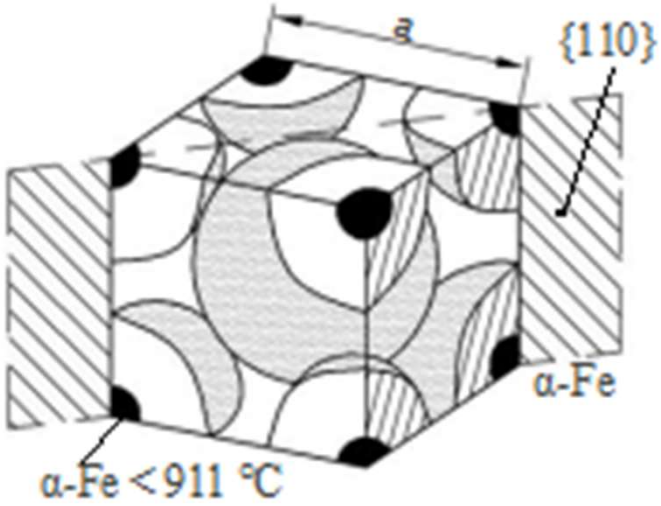
$$V_a = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)^3 \frac{\pi}{6} = 0{,}34a^3 \qquad \text{2 atom: } 0{,}68a^3$$

legnagyobb rács hézag az $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, 0\right)$ helyen van, mérete $0{,}252a$;

további kisebb hézagok: $0{,}134a$

legsűrűbb sík az {110} sík

legsűrűbb irány: a test átló $\langle 111 \rangle$



Elemi cellák – felületen középpontos

Cu, Au, Ag, Al, Th, Pb, Ni, Rh, Pt, Fe (910<>1392°C)

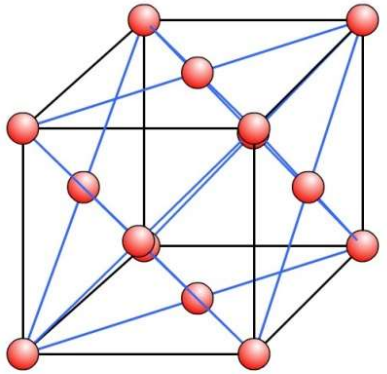
koordinációs szám 12 (max!)

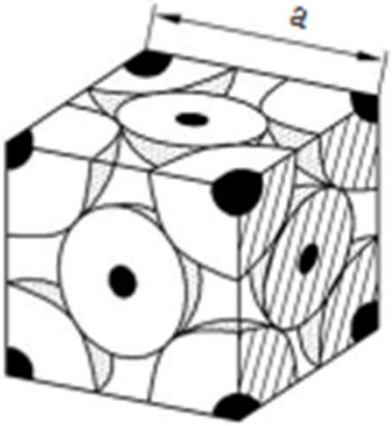
atomátmérő: $d = \frac{\sqrt{2}}{2} a$, lapátló fele

egy cellában 4 atom van

térkitöltés: 0,74

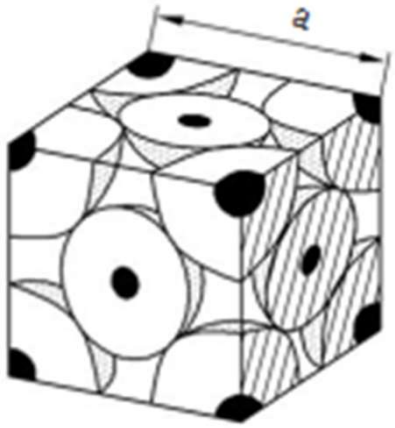
legnagyobb hézag az $\left(\frac{1}{2}, 0{,}0\right)$, $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ helyeken van, értéke $0{,}293a$ – nagyobb, mint térben középpontosnál!





Elemi cellák – felületen középpontos

legsűrűbb sík az {111} sík
legsűrűbb irány: a lapátló ⟨110⟩



az egyszerű és térben központosnál is találunk olyan irányt, ahol a rácspontok atomátmérőnyi távolságra vannak egymástól

a felület középpontosnál van ilyen sík is!

Elemi cellák – gyémántrács

C (gyémánt), Si, Ge, Sn (<13°C)

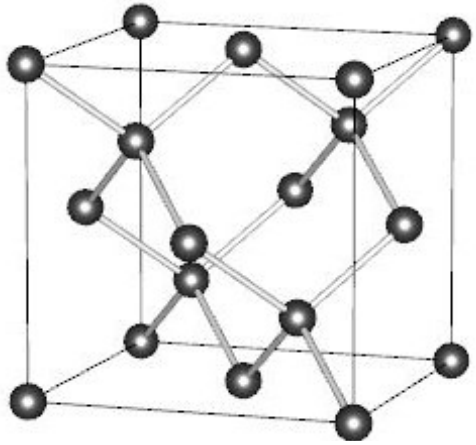
tetraéderes koordináció (minden C atomot másik 4 vesz körül tetraéderes elrendezésben)

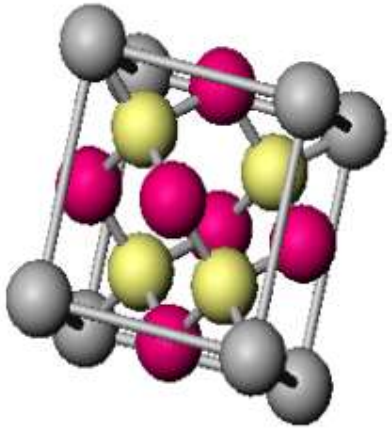
koordinációs szám 4

atomok száma 8

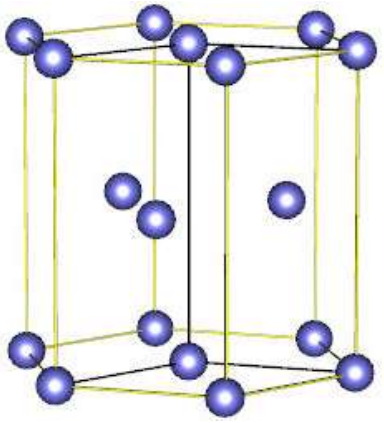
atomátmérő: $d = \frac{\sqrt{3}}{4} a,$

térkitöltés 0,34





Elemi cellák – hexagonális



Be, Mg, Zn Cd, Ti (<882°C), Co (<447°C),

koordinációs szám 12 (max!)

atomátmérő: $d = 1{,}63a$, lapátló fele

egy cellában 6 atom van

térkitöltés: 0,74

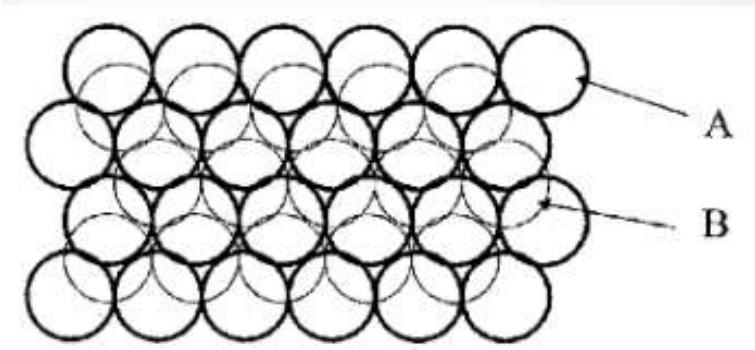
leíráshoz módosított tengelyrendszer és Miller-index

- 4 tengelyű rendszer
- Miller-index is 4 tagú

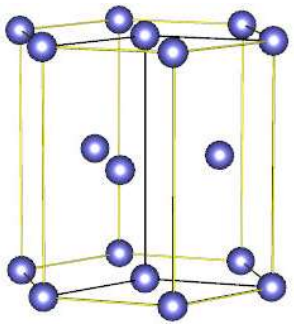
Elemi cellák – hexagonális

legsűrűbb illeszkedésű sík:

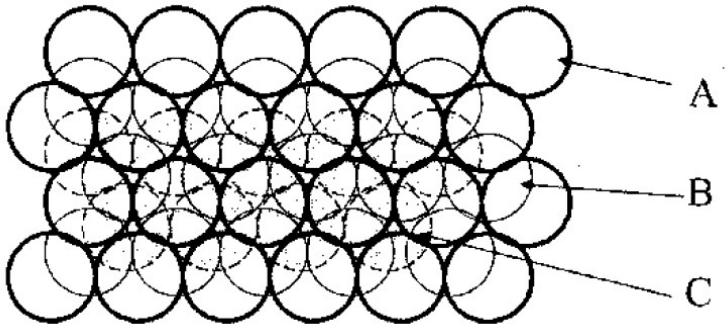
hexagonális rács



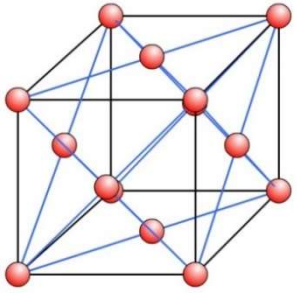
rétegek rendje:
ABAB



felületen középpontos rács



ABCABC



Reális kristályok, kristályhibák

kristályok – tökéletes szerkezetek?

20-as évek vizsgálatai: a fémkristályok meghatározott kristálysíkok mentén mozdulnak el

Frenkel-modell az elméleti folyáshatár (az a terhelés, amire maradandó alakváltozás jön létre) meghatározására

az eredmény nagyságrendekkel nagyobb értek lett, mint a gyakorlati csúsztatófeszültség:

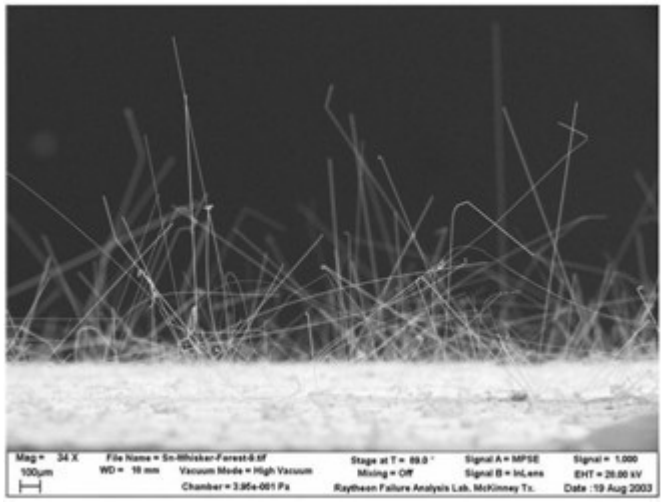
anyag	számolt [Pa]	mért [Pa]
vas	$1{,}296 \cdot 10^{10}$	$27 \cdot 10^{6}$
alumínium	$0{,}42 \cdot 10^{10}$	$0{,}98 \cdot 10^{6}$

Reális kristályok, kristályhibák

50-es években sikerült igazolni, hogy a Fernkel-modell jó: néhány mikrométer vastagságú tűkristályokon (whisker) sikerült igazolni az elméleti értékeket

whisker: hajszálszerű kristályos struktúrák
átmérő: ≈1μ
hossz: ≈ 1-10mm

integrált elektronikai elemeknél zárlatot okozhatnak



Reális kristályok, kristályhibák

Kristályhibák típusai

- pontszerű hibák
- egyméretű (vonalszerű) hibák, diszlokációk
- kétméretű (felületszerű) hibák
- háromméretű (térfogati) hibák

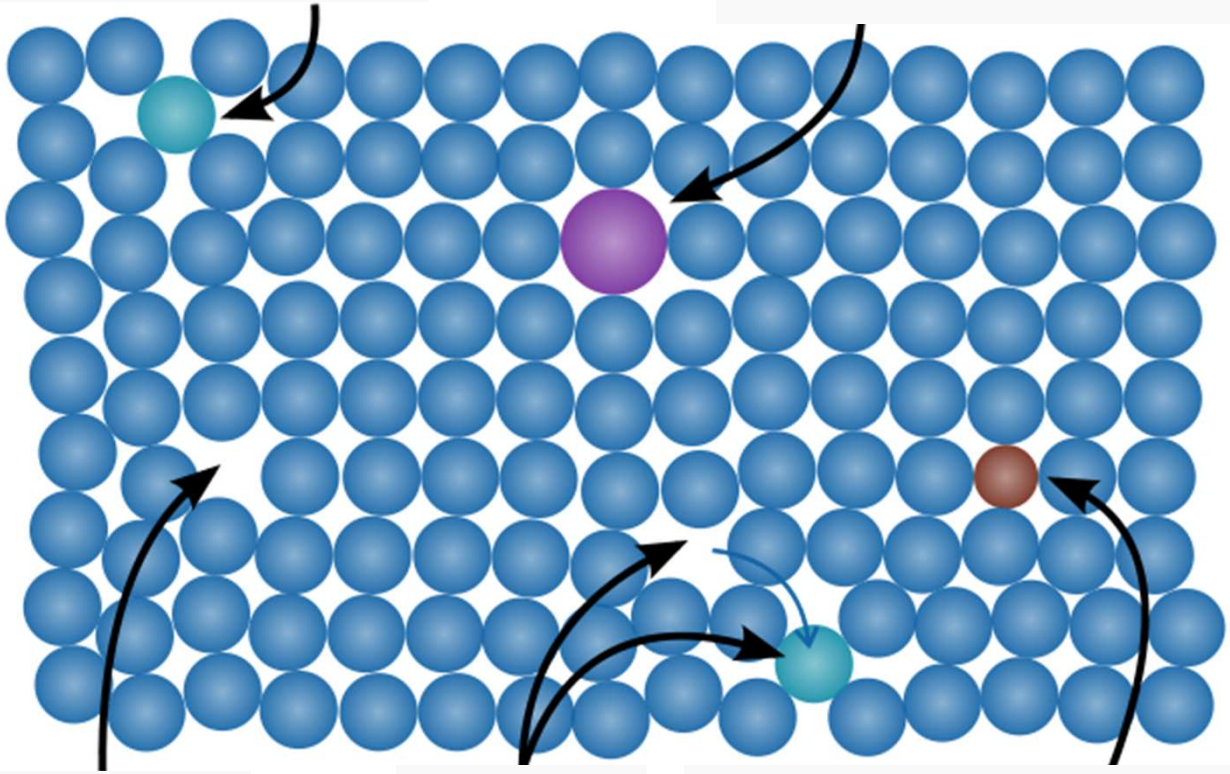
Pontszerű hibák

kiterjedése minden irányban nem több, mint 5-10 atomátmérő

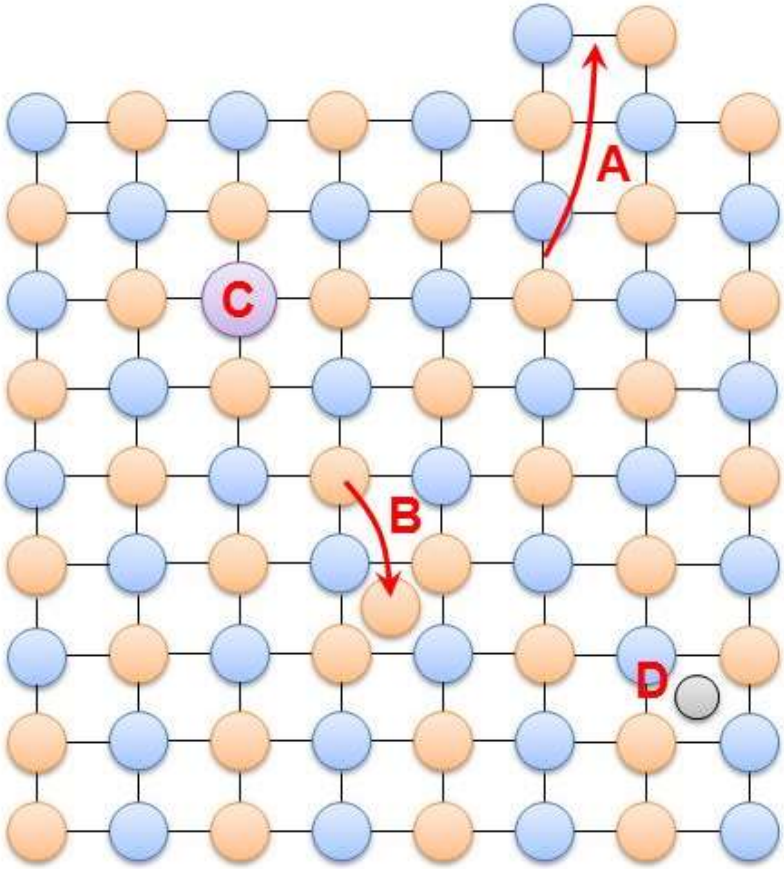
fajtái:

- vakancia (üres rácshely)
- intersztíciós atom (saját)
- idegen atomok intersztíciós vagy szubsztitúciós helyen
- e három típust tartalmazó összetett hibák

Pontszerű hibák



Pontszerű hibák



A. Wagner – Schottky hiba

B. Frenkel hibapár

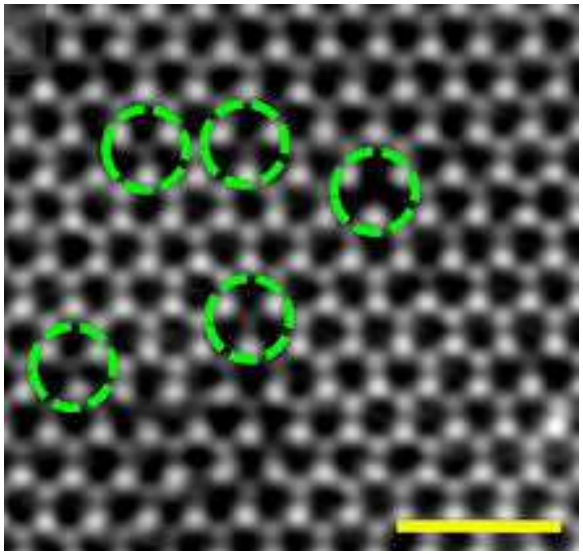
C. szubsztitúciós atom

D. intersztíciós atom

Pontszerű hibák

keletkezésük

- termikus hibák
- képlékeny alakváltozás
- nagyenergiájú részecskék becsapódásakor



Pontszerű hibák

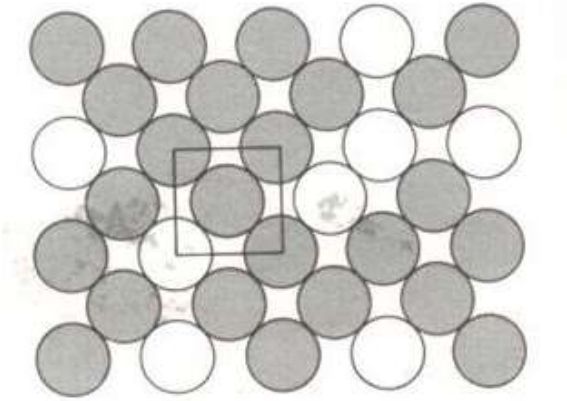
ötvözetekben:

- ha az atomok mérete közelítőleg megegyezik: szubsztitúciós szilárd oldat

- ha az ötvöző atom mérete sokkal kisebb: intersztíciós szilárd oldat

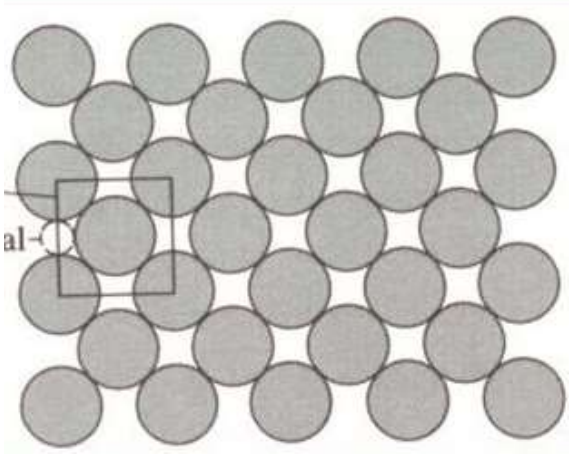
réz

cink



vas

szén



Pontszerű hibák

termikus hibák

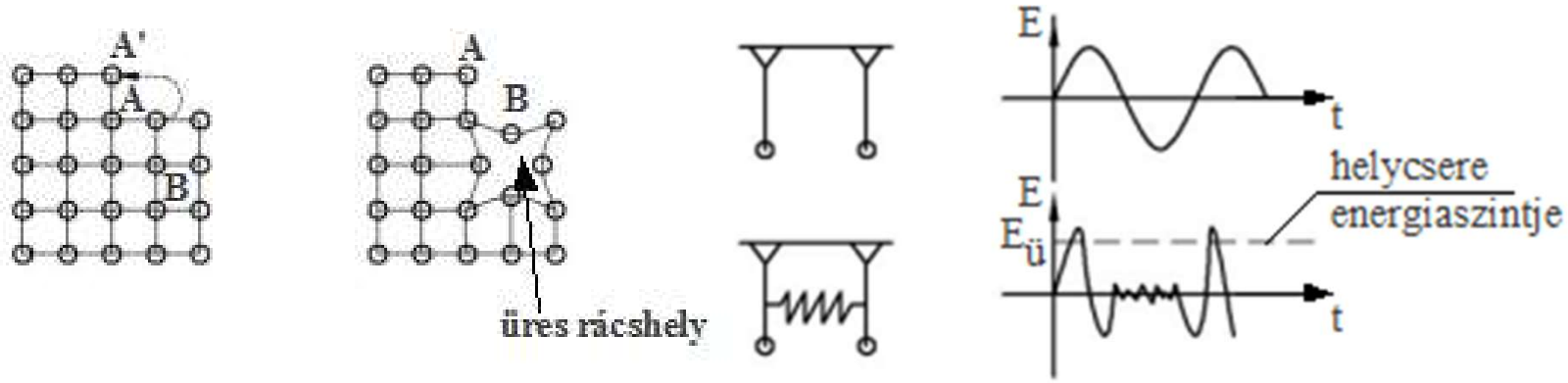
- gyors hűtésnél jönnek létre
- lassú hűtés esetén kicsi a valószínűségük – van idő az atomok szabályszerű elrendeződésére
- intersztíciós atomokhoz 4-5-ször nagyobb energia kell, mint az üres rácshelyekhez

Frenkel hibapár: a kristályszerkezet egy atomja olyan nagy energia tesz szert, hogy ki tud lépni a helyéről – kis valószínűségű hiba

Pontszerű hibák

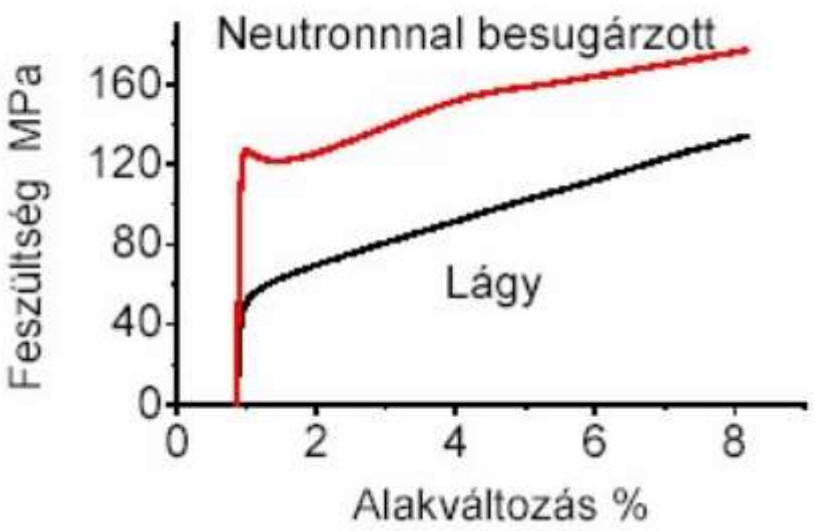
Wagner – Schottky hiba: a kristály határán keletkezik, és diffúzióval jut a kristály belsejébe, kisebb energia kell hozzá, nagyobb a valószínűsége

Wagner – Schottky hiba magyarázata lengő ingákkal

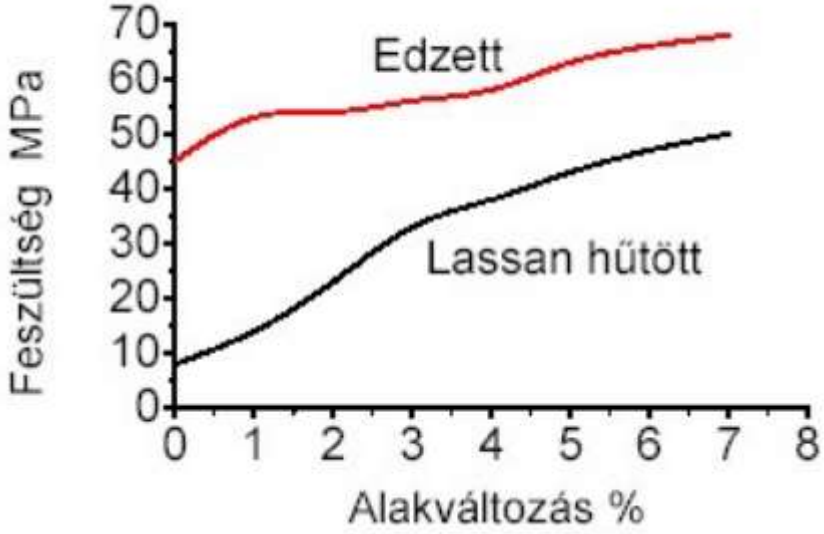


Pontszerű hibák

ponthibák hatása



alumínium



réz

Egyméretű hibák

az elméleti és a gyakorlati folyáshatár különbségének az oka, hogy az elmozdulás nem a teljes síkon egyszerre játszódik le, hanem csak egy szűk tartományra korlátozódik

ez magyarázza, hogy a Frenkel-modell által jósoltnál jóval kisebb energia elegendő a képlékeny alakváltozáshoz

első leírói: Orowán Emil, Polányi Mihály – G. I. Taylor

diszlokáció: elcsúszott és el nem csúszott tartományok közötti határvonal

Egyméretű hibák

típusai:

- éldiszlokáció
- csavardiszlokáció
- síkgörbe diszlokáció
- térgörbe diszlokáció

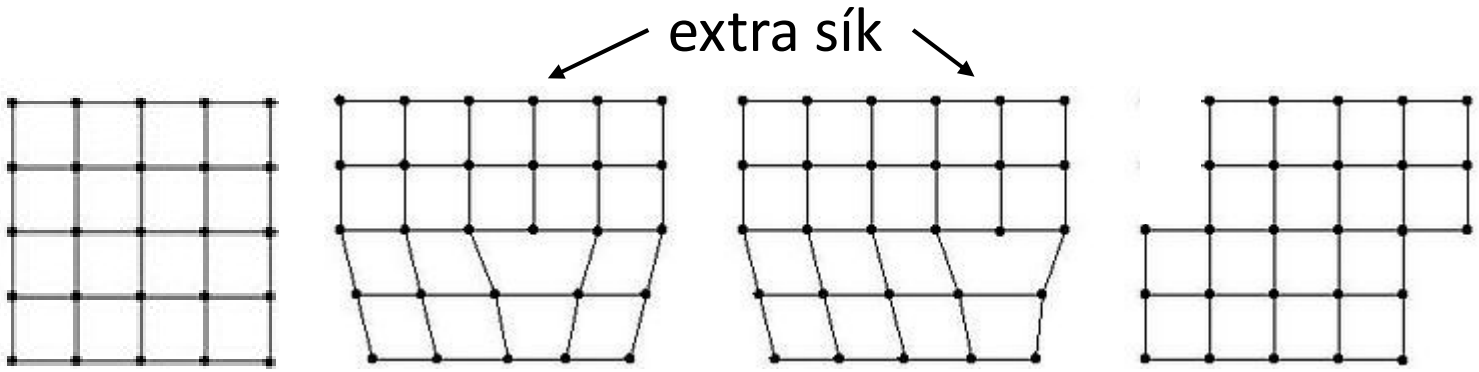
számos már típus is létezik még

a hibák környezetében nem érvényes a kristályokra megadott egyenlet

Egyméretű hibák

éldiszlokáció

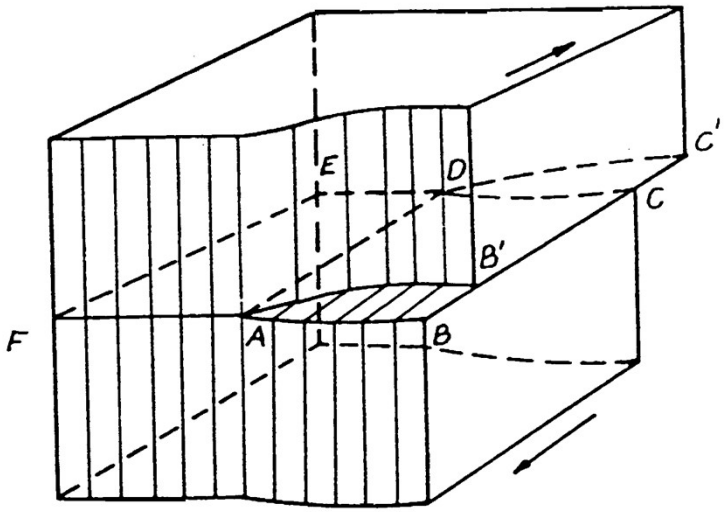


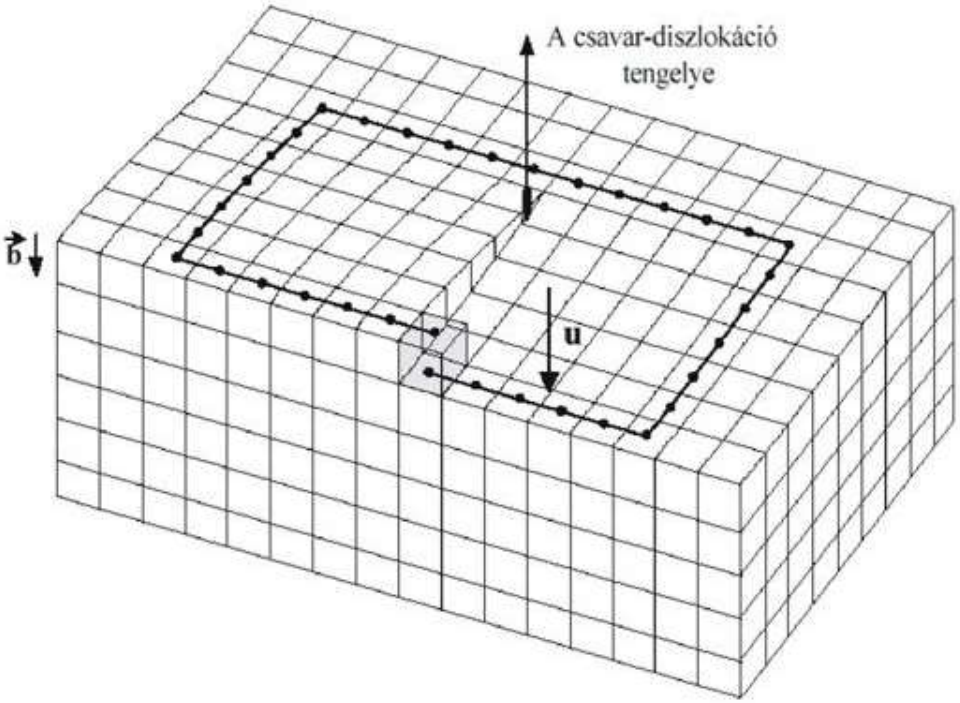


kezdeti helyzet közbülső helyzetek végállapot

Egyméretű hibák

csavardiszlokáció

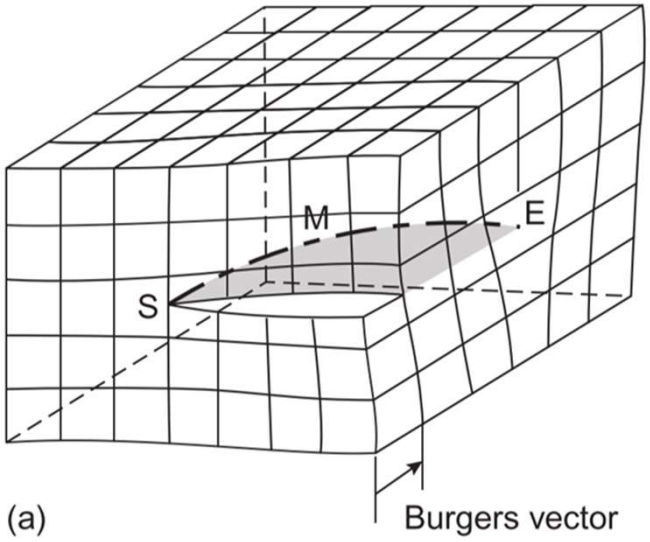


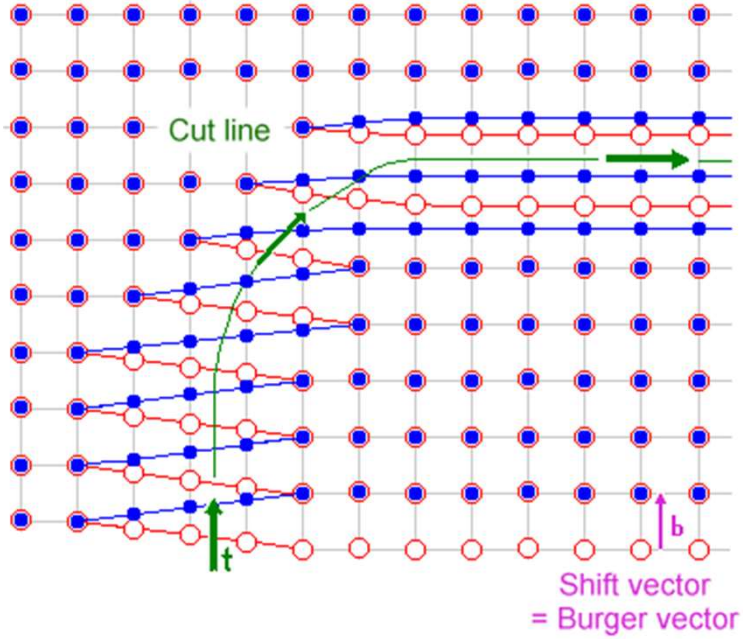


Egyméretű hibák

síkgörbe (kevert) diszlokáció

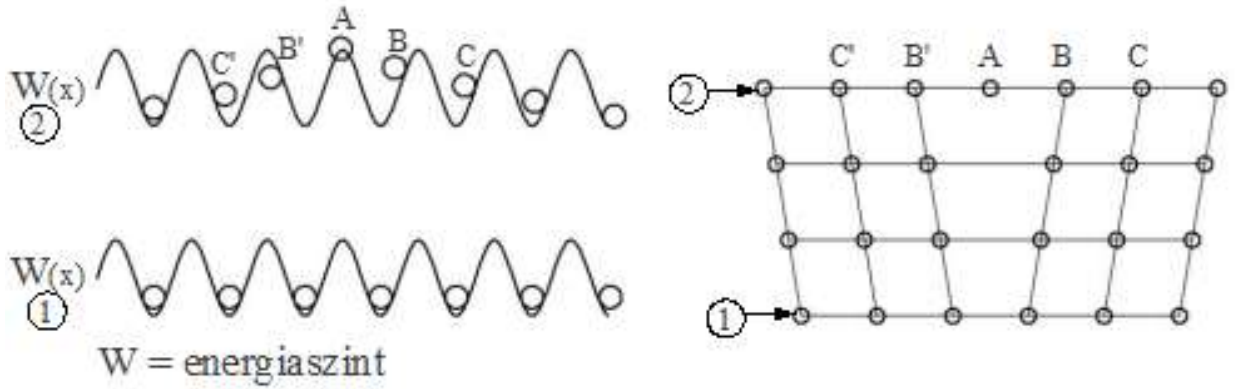
- az E pontra nézve éldiszlokáció
- az S pontra nézve csavardiszlokáció





Egyméretű hibák

miért csökkentik a diszlokációk az elméleti folyáshatárt?



Egyméretű hibák

diszlokációk száma:

- lágyított fémben 10^4-10^8 / mm^2
- hidegen alakított fémben 10^8-10^{10} / mm^2
- a képlékeny alakítás növeli a diszlokációk számát, ez az anyag keményedését és így szívósságának csökkenését okozza



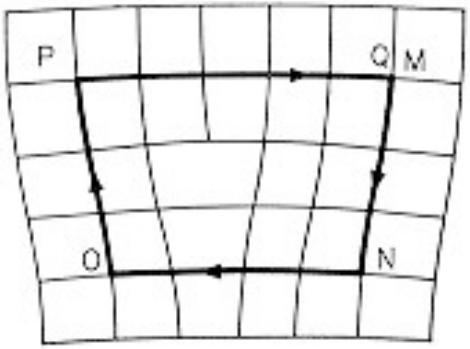
transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel egy titán ötvözetről, a sötét vonalak a diszlokációk

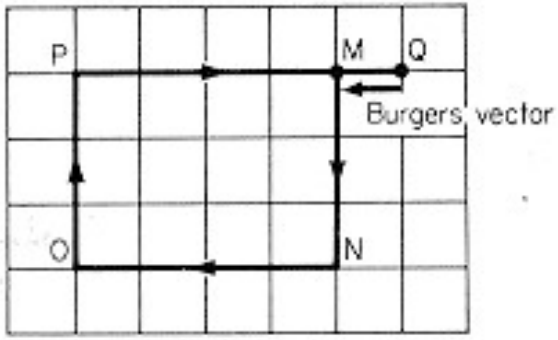
Diszlokáció leírása: Burgers-vektor

Burgers-kör

- ha a körüljárás visszavezet a kiindulás pontba, akkor nincs diszlokáció
- ha a kezdő és a végpontok nem esnek egybe, akkor van

Burgers-vektor: az eredeti kiindulási és az új végpontot összekötő vektor

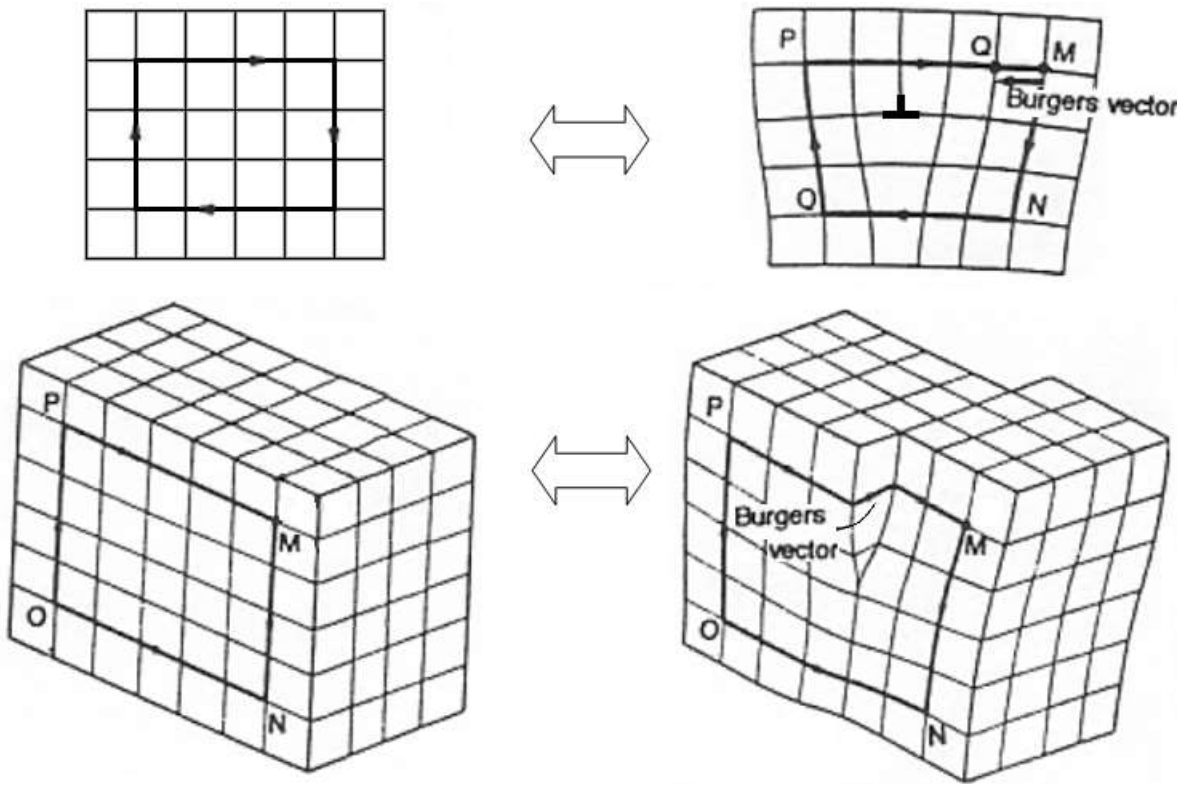




Diszlokáció leírása: Burgers-vektor

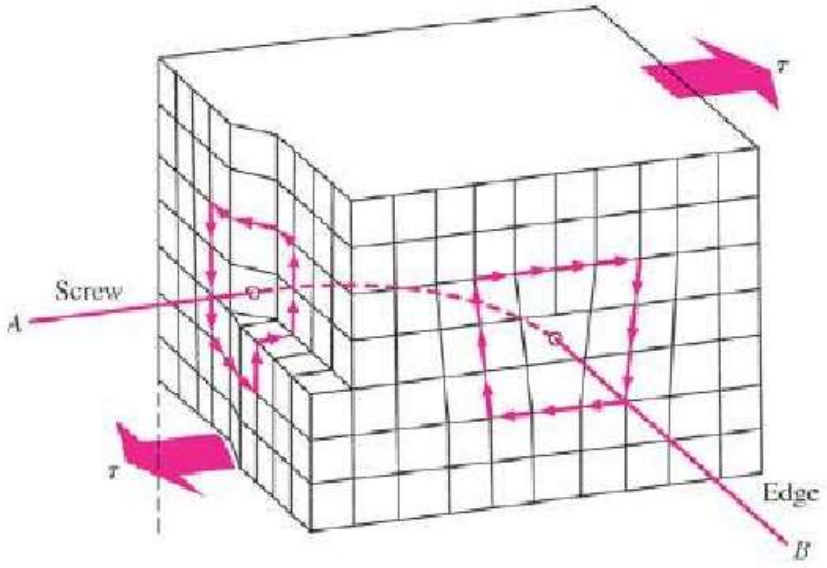
diszlokációk jellemzése Burgers-vektorral

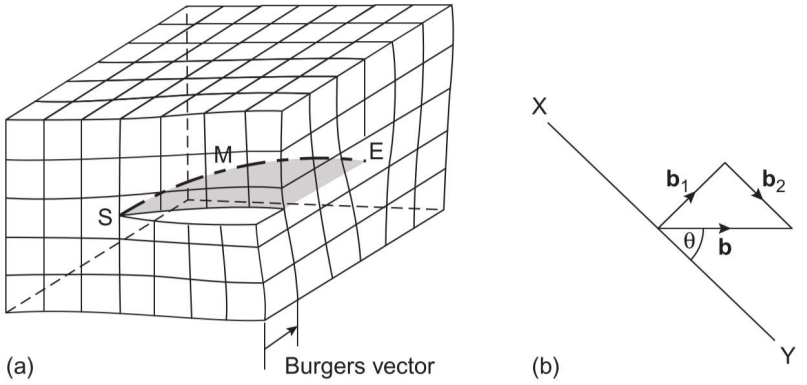
- éldiszlokáció
  a vektorok egy síkban vannak, és
  egyforma hosszúak
- csavardiszlokáció
  a vektorok egy síkban vannak, de nem egyforma hosszúak



Diszlokáció leírása: Burgers-vektor

kevert diszlokáció





Diszlokációk jellemzése

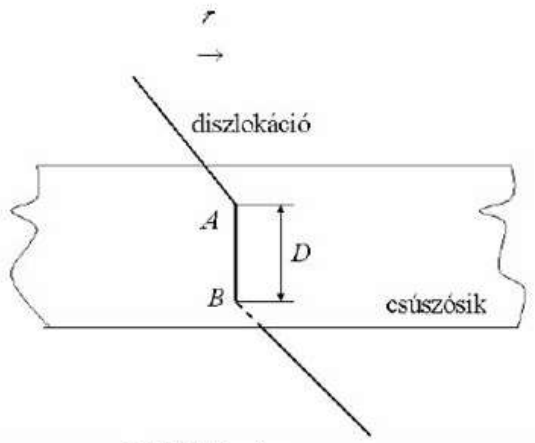
Diszlokációk alapvető tulajdonságai:

- diszlokáció az elcsúszott és az el nem csúszott részek határa
- lineáris (lehet görbült is)
- felületen kezdődik és végződik, kristályban záródó görbe
- több diszlokáció csomópontot alkot
- az elmozdulás mértéke a diszlokáció mentén állandó
- Burgers vektor a legsűrűbb irányban fekszik

Diszlokációk jellemzése

diszlokáció keletkezése

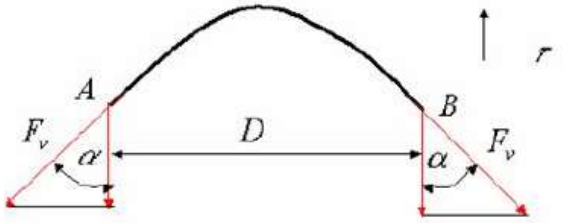
- Frank-Read mechanizmus, mint diszlokáció forrás



Félkörív

labilis

zárt hurok



$$\tau = \frac{2Gb}{D}\cos\alpha$$

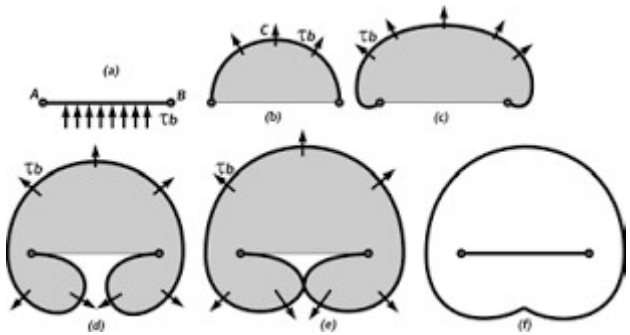
$$\tau_{Max} = \frac{2Gb}{D}$$

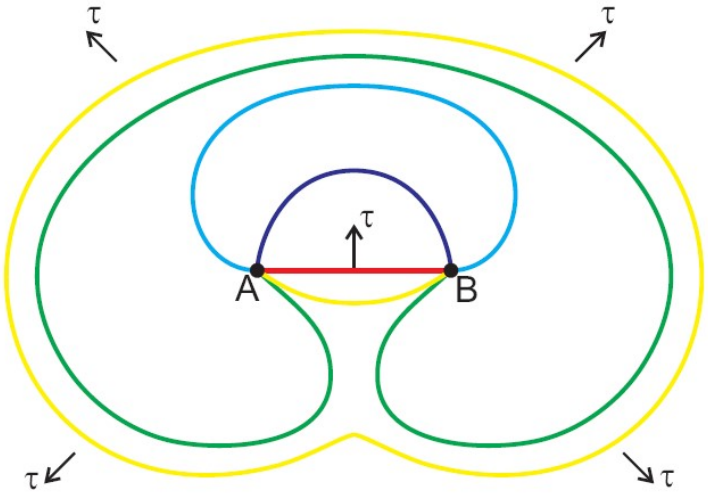
$$\alpha = 0$$

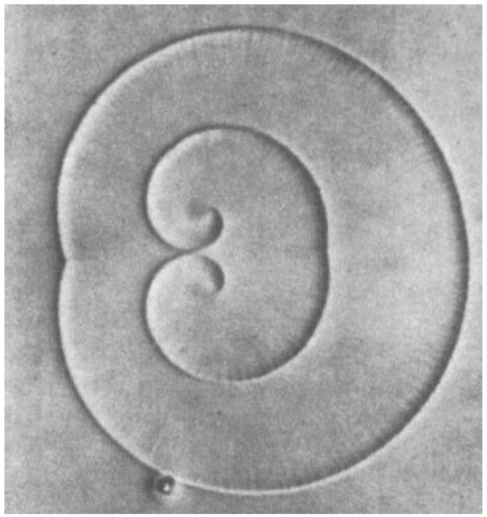
Diszlokációk jellemzése

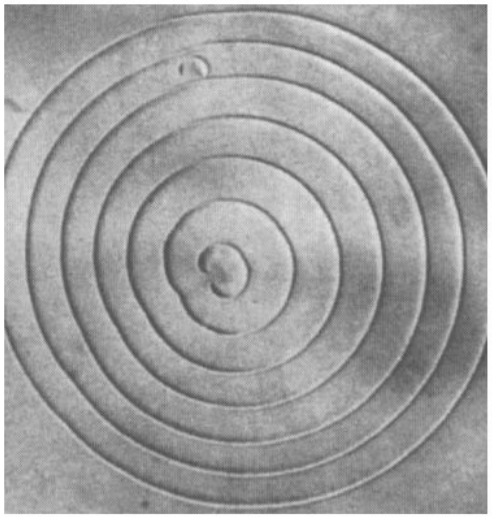
diszlokációk keletkezése:

- Frank-Read forrás működése









Diszlokációk jellemzése

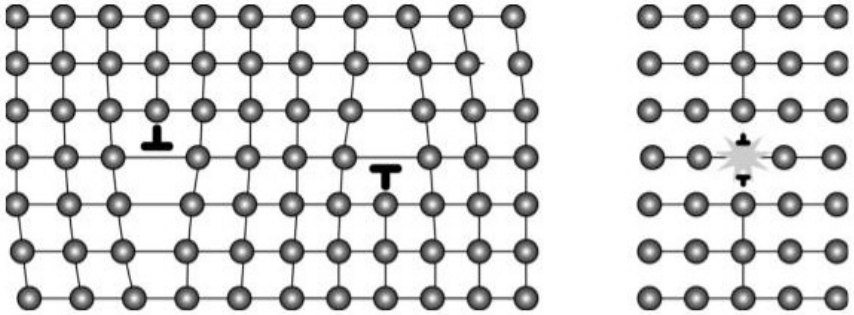
Diszlokációk mozgásának szabályai

- diszlokáció csak abban a síkban tud csúszni, amelyben a vonala és a Burgers vektora fekszik
  - éldiszlokáció: 1 sík
  - csavardiszlokáció: elméletileg ∞ sík
- csúszási rendszerek: diszlokáció mozgása mindig a legsűrűbb síkban és a legsűrűbb irányban történik
- csúszósík váltás:
  - éldiszlokáció: mászás, kúszás, a szemcsehatáron üregek
  - csavardiszlokáció: keresztcsúszás

Diszlokációk jellemzése

diszlokációk kölcsönhatása

- ellentétes előjelű, azonos csúszósíkban fekvő, azonos típusú diszlokációk találkozása kioltja egymást



- ellentétes előjelű, azonos csúszósíkban fekvő, azonos típusú diszlokációk ellentétes irányú mozgása azonos alakváltozást hoz létre

Diszlokációk jellemzése

- azonos előjelű diszlokációk kölcsönhatása:
  - sorba rendeződnek, kisszögű szemcsehatár
  - egyesülhetnek, felbomolhatnak (energia függő)

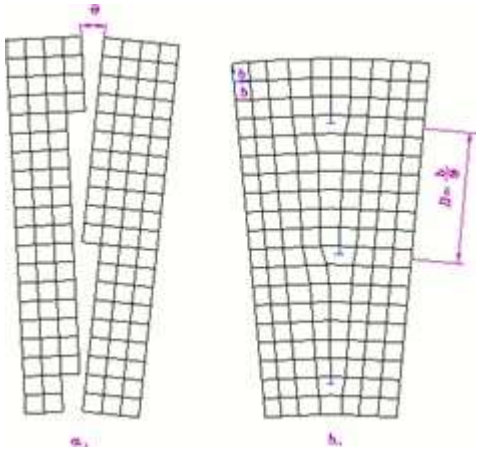
Kétméretű hibák

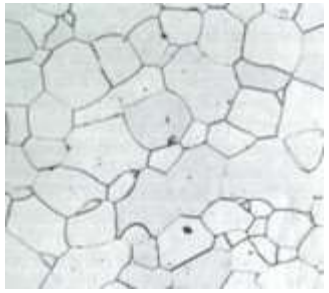
felületszerű hibák:

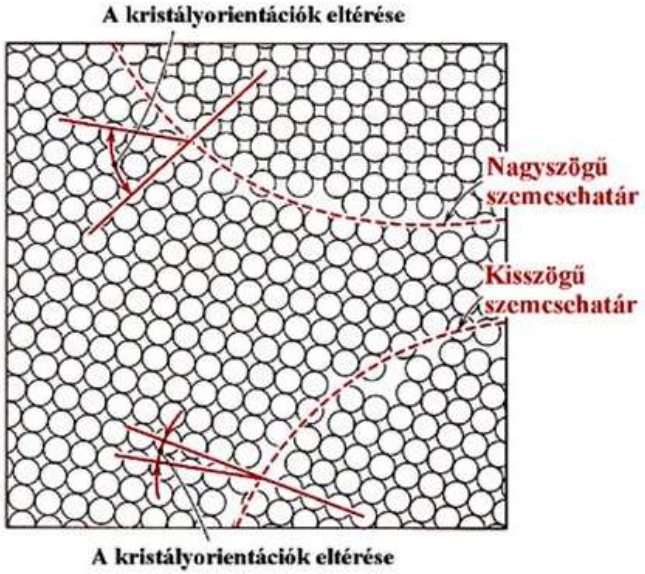
- kristályok felületén elhelyezkedő atomok környezete eltér a kristály belsejében lévő atomokétól
- az egykristályok esetében is igaz
- több fém esetében ez okozza a lejátszódó felületi reakciókat (patina, korrózió)

Kétméretű hibák

krisztallithatár (szemcsehatár) egymástól különböző irányba álló, de azonos fázisú krisztallitok között



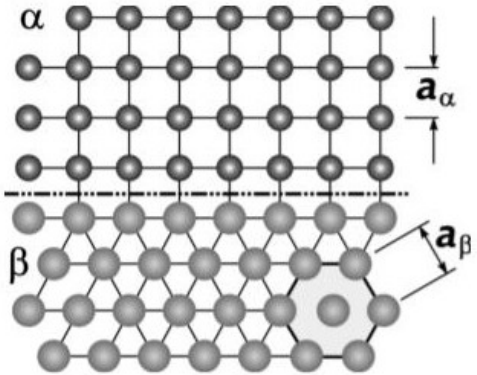




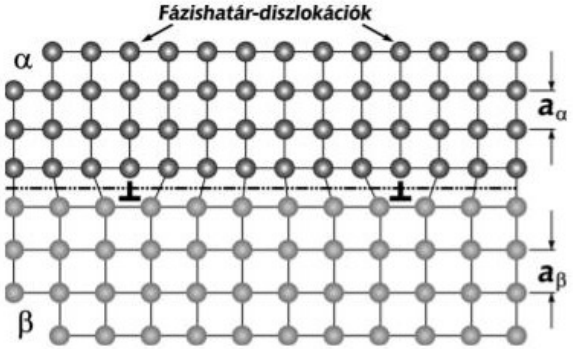
lehet kisszögű vagy nagyszögű

Kétméretű hibák

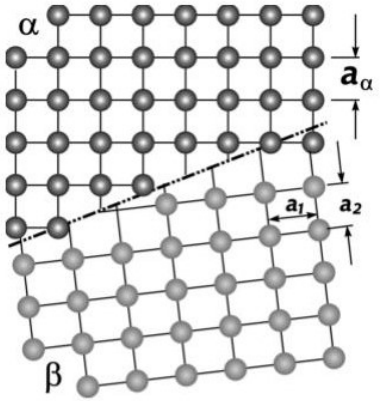
különböző fázisok esetén a fázishatár lehet:



koherens



szemikoherens

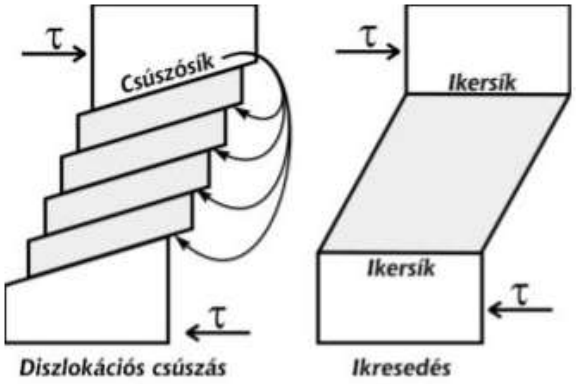


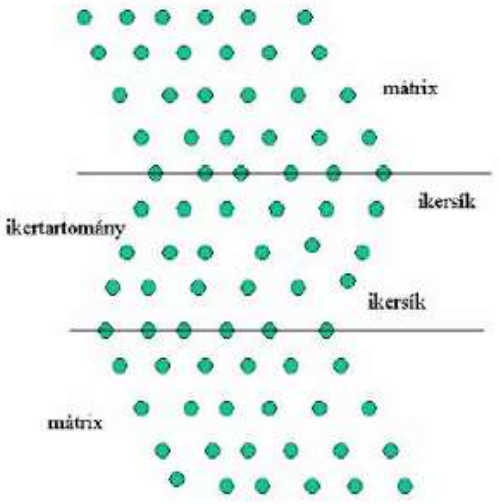
inkoherens

Kétméretű hibák

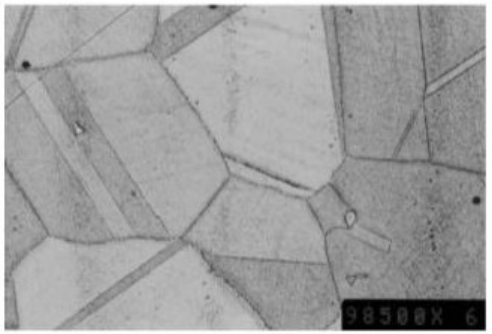
ikersíkok

- ikresedés képlékeny alakváltozásnál





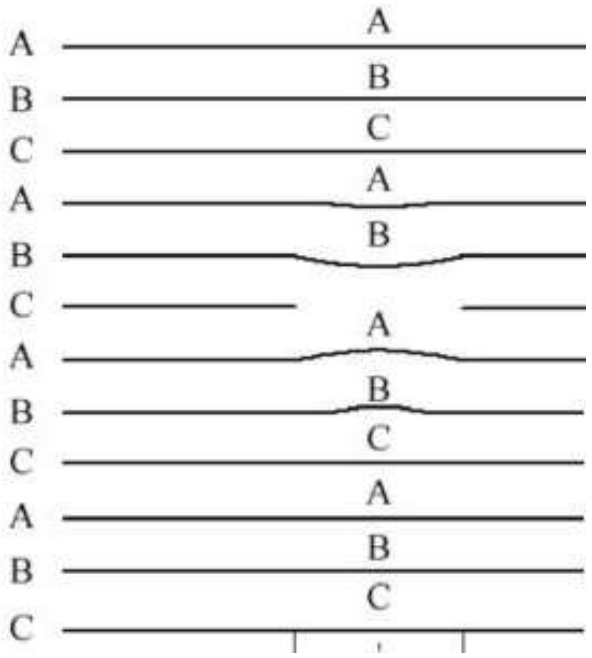
- párhuzamos vonalak a mikroszkópos képen



Kétméretű hibák

rétegződési hibák:

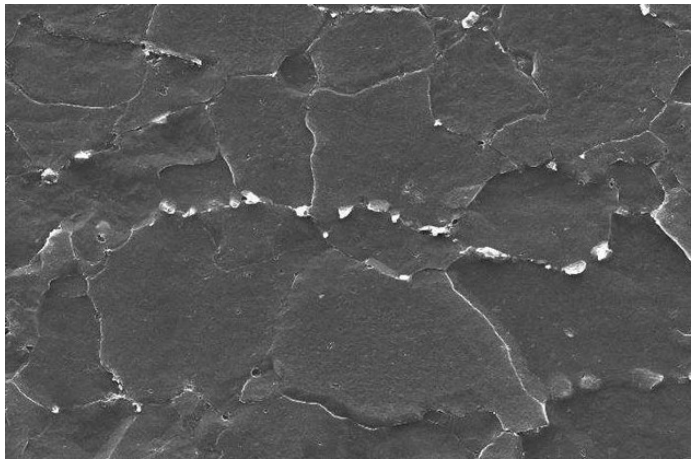
- kristályok, mint meghatározott kristálytani síkokban helyet foglaló atomok rétegei
- a rétegek sorrendjében fellépő hiba
- a C sík egy felülete hiányzik



Háromméretű hibák

Térfogati hibák:

- üregek, repedések



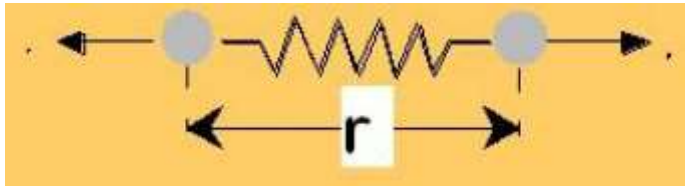
- zárványok

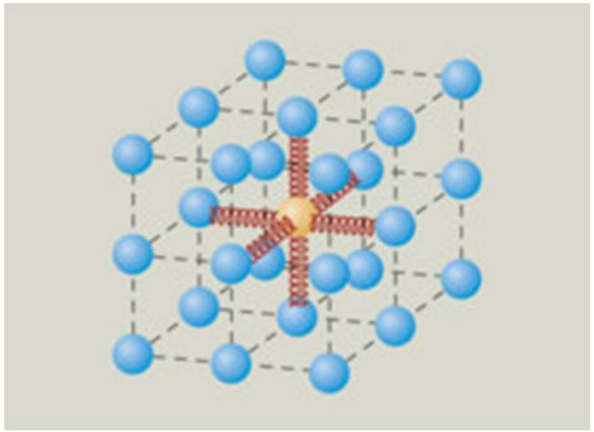


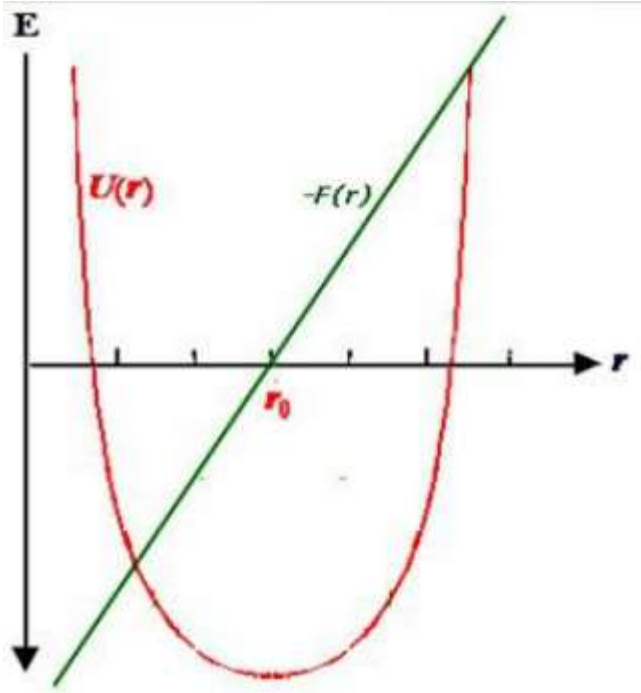
Kristályrácsot összekötő erők

Ideális kristályoknál a rácspontokban lévő részecskék között rugalmas erők

$$F \approx r \quad E_{\text{pot}} \approx r^2$$



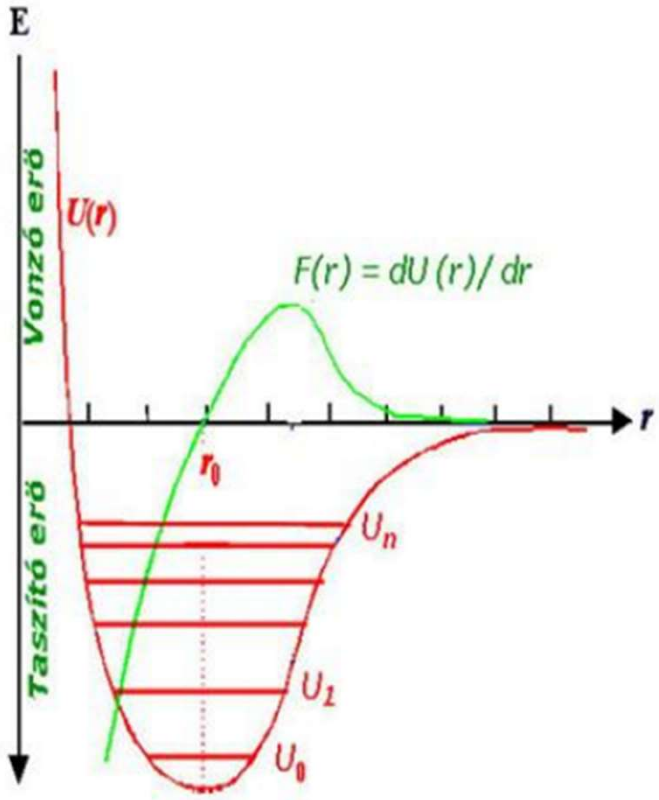




Kristályrácsot összekötő erők

Reális kristályok

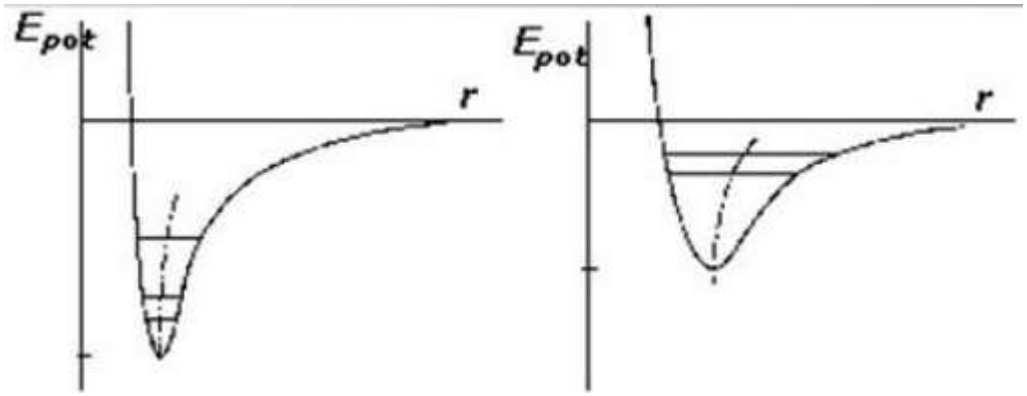
- aszimmetrikus erők
- anharmonikus rezgés
- kvantummechanikai rendszer
  - kvantált rezgés állapotok
  - U_0 nem a potenciál gödör alján van
  - rácsenergia 0 - U_0
  - olvadáspont arányos a gödör mélységével



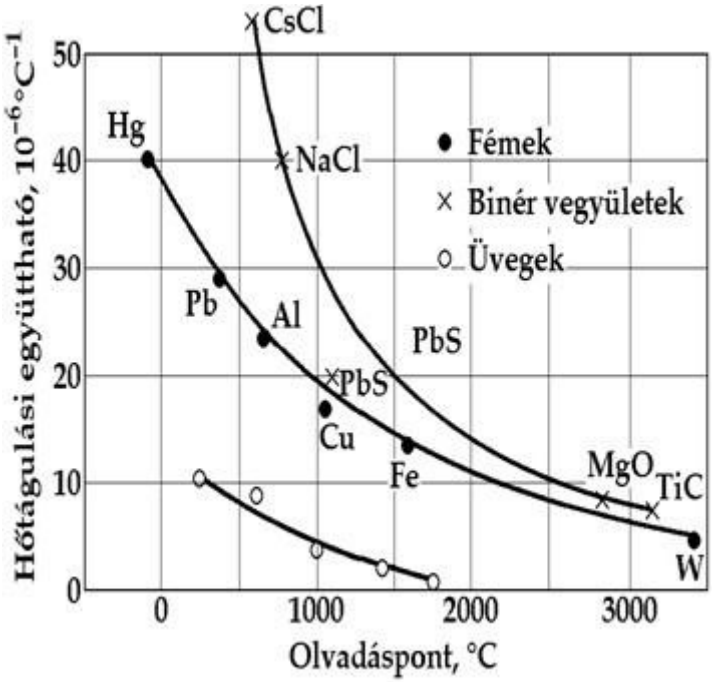
Kristályrácsot összekötő erők

következmények

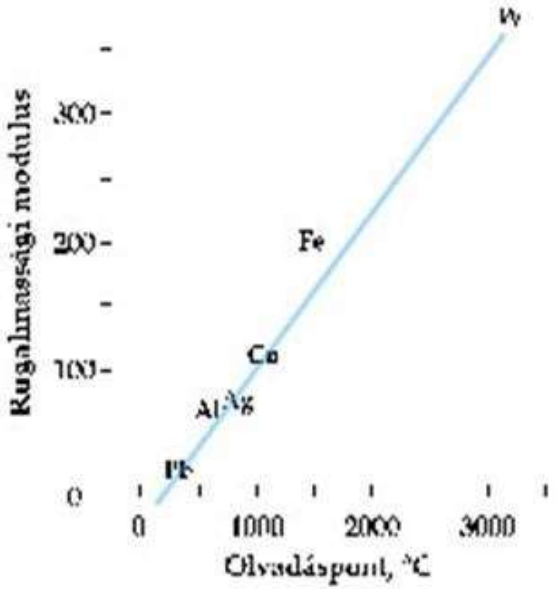
- mély potenciálgödör magas olvadáspont, kis hőtágulás
- hőtágulás függ a potenciálgödör szimmetriájától
- rugalmasság függ az $F(r)$ görbe r_0 körüli meredekségétől



Kristályrácsot összekötő erők



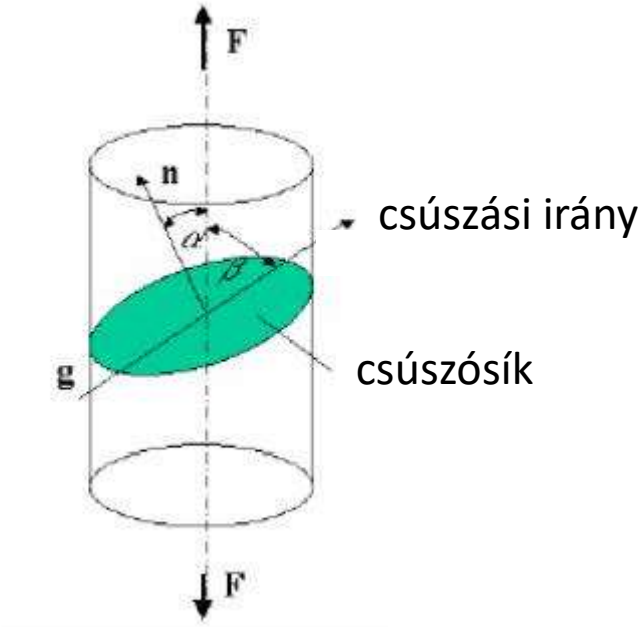
különböző anyagtípusok olvadáspontja és hőtágulása közötti kapcsolat



fémek rugalmassági modulusa és olvadáspontja közötti kapcsolat

Egykristályok képlékeny alakváltozása

a csúszósíkok a csúszási irányok mentén elcsúsznak egymáson

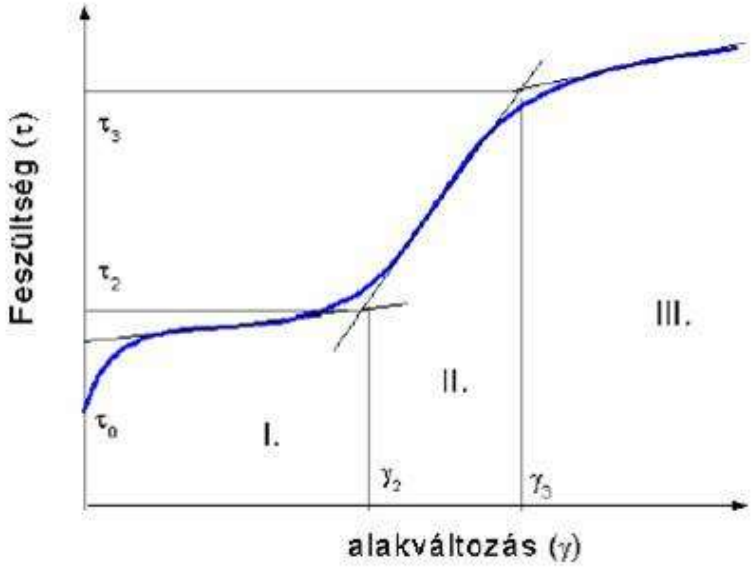


egyszerű csúszás:
alakváltozás egy csúszási rendszerben

többszörös csúszás:
elcsúszás egyszerre több csúszási rendszerben

Egykristályok képlékeny alakváltozása

Egykristályok képlékeny alakváltozása



I. szakasz egyszerű csúszás

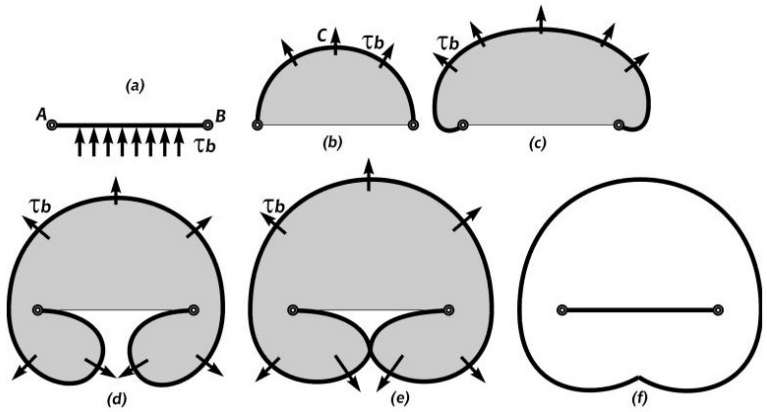
II. szakasz bonyolult / többszörös csúszás

III. szakasz keresztcsúszás, ikerképződés

Egykristályok képlékeny alakváltozása

I. szakasz egyszerű csúszás

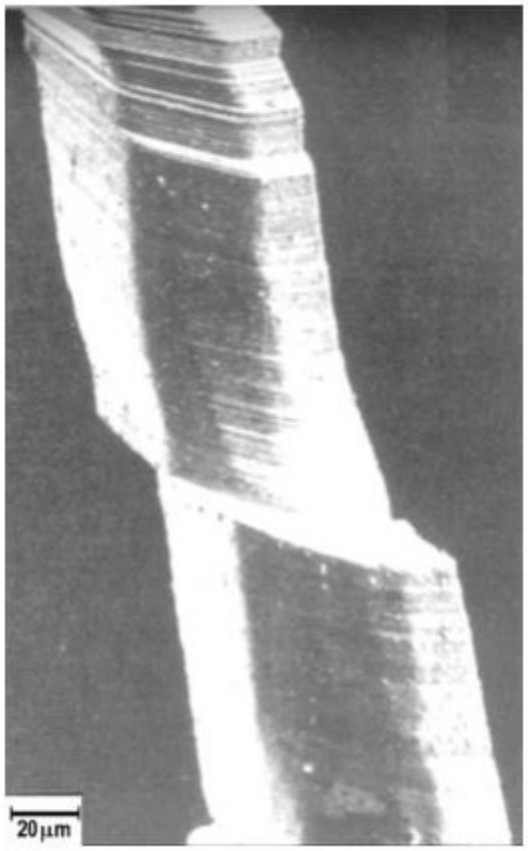
- A Frank-Read mechanizmusnak megfelelően játszódik le



- ha a diszlokáció eléri a félkört, elveszti a stabilitását és kisebb erő is elég a kör tágításához
- félkör esetén van a feszültségnek (τ-nak) a maximuma
- ha a diszlokáció összeér, „leszakad és elszalad”

Egykristályok képlékeny alakváltozása

Cink egykristály alakváltozása
az első szakaszban



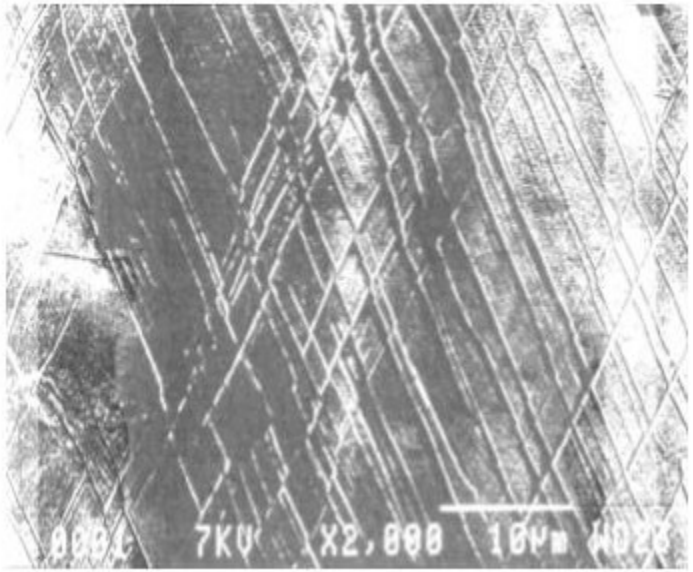
Egykristályok képlékeny alakváltozása

II. szakasz bonyolult csúszás

- mindkét csúszósíkon van Frank-Read forrás
- a két síkon mozgó diszlokációk vannak, melyek a két sík metszésvonalán nagy valószínűséggel találkoznak
- ez megállítja a forrás által létrehozott további diszlokációt
- a forrás nem tud kihajolni annyira, hogy elveszítse a stabilitását, ezért további feszültségre van szüksége
- meredekebb a görbe
- nem lesz pontos rugalmassági határ, mert nem lehet kimérni, hogy meddig lesz F-R forrás, ami kibocsát egy diszlokáció hurkot

Egykristályok képlékeny alakváltozása

Réz egykristály egymást metsző csúszási vonalai

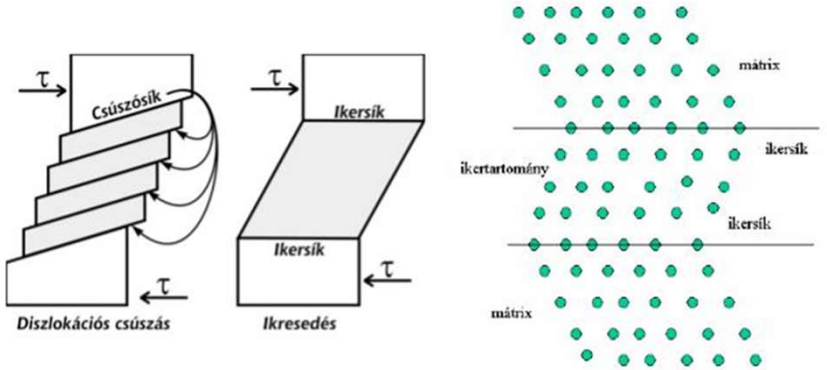


33

Egykristályok képlékeny alakváltozása

III. szakasz keresztcsúszás

- a diszlokációk kikerülik a rögzített diszlokációt
- a csavardiszlokáció párhuzamos a diszlokáció tengelyével, ezért nem kötött a csúszási síkhoz, bármely irányban elmozdulhat, átmegy másik síkra
- ha az eredetivel párhuzamos síkra megy át, megnő annak esélye, hogy ellentétes sodrású diszlokációval találkozik és kioltják egymást
- kevésbé meredek a görbe



Egykristályok képlékeny alakváltozása

- húzás esetén a minta általában a III. szakaszban eltörik
- összenyomással vagy csavarással elérhető egy IV. és V szakasz, amelyekben először a diszlokáció képződés és kioltás egyensúlyba kerül, majd telítődésbe megy át

Egykristályok képlékeny alakváltozása

- térben középpontos kristályoknál hat csúszósík van, ezért az egyszerű csúszás szakasza nagyon rövid, általában több síkon és több irányban megy végbe a diszlokációk mozgása
- a felületen középpontos kristályoknál négy csúszósík van, így van egyszerű csúszási szakasz, majd bonyolult csúszási szakasz is megtalálható
- a hexagonális kristályszerkezetnél egy csúszósík van, így kevesebb rögzített diszlokáció jön létre, kevésbé keményedik fel

Egykristályok képlékeny alakváltozása

az egykristályok anizotropok – tulajdonságaik irányfüggőek

az anizotrópia a II. szakaszon, vagyis a rugalmas szakaszon a legjellemzőbb

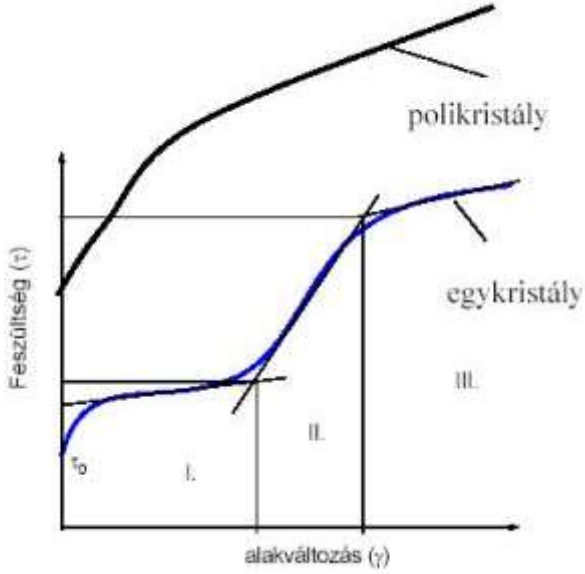
a kis képlékeny alakváltozásos szakaszokon kisebb az anizotrópia

a diszlokáció nem egyenletes eloszlású, sűrűbb és ritkább diszlokációjú részek jönnek létre

cellás szerkezet alakul ki

Polikristályok alakváltozása

- minden kristályszemcsében (krisztallitban) többszörös csúszás
- az I. szakasz hiányzik
- az alakítási keményedés nagyobb mértékű
- mindig nagyobb a feszültség, mint az egykristálynál



- miután a polikristályos anyagokban a krisztallitok véletlenszerűen helyezkednek el, így a csúszási síkok és irányok is tetszőlegek lesznek

Polikristályok alakváltozása

- egyszerűsítésként tegyük fel, hogy minden kristály-szemcsében csak egy csúszósík van
- a feszültség hatására abban a szemcsében indul meg a képlékeny alakváltozás, amelyikben a csúszósík a megfelelő irányú
- az Frank-Read források aktivizálódnak, diszlokáció jön létre, ami kiér a szemcsehatárra, ahol megáll
- az erőhatás növelése következtében a szemcsehatáron olyan nagy helyi feszültség jön létre, hogy a mellette lévő, kedvezőtlen csúszás iránnyal rendelkező szemcsében is megindul a képlékeny alakváltozás

Polikristályok alakváltozása

- valós kristályszerkezetekben több csúszósík van minden szemcsében, így együttesen igen nagy lesz a csúszási rendszerek száma
- ezek közül azok fognak működni, amelyeknél az elmozdulások minimálisak, a befektetett munka maximális
- a helyi alakváltozás és feszültségállapot lényegesen eltérhet az átlagos értékektől
- a polikristályos anyagok akkor lesznek izotrópok, ha a krisztallitok és így a csúszási síkok és irányok teljesen véletlenszerűen helyezkednek el